

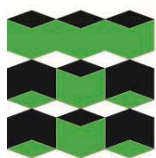


ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ

**Том 335, № 6, 2024
Издается с 1903 г.**

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

**Volume 335, no. 6, 2024
Published since 1903**



**ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

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

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 335, № 6, 2024

Издательство
Томского политехнического университета
2024

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2024

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

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

Учредителем является Томский политехнический университет.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

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



**TOMSK
POLYTECHNIC
UNIVERSITY**

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

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

Volume 335, № 6, 2024

Tomsk Polytechnic University Publishing House
2024

EDITORIAL BOARD

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

AIMS AND SCOPES

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

The journal was founded in 1903.

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

ISSN (print) – 2500-1019

ISSN (on-line) – 2413-1830

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

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

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

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

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

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

The publication of manuscripts is free of charge.

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

- | | | |
|--|--|--|
| <p>Технологии улучшения очистки ствола скважины
Третьяк А.Я.</p> <p>Инженерно-геофизические исследования методом электротомографии при поиске подземных вод в Бодайбинском районе Иркутской области
Шойхонова Т.С., Шкиря М.С., Бирюков П.Г., Дунюшин А.А., Башкеев А.С.</p> <p>Методика определения местоположения утечек и несанкционированных врезок на нефтепроводах
Дульченко А.А., Шестаков Р.А., Матвеева Ю.С.</p> <p>Настройка PVT-моделей. Моделирование нагнетательного фонда скважин. Настройка моделей системы сбора и трубопроводов и системы поддержания пластового давления
Коротков Р.Н., Овчаренко Д.М., Ерофеев В.И.</p> <p>Совершенствование технологий утилизации отходов нефтепродуктов
Кулагина Т.А., Дубровская О.Г., Зайцева Е.Н., Крылышкин Р.Н.</p> <p>Модели и методы глубокого обучения для решения задач дистанционного мониторинга лесных ресурсов
Марков Н.Г., Мачука К.Р.</p> <p>Синтез алгоритма автоматизированной подстройки параметров процесса сушки пиломатериалов
Гречушников В.В., Шилин А.А., Прохоров С.В.</p> <p>Численный анализ теплопритоков к геотермальному теплообменнику с учетом испарения влаги в его конструкции
Половников В.Ю., Шелемехова С.Д., Любимый Е.В.</p> <p>Элементный состав организма диких и домашних животных в районе с проявлениями активной геофагии в Горном Алтае
Барановская Н.В., Паничев А.М., Стрепетов Д.А., Серёдкин И.В., Соктоев Б.Р., Иленьок С.С., Макаревич Р.А., Куровская В.В., Рулик М.А.</p> <p>Математическая модель накопителя энергии автономной фотоэлектрической станции
Обухов С.Г., Давыдов Д.Ю.</p> <p>Накопление мышьяка в орштейнах spolic technosols в районе крупного медеплавильного комбината Среднего Урала
Шабанов М.В., Маричев М.С.</p> <p>Углеродные матрицы, допированные Sr, для использования в качестве электродов в радиоизотопных источниках электрической энергии
Аскарова А.А., Николкин В.Н., Бутаков Д.С., Синельников Л.П., Рычков В.Н.</p> <p>Результаты изучения разреза «Южная Рассольная» такатинской свиты на территории Полудово-Колчимского антиклинория Западно-Уральской зоны складчатости (Красновишерский район Пермского края)
Пактовский Ю.Г., Плюснин А.В., Томила Е.М., Староселец Д.А., Афонин И.В., Рабцевич Е.С., Сулима А.И., Чуйко В.А.</p> | <p>7</p> <p>14</p> <p>26</p> <p>37</p> <p>46</p> <p>55</p> <p>75</p> <p>89</p> <p>98</p> <p>110</p> <p>123</p> <p>135</p> <p>143</p> | <p>Technologies to improve wellbore cleaning
Tretyak A.Ya.</p> <p>Engineering geophysical investigations using electrical resistivity tomography for groundwater exploration in the Bodaibo district of the Irkutsk region
Shoikhonova T.S., Shkiria M.S., Biryukov P.G., Dunyushin A.A., Bashkeev A.S.</p> <p>Methodology for location of leakages and unauthorized tie-ins on oil pipelines
Dulchenko A.A., Shestakov R.A., Matveeva Yu.S.</p> <p>Setup of PVT-models. Modeling of injection wells. Configuring models of collection system and pipelines and reservoir pressure maintenance system
Korotkov R.N., Ovcharenko D.M., Erofeev V.I.</p> <p>Improvement of technologies for recycling waste petroleum
Kulagina T.A., Dubrovskaya O.G., Zaytseva E.N., Krylyshkin R.N.</p> <p>Deep learning models and methods for solving the problems of remote monitoring of forest resources
Markov N.G., Machuca C.R.</p> <p>Synthesis of an algorithm for automated adjustment of lumber drying based on linguistic information
Grechushnikov V.V., Shilin A.A., Prokhorov S.V.</p> <p>Numerical analysis of heat gain to geothermal heat exchangers with moisture evaporation in the structure
Polovnikov V.Yu., Shelemekhova S.D., Lyubiviy E.V.</p> <p>Chemical composition of wild and domestic animals' organism in areas of geophagy distribution in Altai Republic
Baranovskaya N.V., Panichev A.M., Strepetov D.A., Seryodkin I.V., Soktoev B.R., Ilenok S.S., Makarevich R.A., Kurovskaya V.V., Rulik M.A.</p> <p>Mathematical model of a battery energy storage for a standalone solar photovoltaic plant
Obukhov S.G., Davydov D.Yu.</p> <p>Arsenic accumulation in spolic technosols in the area of a large copper smelting plant in the Middle Urals
Shabanov M.V., Marichev M.S.</p> <p>Sr-doped carbon matrices for use as electrodes in autonomous electrical energy sources
Askarova A.A., Nikolkin V.N., Butakov D.S., Sinelnikov L.P., Rychkov V.N.</p> <p>Results of the study of the section "Yuzhnaya Rassolnaya" of the Takata formation in the territory of the Poludovo-Kolchimsky anticlinorium of the Western-Ural folding zone (Krasnovishersky district, Perm territory)
Paktovsky Yu.G., Plusnin A.V., Tomilina E.M., Staroselets D.A., Afonin I.V., Rabtsevich E.S., Sulima A.I., Chuiko V.A.</p> |
|--|--|--|

- Кора выветривания доюрского комплекса Калиновое месторождения углеводородов Томской области: особенности состава и строения**
 Краснощечкова Л.А., Вологодина И.В., Гарсия Бальса А.С.
- Диагностика технического состояния скважин, пересекающих пресноводные горизонты, методом активной термометрии**
 Акчурина Р.З., Давлетшин Ф.Ф., Рамазанов А.Ш., Валиуллин Р.А., Шарафутдинов Р.Ф., Исламов Д.Ф.
- Наножидкостное заводнение как метод повышения нефтеотдачи: механизм, преимущества**
 Андреева Е.С., Маринина О.А., Туровская Л.Г.
- Влияние газа, возникающего при разложении газового гидрата, на фильтрационные свойства донных отложений арктического шельфа. Лабораторное моделирование**
 Барышников Н.А., Зенченко П.Е., Турунтаев С.Б.
- Влияние геометрии струйного эжектора на подачу насосной установки, предупреждающей асфальтосмолопарафиновые отложения**
 Уразакон К.Р., Макарова Т.Г., Борисов А.О.
- Прогнозирование безаварийной работы добывающих скважин с горизонтальным окончанием в условиях высокого выноса механических примесей на примере Северо-Комсомольского месторождения**
 Савенок О.В., Жарикова Н.Х., Верисокин А.Е., Керимов А.-Г.Г., Арутюнян А.С.
- Критический экспертный анализ методов идентификации и наблюдателей переменных состояния синхронных электродвигателей с постоянными магнитами**
 Глазырин А.С., Попов Е.И., Копырин В.А., Ковалев В.З., Боловин Е.В., Попов С.С., Кладиев С.Н., Филипас А.А., Хамитов Р.Н.
- 160 Pre-Jurassic weathering crust of the Kalinovo hydrocarbon deposit, Tomsk region: composition and structure characteristics**
 Krasnoshchekova L.A., Vologdina I.V., Garcia Balca A.S.
- 175 Diagnostics of the technical condition of wells drilled through freshwater horizons using active thermometry**
 Akchurin R.Z., Davletshin F.F., Ramazanov A.Sh., Valiullin R.A., Sharafutdinov R.F., Islamov D.F.
- 189 Nanofluid flooding as a method of enhancing oil recovery: mechanism, advantages**
 Andreeva E.S., Marinina O.A., Turovskaya L.G.
- 203 Impact of gas arising from gas hydrate decomposition on the effective permeability of bottom sediments of the Arctic shelf: a laboratory simulation**
 Baryshnikov N.A., Zenchenko P.E., Turuntaev S.B.
- 214 Effect of jet ejector geometry on the supply of a pumping unit preventing wax-deposits**
 Urazakov K.R., Makarova T.G., Borisov A.O.
- 223 Prediction of emergency-free operation of production wells with a horizontal termination under conditions of high removal of mechanical impurities on the example of the Severo-Komsomolskoe field**
 Savenok O.V., Zharikova N.Kh., Verisokin A.E., Kerimov A.-G.H., Arutyunyan A.S.
- 240 Critical expert analysis of permanent magnet synchronous motors identification methods and state variable observers**
 Glazyrin A.S., Popov E.I., Kopyrin V.A., Kovalev V.Z., Bolovin E.V., Popov S.S., Kladiev S.N., Filipas A.A., Khamitov R.N.

УДК 622.24.065
DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4716
Шифр специальности ВАК: 2.8.1

Технологии улучшения очистки ствола скважины

А.Я. Третьяк✉

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова,
Россия, г. Новочеркасск*

✉13050465@mail.ru

Аннотация. Актуальность. Основным технологическим процессом при сооружении нефтяных и газовых скважин является эффективная очистка ствола скважины, особенно при бурении горизонтальных и наклонных скважин. В статье рассматриваются вопросы технологии бурения ствола скважины по традиционной методике в сочетании с полимерглинистыми растворами на водной и углеводородной основе, а также улучшения выносных свойств бурового раствора с учетом плотности, производительности бурового насоса, реологических параметров жидкости, геометрии кольцевого пространства скважины, формы и концентрации частиц бурового шлама. Недостаточная очистка забоя скважины вызывает нежелательные явления, приводящие к различным осложнениям. Объектом исследования является технология транспортировки шлама по стволу скважины на поверхность. Приведены основные формулы, характеризующие работу сменных гидромониторных насадок. От степени турбулентности потока зависит качество очистки ствола скважины. **Цель:** разработка технических решений, способствующих повышению качества очистки ствола скважины. **Методы.** Экспериментальными работами установлены оптимальные геометрические параметры гидравлических насадок для двухъярусного антивибрационного долота и конструкция буровых труб с винтовыми ребрами. **Результаты и выводы.** Разработано двухъярусное антивибрационное долото со сменными гидромониторными насадками и бурильные трубы с винтовыми ребрами. Внедрение этих разработок в практику буровых работ позволит улучшить качество очистки ствола скважины за счет создания турбулентного режима течения бурового раствора.

Ключевые слова: буровой раствор, выносная способность раствора, гидромониторные насадки, бурильные трубы, винтовые ребра

Для цитирования: Третьяк А.Я. Технологии улучшения очистки ствола скважины // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 6. – С. 7–13. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4716

UDC 622.24.065
DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4716

Technologies to improve wellbore cleaning

A.Ya. Tretyak✉

South Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov, Novocherkassk, Russian Federation

✉13050465@mail.ru

Abstract. Relevance. The main technological process when constructing oil and gas wells is effective wellbore cleaning, especially when drilling horizontal and deviated wells. The article deals with the peculiarities of wellbore drilling technology according to the traditional method in combination with water and hydrocarbon-based polymer-clay solutions, as well as improvement of drilling mud removal properties taking into account density, drilling pump productivity, rheological parameters of the fluid, geometry of the well annulus, shape and concentration of drill cuttings particles. Insufficient cleaning of the well bottom hole causes undesirable phenomena leading to various complications. The object of the research is the technology of cuttings transportation along the wellbore to the surface. The basic formulas characterizing the work of interchangeable hydromonitor nozzles are given. The quality of wellbore cleaning depends on the degree of flow turbulence. **Aim.** To develop technical solutions that contribute to improving the quality of wellbore cleaning. **Methods.** Optimal geometrical parameters of hydraulic nozzles for double-deck anti-vibration bit and design of drill pipes with helical ribs have been established by

experimental works. **Results and conclusions.** A double-deck anti-vibration bit with interchangeable hydro-monitor nozzles and drill pipes with helical ribs were developed. Implementation of these developments in the practice of drilling operations will improve the quality of wellbore cleaning by creating a turbulent regime of drilling fluid flow.

Keywords: drilling mud, mud carrying capacity, hydro-monitor nozzles, drill pipes, helical ribs

For citation: Tretyak A.Ya. Technologies to improve wellbore cleaning. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 6, pp. 7–13. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4716

Введение

Самым важным процессом во всей технологии сооружения нефтегазовых скважин является эффективная очистка ствола скважины. Задача становится еще более актуальной, когда сооружаются наклонно-направленные и горизонтальные скважины, а зенитный угол составляет более 80° , при этом технология промывки таких скважин значительно отличается от технологии промывки вертикальных скважин [1].

Правильно подобранная технология очистки ствола скважины оказывает существенное влияние на аварийность, стоимость и скорость бурения. Неэффективная очистка скважины приводит к накоплению шлама в стволе, что способствует возникновению затяжек, заклинок, образованию шламовых подушек и прихвату бурильной колонны.

При промывке горизонтальной части скважин частицы шлама распределяются достаточно равномерно в поперечном сечении потока, а направление силы тяжести частиц горных пород – перпендикулярно потоку жидкости, следовательно, механизм удаления шлама в стволе скважин иной. В этом случае шлам накапливается в нижней части ствола скважины, а при бурении вертикальных и наклонно-направленных скважин крупные частицы шлама могут повторно попадать на забой скважины и измельчаться резцами долота, что способствует уменьшению скорости бурения.

Скорость движения бурового раствора зависит от производительности бурового насоса, реологических параметров жидкости, геометрии кольцевого пространства скважин, размера, плотности, формы и концентрации частиц шлама.

Вынос разбуренной горной породы на устье скважины происходит двумя путями: мелкие частицы шлама растворяются в буровом растворе, при этом увеличивается его вязкость и плотность, крупные частицы шлама выносятся на дневную поверхность за счет скоростного напора промывочной жидкости. Выносная способность бурового раствора зависит от скорости восходящего потока, степени турбулентности и его структурно-механических свойств. Сумма этих факторов и определяет выносную эффективность бурового раствора. Особенно важен фактор турбулентности

бурового раствора при сооружении наклонно-направленных и горизонтальных скважин [2, 3].

Известно, что при разрушении долотом горной породы на забое скважины образуется скопление крупных частиц шлама, которые повторно попадают под резцы долота и разрушаются на более мелкие. Механическая скорость бурения будет значительно повышаться, если улучшить качество очистки ствола скважины.

Методы и результаты исследования

С целью оптимизации очистки ствола скважин разработано двухъярусное антивибрационное долото со сменными насадками (рис. 1).

При проектировании породоразрушающего инструмента главной задачей является выбор геометрических параметров резцов и гидромониторных насадок. На процессы очистки ствола скважины влияют параметры истекающей струи бурового раствора, которые зависят от конструкции гидромониторных насадок. При выборе оптимального профиля насадок, их количества и ориентации гидромониторных отверстий необходимо учитывать инженерные расчеты и результаты моделирования течения потока промывочной жидкости в гидромониторных каналах. Известно, что режим промывки скважины будет оптимальным, если скорость истечения бурового раствора из насадок будет более 40 м/с, при этом будет получен наибольший гидромониторный эффект за счет увеличения силы удара струи о забой скважины [4–8].

Известно, что из-за возникновения гидромеханического давления под действием высокого напора струи бурового раствора, выходящей из гидромониторных насадок долота, происходит гидравлический удар, в результате чего поры горной породы на забое скважины, расширяясь, разрушаются. Происходит одновременно гидромеханическое разрушение горных пород струей бурового раствора и резцами PDC бурового долота, при этом осуществляется эффективная очистка забоя скважины от шлама. При истечении бурового раствора через насадки потенциальная энергия жидкости (давление) переходит в кинетическую энергию, то есть в скоростной напор струи. Выходящий из насадок буровой раствор становится турбулентным.

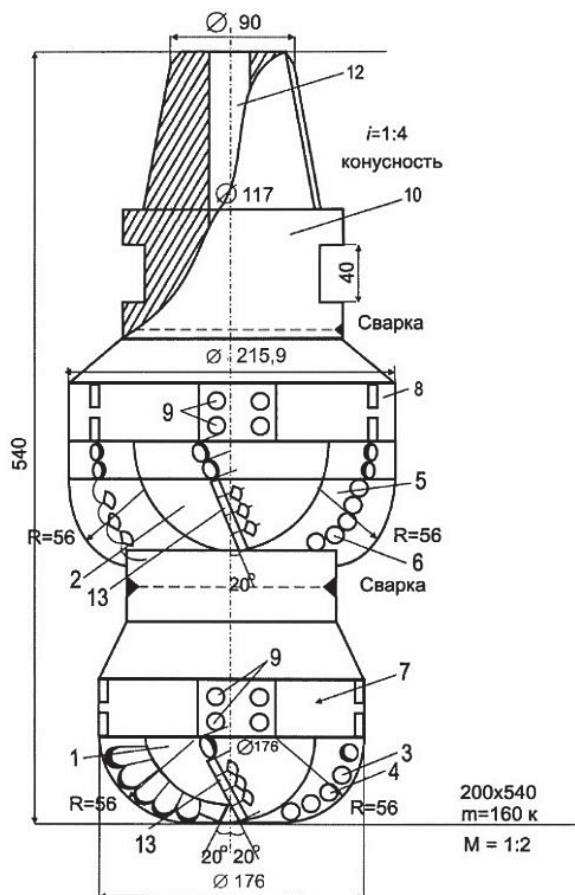


Рис. 1. Двухъярусное антивибрационное долото: 1 – забуривающий ярус; 2 – разбуривающий ярус; 3 – режущие лопасти нижнего забуривающего яруса; 4 – резцы нижнего разбуривающего яруса; 5 – режущие лопасти верхнего разбуривающего яруса; 6 – резцы верхнего разбуривающего яруса; 7, 8 – стабилизаторы; 9 – штыри; 10 – хвостовик; 11 – сменные гидромониторные насадки; 12 – промывочное отверстие; 13 – конусные PDC верхнего и нижнего ярусов

Fig. 1. Two-tier antivibration chisel: 1 – small driller tier; 2 – large drilling tier; 3 – cutting blades of the lower boring small tier; 4 – cutters of the lower drilling big tier; 5 – cutting blades of the top drilling big tier; 6 – blades of the top drilling big tier; 7, 8 – stabilizers; 9 – pins; 10 – shank; 11 – replaceable hydro-monitor nozzles; 12 – washing hole; 13 – cone PDCs of the upper and lower tiers

Схема установки резцов PDC показана на рис. 2.

При изготовлении высокоэффективных буровых долот главной задачей является подбор параметров гидромониторных насадок. При выборе оптимального профиля гидромониторных насадок, их количества и ориентации необходимо, прежде всего, выполнить инженерные расчеты. Критерием качества очистки забоя скважины является число Рейнольдса (Re), которое позволяет определить режим течения бурового раствора. Число Рейнольдса определяется по формуле:

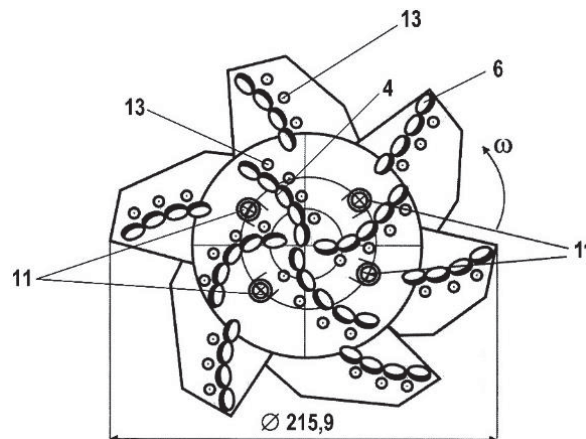


Рис. 2. Двухъярусное антивибрационное долото (вид снизу): 4 – резцы нижнего разбуривающего яруса; 6 – резцы верхнего разбуривающего яруса; 11 – сменные гидромониторные насадки; 13 – конусные PDC верхнего и нижнего ярусов

Fig 2. Two-tier antivibration bit (bottom view): 4 – cutters of the lower drilling tier; 6 – cutters of the upper drilling tier; 11 – replaceable hydro-monitor nozzles; 13 – cone PDCs of the upper and lower tiers

$$Re = \frac{V \cdot 4R_r}{\nu},$$

где V – средняя скорость течения бурового раствора, м/с; ν – кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$; R_r – гидравлический радиус, $R_r = \frac{d}{4}$; d – диаметр скважины, м.

Если $Re < 2000$, то буровой раствор будет двигаться по стволу скважины в ламинарном режиме, если $2000 < Re < 4000$, то будет выполняться переходный режим, если $Re > 4000$, то режим будет турбулентным.

Известно, что из-за возникновения гидромеханического давления под действием высокого напора струи бурового раствора, выходящей из гидромониторных насадок долота, происходит гидравлический удар, в результате чего улучшается разрушение горных пород. Происходит одновременно гидромеханическое разрушение горных пород струей бурового раствора и резцами PDC бурового долота, при этом осуществляется эффективная очистка забоя скважины от шлама. При истечении бурового раствора через насадки потенциальная энергия жидкости (давление) переходит в кинетическую энергию, то есть в скоростной напор струи. Выходящий из насадок буровой раствор становится турбулентным, так как число Рейнольдса (Re) превышает 4000. Турбулентное течение бурового раствора характеризуется вихреобразным, беспорядочным движением, что способствует улучшению степени очистки забоя скважины. Механическое воздействие струи бурового раствора на забой скважины оценивается давлением или силой удара

струи в месте контакта его с породой, что определяется скоростью струи, ее размером и плотностью [9–12].

Гидравлические потоки способствуют увеличению механической скорости бурения, если буровой шлам вовремя удаляется с забоя скважины.

Для двухъярусного антивибрационного долота были разработаны сменные гидромониторные насадки для бурения крепких, мягких и средней крепости горных пород (рис. 3, 4).

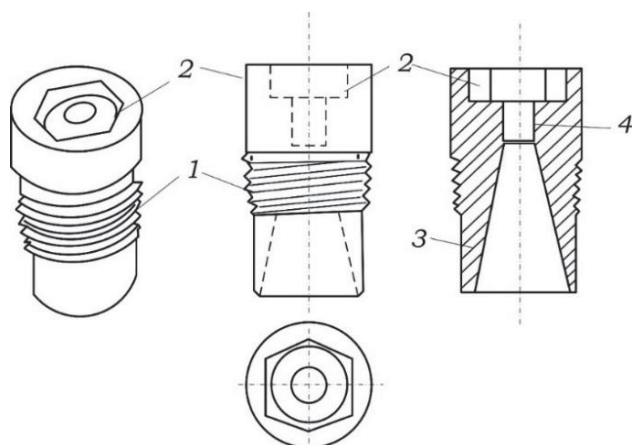


Рис. 3. Гидромониторная насадка для крепких пород: 1 – корпус с резьбой; 2 – паз под ключ; 3 – конус формирования давления струи; 4 – канал формирования напора струи

Fig. 3. Hydromonitor nozzle for hard rocks: 1 – body with thread; 2 – turnkey groove; 3 – cone of jet pressure formation; 4 – channel of jet pressure formation

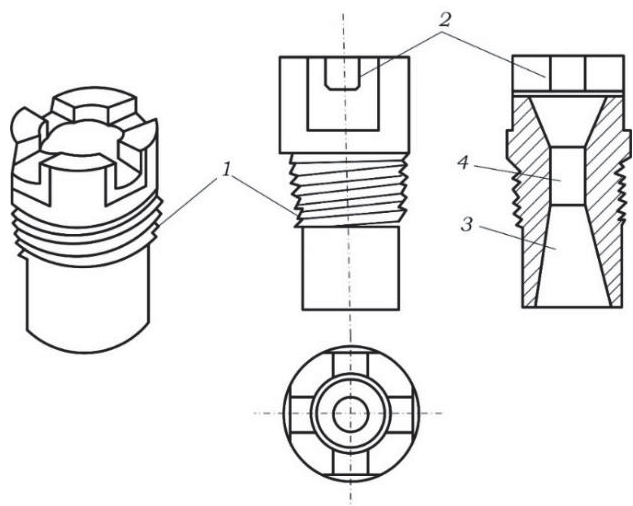


Рис. 4. Гидромониторная насадка для пород мягких и средней крепости: 1 – корпус с резьбой; 2 – паз под ключ; 3 – конус формирования напора струи; 4 – канал формирования напора струи

Fig. 4. Hydromonitor nozzle for soft and medium strength rocks: 1 – body with thread; 2 – turnkey groove; 3 – cone of jet head formation; 4 – jet head formation channel

Оптимальные конструкции гидромониторных насадок улучшают вынос шлама и разрушают горные породы.

Расход бурового раствора, выходящего из насадок, определяется по формуле [13]:

$$Q = \varepsilon \cdot \xi \cdot w \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H},$$

где ε – коэффициент сжатия струи; ξ – коэффициент сопротивления; w – площадь сечения насадок; H – напор.

Потери давления в насадках долота определяются по формуле, МПа:

$$\Delta P_d = \frac{\rho \cdot Q^2}{2 \cdot A_d^2},$$

где ρ – плотность бурового раствора, кг/м³; Q – подача насоса, л/с; A_d – площадь насадок, мм².

Потери давления (энергии) на входе, Па:

$$\Delta P_d = \frac{K_L \cdot \rho \cdot V^2}{2},$$

где V – скорость потока в насадках долота, м/с; $K_L=0,5$ – квадратный вход; $K_L=0,05$ – круглый вход.

Скорость подъема (выноса) частиц $V_{\text{вын}}$ определяется по формуле:

$$V_{\text{вын}} = V_{\text{потока}} - V_{\text{ч}},$$

где $V_{\text{потока}}$ – скорость потока в кольцевом пространстве; $V_{\text{ч}}$ – скорость погружения частиц.

Площадь насадок долота определяют по формуле:

$$A = \sqrt{\frac{Q^2 \cdot \rho}{2 \cdot \Delta P_d}},$$

где A – площадь насадок долота, мм²; ΔP_d – гидравлические потери в долоте, МПа; Q – подача насосов, л/с.

Давление, передаваемое на забой, при использовании стандартного долота рассчитывается по формуле:

$$P_{\text{заб}} = \frac{7,7^2}{x^2/d_n^2} \cdot \Delta P_d,$$

где $P_{\text{заб}}$ – давление струи на забой, МПа; d_n – диаметр насадки, м; x – расстояние от насадки до забоя, м.

Скорость вылета струи из насадки должна быть не менее 40 м/с и определяется:

$$V_c = \varphi \sqrt{2 \times g \times H_H},$$

где $\varphi=0,62$ – коэффициент скорости; H_H – рабочий напор воды перед насадкой, м.

Расход воды через насадку определяется:

$$Q_H = \mu \times w \times \sqrt{2 \times g \times H_H},$$

где μ – коэффициент расхода; $\mu=0,92-0,96$, $\mu=a \times \varphi$; a – коэффициент сжатия струи, $a \approx 1$; w – площадь поперечного сечения насадки, м^2 .

Диаметр насадки рекомендуется рассчитывать по формуле:

$$d = g \sqrt{\frac{Q}{\sqrt{H_1}}}$$

где Q – подача насоса при оптимальном режиме работы, $\text{м}^3/\text{ч}$; H_1 – напор насоса при данной насадке.

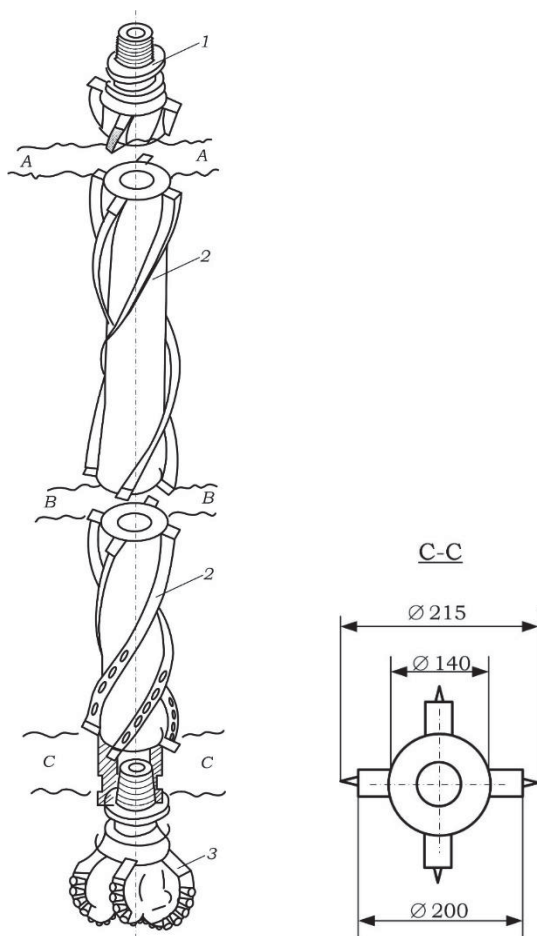


Рис. 5. Общий вид буровой колонны с винтовыми ребрами: 1 – переводник под гладкую буровую колонну; 2 – винтовая буровая колонна; 3 – долото. Для $\varnothing 140$ мм: $n=200$ об/мин (3,5 р/с); $V_a=3-3,5$ м/с; $t=100$ мм (≈ 1 м); шаг винта $\eta=90\%$

Fig. 5. General view of the drill string with helical ribs: 1 – smooth drill string translator; 2 – screw drill string; 3 – drill bit. For $\varnothing 140$ mm: $n=200$ rpm (3,5 r/s); $V_a=3-3,5$ m/s; $t=100$ mm (≈ 1 m); screw pitch $\eta=90\%$

В работах многих авторов сказано, что для качественной очистки ствола скважины требуется максимально увеличить расход бурового раствора, но в этом случае винтовой двигатель и забойная теле-

метрическая система могут быть повреждены. С целью решения данной проблемы предлагается включение в состав компоновки низа буровой колонны (КНБК) специальных буровых труб с винтовыми ребрами (рис. 5).

За счет создания винтовых ребер на бурильных трубах повышается выноса шлама буровым раствором и создается турбулентный режим движения жидкости при вращении буровой колонны. Механическое перемешивание частиц шлама в наклонном и горизонтальном стволе улучшает вынос шлама с нижней части ствола в верхнюю. Применение буровой колонны, имеющей винтовые линии (пазы), будет способствовать уменьшению силы прилипания снаряда к стенкам скважины.

Применение специальных буровых труб с винтовыми ребрами, выступающими на 30 мм, позволит при вращении бурильной колонны обеспечить эффективное поднятие частиц шлама по стволу скважины. Изменяющийся угол наклона спиральных винтовых ребер на буровых штангах способствует ускорению движения шлама и выносу частиц горных пород с максимальной скоростью на поверхность.

Использование двухъярусного антивибрационного долота с гидромониторными насадками для бурения крепких, мягких и средних горных пород, а также бурильных труб с винтовыми ребрами будет способствовать турбулизации входящего потока промывочной жидкости и, как результат, улучшению качества очистки ствола скважины, что в конечном виде будет способствовать повышению скорости бурения.

При такой комплектации происходит процесс взаимодействия вращающейся колонны с восходящим потоком бурового раствора, в результате чего совершается переход ламинарного течения в турбулентный, при этом значительно улучшается качество очистки ствола скважины [14–20].

Выводы

1. На качество очистки ствола скважины от бурового шлама оказывают влияние, в первую очередь, несколько факторов – это, в частности, параметры бурового раствора: скорость движения потока по стволу скважины, плотность и вязкость. Кроме того, заметное влияние в данном случае оказывают параметры шлама (плотность частиц, размер и форма, а также их концентрация). При этом не менее важное значение имеет комплектация специальным инструментом бурильной колонны, а также угол наклона ствола скважины.
2. Наличие специальных гидромониторных насадок на буровом долоте, его двухъярусность и включение в состав КНБК буровых труб с вин-

товыми ребрами позволит создать турбулентный режим движения жидкости и улучшить транспортировку бурового шлама на поверхность.

3. Разработанные технологии для улучшения степени очистки ствола скважины, при сочетании в

одной технологической цепочке двухъярусного антивибрационного долота со специальными, съемными гидромониторными насадками и буровых труб с винтовыми ребрами, позволит создать предпосылки для повышения производительности буровых работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балаба В.И., Зинченко О.Д. Технические средства для повышения эффективности гидротранспорта шлама при бурении наклонных и горизонтальных участков ствола скважины // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2015. – № 3. – С. 23–27.
2. Нескоромных В.В., Пушмин П.С. Методика оптимальных параметров режима и условий бурения скважин // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАН. – 2011. – № 1 (38). – С. 151–157.
3. Ламбин А.И. Показатели эффективности удаления шлама при бурении наклонно-направленных скважин // Наука о Земле и недропользование. – 2022. – Т. 45. – № 3. – С. 285–293.
4. Нескоромных В.В., Попова М.С., Парахонько Е.В. Разработка породоразрушающего инструмента с резцами PDC // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 2. – С. 131–138.
5. Харламов С.Н., Джанхорбани М., Зайковский В.В. Транспорт шлама буровым раствором в горизонтальных скважинах. Часть 1. Моделирование структуры дисперсных течений // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 10. – С. 34–48.
6. Результаты применения новых конструкций буровых долот, армированных резцами гребнеобразной формы PDC / А.Я. Третьяк, Е.А. Нырков, Е.В. Сидорова, К.А. Борисов // Устойчивое развитие горных территорий. – 2019. – Т. 11. – № 4 (42). – С. 519–527. DOI: 10.21177/1998-4502-2019-11-4-519-527.
7. Инновационные подходы к конструированию высокоэффективного породоразрушающего инструмента / А.Я. Третьяк, В.В. Попов, А.Н. Гроссу, К.А. Борисов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 8. – С. 225–230. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-8-0-225-230.
8. Новое двухъярусное долото режущего типа / А.Я. Третьяк, О.В. Савенко, А.Н. Гроссу, К.А. Борисов // Oil. Gas. Journal Russia. – 2015. – № 5. – С. 50–53.
9. Моделирование истечения промывочной жидкости из гидромониторных отверстий PDC долот / В.А. Бруйка, А.М. Гринев, В.В. Ремнев, Д.В. Сморгалов. URL: https://www.crm.ics.org.ru/uploads/crmissues/crm_2013_4/13413.pdf (дата обращения 10.11.2021).
10. Большая энциклопедия Нефти и газа. Гидромониторный эффект. URL: <https://www.ngpedia.ru/id624023p4.html> (дата обращения 10.11.2021).
11. New generation drilling bits / A.A. Tretyak, V.I. Balaba, V.V. Popov, N.E. Fomenko, K.A. Borisov, V.A. Tkachev // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – Vol. 87. – Iss. 5. – № 052029.
12. Третьяк А.Я., Литкевич Ю.Ф., Круглова Т.Н. Устройство и технология непрерывной промывки скважины // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 5. – С. 181–188. DOI: 10.18799/24131830/2023/5/4142.
13. Бабаян Э.В., Черненко А.В. Инженерные расчеты при бурении. – М.: Инфра-Инженерия, 2016. – 440 с.
14. Application of hybrid artificial neural networks for predicting rate of penetration (ROP): a case study from Marun oil field / S.B. Ashrafi, M. Anemangely, M. Sabah, M.J. Ameri // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – Vol. 175. – P. 604–623.
15. Beilin F., Dourfaye A., King W. The current state of PDC bit technology. P. 3. // World Oil. – November 2010. – Vol. 2. – P. 67–71.
16. Bentsen R.G., Wilson D.C. Optimization techniques for weight on and rotary speed // The J. of Canad. Petr. – 2000. – № 4.
17. Soares C., Daigle H., Gray K. Evaluation of PDC bit ROP models and the effect of rock strength on model coefficients // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2016. – Vol. 34. – P. 1225–1236.
18. Syzrantseva K., Arishin V., Dvoynikov M. Optimization of the damping element of axial vibrations of the drilling string by computer simulation // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – Vol. 11 (10). – P. 2312–2315.
19. A new method of combined rock drilling / T. Jiren, L. Yiyu, G. Zhaolong, X. Binwei, S. Huijuan et al. // International Journal of Mining Science and Technology. – 2014. – Vol. 24. – Iss. 1. – P. 1–6.
20. A new methodology for optimization and prediction of rate of penetration during drilling operations / Y. Zhao, A. Noorbakhsh, M. Koopialipoor, A. Azizi, M.M. Tahir // Engineering with Computers. – 2019. DOI: 10.1007/s00366-019-00715.

Информация об авторе

Александр Яковлевич Третьяк, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой нефтегазовых техники и технологий, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Россия, 346400, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132. 13050465@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7362-5536>

Поступила в редакцию: 25.03.2024

Поступила после рецензирования: 08.04.2024

Принята к публикации: 19.04.2024

REFERENCES

1. Balaba V.I., Zinchenko O.D. Technical means for increasing the efficiency of hydro-transport of cuttings when drilling inclined and horizontal sections of a wellbore. *Equipment and technologies for the oil and gas complex*, 2015, no. 3, pp. 23–27. (In Russ.)
2. Neskornnykh V.V., Pushmin P.S. Methodology of the optimal parameters of re-mode and conditions of well drilling. *Izvestiya Sibirskogo upravleniya Sect. of Earth Sciences Section of RANS*, 2011, no. 1 (38), pp. 151–157. (In Russ.)
3. Lambin A.I. Cuttings removal efficiency indicators during directional drilling. *Earth Science and Subsoil Use*, 2022, vol. 45, no. 3, pp. 285–293. (In Russ.)
4. Neskornnykh V.V., Popova M.S., Parakhonko E.V. Development of rock-destroying tool with PDC cutters. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 2, pp. 131–138. (In Russ.)
5. Kharlamov S.N., Dzhanhorkhani M., Zaikovskiy V.V. Transportation of sludge by drilling mud in horizontal wells. Part 1. Modeling the structure of dispersed flows. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 10, pp. 34–48. (In Russ.)
6. Tretyak A.Ya., Nyrkov E.A., Sidorova E.V., Borisov K.A. Results of the application of new designs of drill bits reinforced with PDC comb-shaped cutters. *Sustainable development of mountain territories*, 2019, vol. 11, no. 4 (42), pp. 519–527. (In Russ.) DOI: 10.21177/1998-4502-2019-11-4-519-527.
7. Tretyak A.Ya., Popov V.V., Grossu A.N., Borisov K.A. Innovative approaches to the design of highly effective rock-destroying tools. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2017, no. 8, pp. 225–230. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236-1493-2017-8-0-225-230.
8. Tretyak A.Ya., Savenko O.V., Grossu A.N., Borisov K.A. New two-tier bit of the cutting type. *Oil. Gas. Journal Russia*, 2015, no. 5, pp. 50–53. (In Russ.)
9. Bruyaka V.A., Grinev A.M., Remnev V.V., Snotlout D.V. Modeling of the flow of flushing fluid from the hydraulic monitor holes of PDC bits. (In Russ.) Available at: https://www.crm.ics.org.ru/uploads/crmissues/crm_2013_4/13413.pdf (accessed 10 November 2021).
10. *Great Encyclopedia of Oil and Gas. Hydromonitor effect*. (In Russ.) Available at: <https://www.ngpedia.ru/id624023p4.html> (accessed 10 November 2021).
11. Tretyak A.A., Balaba V.I., Popov V.V., Fomenko N.E., Borisov K.A., Tkachev V.A. New generation drilling bits. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2017, vol. 87, Iss. 5, no. 052029.
12. Tretyak A.Ya., Litkevich Yu.F., Litkeva T.N., Kruglova T.N. Device and technology of continuous well flushing. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 5, pp. 181–188. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2023/5/4142.
13. Babayan E.V., Chernenko A.V. *Engineering calculations in drilling*. Moscow, Infra-Engineering Publ., 2016. 440 p. (In Russ.)
14. Ashrafi S.B., Anemangely M., Sabah M., Ameri M.J. Application of hybrid artificial neural networks for predicting rate of penetration (ROP): a case study from Marun oil field. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 175, pp. 604–623.
15. Beilin F., Dourfaye A., King W. The current state of PDC bit technology. P. 3. *World Oil*, November 2010, vol. 2, pp. 67–71.
16. Bentsen R.G., Wilson D.C. Optimization techniques for weight on and rotary speed. *The J. of Canad. Petr.*, 2000, no. 4.
17. Soares C., Daigle H., Gray K. Evaluation of PDC bit ROP models and the effect of rock strength on model coefficients. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, vol. 34, pp. 1225–1236.
18. Syzrantseva K., Arishin V., Dvoynikov M. Optimization of the damping element of axial vibrations of the drilling string by computer simulation. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2016, vol. 11 (10), pp. 2312–2315.
19. Jiren T., Yiyu L., Zhaolong G., Binwei X., Huijuan S. A new method of combined rock drilling. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2014, vol. 24, Iss. 1, pp. 1–6.
20. Zhao Y., Noorbakhsh A., Koopialipoor M., Azizi A., Tahir M.M. A new methodology for optimization and prediction and prediction of rate of penetration during drilling operations. *Engineering with Computers*, 2019. DOI: 10.1007/s00366-019-00715.

Information about the author

Alexander Ya. Tretyak, Dr. Sc., Professor, Head of the Oil and Gas Techniques and Technologies Department, South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov, 132, Prosvesvcheniya street, Novocherkassk, 346400, Russian Federation. 13050465@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7362-5536>

Received: 25.03.2024

Revised: 08.04.2024

Accepted: 19.04.2024

УДК 550.370, 556
DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4301
Шифр специальности ВАК: 1.6.9

Инженерно-геофизические исследования методом электротомографии при поиске подземных вод в Бодайбинском районе Иркутской области

Т.С. Шойхонова^{1✉}, М.С. Шкиря¹, П.Г. Бирюков¹, А.А. Дунюшин², А.С. Башкеев¹

¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, г. Иркутск

² ООО «ЭКОСТАНДАРТ "Технические Решения"», Россия, г. Санкт-Петербург

✉ tshoikhonova@geo.istu.edu

Аннотация. *Актуальность* исследования заключается в потребности поиска подземных вод технического назначения под строительство водозаборной скважины для водоснабжения вахтового поселка горно-обогатительного комбината «Светловский» в Бодайбинском районе Иркутской области. Электротомография является распространенным методом исследования верхней части разреза и широко применяется при поиске полезных ископаемых, геологическом картировании, инженерных изысканиях, а также гидрологических и экологических исследованиях. Применение метода электротомографии в рамках представленного исследования позволит обосновать места заложения поисковых гидрогеологических скважин. **Цель:** оценка геолого-гидрогеологических условий района работ на перспективу добычи подземных вод технического водоснабжения для нужд вахтового поселка. **Объекты:** коренные породы, характеризующиеся высокими значениями удельного электрического сопротивления и являющиеся водопорами; проницаемые зоны пониженного сопротивления, которые являются водовмещающими породами. **Методы:** наземные геофизические исследования методом электротомографии; двумерная инверсия данных электротомографии и их интерпретация с учетом инженерно-геологических данных бурения и комплекса геофизических исследований скважин. В результате выполненных инженерных гидрогеологических изысканий с использованием наземных геофизических исследований методом электротомографии было установлено, что водоносный комплекс трещиноватых пород имняхской свиты протерозойского комплекса отложений (PR_{2-3im}) представлен трещиноватыми известняками от серых до голубоватых с прослоями мусковитовых сланцев. Анализ результатов исследований показал, что мощность вскрытых отложений составляет до 50 м, уровень подземных вод эксплуатационного горизонта вскрывается на глубинах от 21 до 28 м. Их перекрывает комплекс слабопроницаемых отложений мощностью от 5 до 11 м, представленных переслаиванием плотных известняков серого цвета и черных метапесчаников.

Ключевые слова: электротомография, удельное электрическое сопротивление, инверсия, подземные воды, обводненная зона, геофизические исследования скважин, водоснабжение, водоупор

Для цитирования: Инженерно-геофизические исследования методом электротомографии при поиске подземных вод в Бодайбинском районе Иркутской области / Т.С. Шойхонова, М.С. Шкиря, П.Г. Бирюков, А.А. Дунюшин, А.С. Башкеев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 6. – С. 14–25. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4301

UDC 550.370, 556
DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4301

Engineering geophysical investigations using electrical resistivity tomography for groundwater exploration in the Bodaibo district of the Irkutsk region

T.S. Shoikhonova^{1✉}, M.S. Shkiria¹, P.G. Biryukov¹, A.A. Dunyushin², A.S. Bashkeev¹

¹ Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

² LLC "ECOSTANDART "Engineering solution", Saint Petersburg, Russian Federation

✉ tshoikhonova@geo.istu.edu

Abstract. Relevance. The need in technical groundwater exploration to construct a groundwater well for water supply of the rotation village of the mining and processing plant "Svetlovsky" in the Bodaibo district of the Irkutsk region. The electrical resistivity tomography is a common method for studying the upper part of a cross section and is widely used in mineral prospecting, geological mapping, engineering surveys, hydrological and environmental studies. The application of electrical resistivity tomography in these conditions will allow substantiating the location of hydrogeological wells and boreholes. **Aim.** Assessment of the geological and hydrogeological conditions of the area of work for the prospect of extracting groundwater for technical water supply for the needs of the rotational camp. **Objects.** Bedrocks, which are characterized by high resistance values and are aquicludes; permeable low-resistance zones that are water-bearing rocks. **Methods.** Ground-based geophysical surveys using electrical resistivity tomography; two-dimensional inversion of ERT data and their interpretation taking into account engineering and geological data of drilling and the GIS complex. As a result of the engineering and hydrogeological surveys performed using ground-based geophysical surveys by electrical resistivity tomography, it was established that the aquifer system of fissured rocks of the Imnyakh suite of the Proterozoic sediment complex (PR_{2-3im}) is represented by fissured limestones of various colours from grey to blueish, with bands of mica schist. Analysis of the study results showed that the thickness of the exposed sediments is up to 50 m, the groundwater level of the operating horizon is opened at depths from 21 to 28 m. They are covered with a complex of low-permeability sediments of thickness from 5 to 11 m that are presented by interbedding of dense grey limestones and black metasandstones.

Keywords: electrical resistivity tomography, electrical resistivity, inverse modeling, groundwater, flooded zone, geophysical well logging, water supply, aquiclude

For citation: Shoikhonova T.S., Shkiria M.S., Biryukov P.G., Dunyushin A.A., Bashkeev A.S. Engineering geophysical investigations using electrical resistivity tomography for groundwater exploration in the Bodaibo district of the Irkutsk region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 6, pp. 14–25. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4301

Введение

В статье рассматривается применение наземных геофизических исследований методом электротомографии в составе инженерно-геологических изысканий для поиска подземных вод технического назначения в Бодайбинском районе Иркутской области.

Разведка и эксплуатация подземных вод, жизненно важного и необходимого ресурса, представляет собой непростую задачу в горных породах, которым свойственно неоднородное строение. Из широкого перечня наземных геофизических методов для поиска подземных вод в большинстве случаев используется электроразведка. Двумя основными методами электроразведки на постоянном токе являются вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ) и электрическое профилирование (ЭП). Вышеперечисленные методы имеют некоторые ограничивающие условия применения в исследовании разреза, так как модель, полученная по результатам инверсии данных, имеет достаточно низкую разрешающую способность из-за недостаточного количества регистрируемых точек наблюдения. Благоприятными условиями для применения метода ВЭЗ является горизонтально-слоистая среда, которая на практике встречается достаточно редко при решении поисковых задач в реальных геологических ситуациях [1]. Методы ЭП дают информацию только на определенной глубине исследования.

Использование электротомографии позволяет регистрировать большее количество точек наблюдения за такой же промежуток времени в сравнении с методом ВЭЗ, что сказывается на результате

инверсии – модель удельного электрического сопротивления (УЭС) получается с большей детальностью [2]. Электротомография является универсальным и экономически эффективным методом поиска подземных вод в различных геологических условиях благодаря детальному расчленению разреза по параметру УЭС [3]. Инверсию данных методом электротомографии можно выполнять в рамках двумерных и трехмерных моделей. Это принципиально расширяет круг решаемых электроразведкой задач за счет исследования сред, значительно отличающихся от стандартных горизонтально-слоистых [4].

В традиционных методах электроразведки на постоянном токе обычно используются такие установки, как двухэлектродная, Веннера, Шлюмберже, дипольная и трёхэлектродная [5, 6]. Тип установки во многом зависит от цели работы, объекта исследования, геологии участка и чувствительности установки к вертикальным и латеральным вариациям распределения значений УЭС [7]. Измерения выполняются по профилям, затем зарегистрированные значения разностей потенциалов преобразуют в кривые зондирования или разрезы значений кажущихся сопротивлений, свидетельствующие об изменении сопротивлений в изучаемой среде. По результатам инверсии электроразведочных данных маркируются аномалии пониженного удельного электрического сопротивления, характеризующие наличие подземных вод, и детализируется геологическое строение исследуемой территории [8–10].

Электротомографические измерения выполняются, как правило, в тех случаях, когда требуется

изучение геологических разрезов со сложным строением [11, 12]. Водонасыщенные зоны характеризуются более низким УЭС, чем вмещающие породы, поэтому методы электроразведки, в данном случае электротомография, весьма перспективны для их поиска [13–16]. Работы этим методом проводились для оценки геолого-гидрогеологических особенностей наличия подземных вод технического назначения, а также подтверждения или опровержения наличия таликовой зоны и возможной локализации ее наиболее обводненной части. Задачей работ методом электротомографии являлось расчленение геологического разреза до глубины 100 м по сопротивлению пород, что дало возможность определения интервалов водопритока.

Комплекс поисково-оценочных работ включал в себя проведение геофизических исследований в скважинах (ГИС) и поисковое бурение скважин. Места заложения гидрогеологических скважин определялись исходя из предпосылки наличия или отсутствия таликовой зоны вблизи реки. Помимо рекогносцировочных маршрутных обследований на предмет проявлений выходов подземных вод на поверхность, как уже упоминалось выше, были проведены исследования методом электротомографии. После проведенных комплексов исследований на местности были выбраны точки бурения, наиболее близкие к локализации водовмещающих пород и в то же время к элементам рельефа, не мешающим буровым работам.

На территории, прилегающей к участку изысканий, достаточно активно ведутся открытые горные работы по добыче рудного сырья. При этом интенсивно используются химические реактивы, а рабочие поселки не всегда оборудуются как канализованием, так и водоотведением сточных вод. В связи с этим существует опасность загрязнения поверхностных водотоков как на этапе переработки сырья, так и по факту сброса сточных вод. Данные факторы совместно с ярко выраженной сезонностью водообильности водотоков отрицательно влияют на постоянство химического состава, его соответствие питьевым нормам и в целом могут внести элемент «неожиданности», например, при использовании новых реактивов. В связи с этим подземные воды обеспечивают достаточное постоянство химического состава благодаря их защищенности, а также инфильтрации воды через горные породы, в которых сорбируется часть потенциальных загрязнителей. Такое постоянство, даже в случае несоответствия качества воды питьевым нормативам, позволяет адекватно подобрать комплекс водоподготовки и минимизировать как затраты на нее, так и риски появления превышений по неучтенным показателям после нее.

Геологическое описание

Участок недр в гидрогеологическом отношении находится в границах Вачско-Хомолхинского гидрогеологического района Нечеро-Жуинской гидрогеологической складчатой области (рис. 1). Водоносные комплексы приурочены к таликовым зонам четвертичных и протерозойских отложений, пространственным вдоль поймы р. Жуи, и зонам повышенной трещиноватости протерозойских отложений (PR_{2+3im}), наиболее выраженной непосредственно под нижней границей многолетней мерзлоты, что связано с многократными ее изменениями.

Рифей-вендские осадочные отложения в районе изысканий слагают Маракано-Тунгусскую сложную синклиналь Мамско-Бодайбинского синклинория. В целом разрез отложений характеризуется чередованием в различной степени углеродистых терригенных и карбонатно-терригенных формаций.

По литолого-стратиграфическим особенностям разреза, характеру переслаивания и соотношениям породных компонентов они подразделены на свиты, подсвиты и пачки. Залегания между стратиграфическими подразделениями согласные, переходы – постепенные. На большей части территории первично-осадочные породы, слагающие Маракано-Тунгусскую сложную синклиналь, изменены в условиях низких ступеней серицит-хлоритовой субфации зеленосланцевой фации регионального метаморфизма.

Четвертичные отложения

Рыхлые четвертичные отложения широко распространены в пределах участка изысканий. Они представлены разновозрастным комплексом ледниковых, водно-ледниковых, аллювиальных и склоновых образований.

В целом верхнюю часть четвертичного разреза характеризуют современный галечный, валунно-галечный и песчаный аллювий русловой и пойменной фаций и комплекса надпойменных террас, глыбово-дресвяно-супесчаные элювиальные, делювиальные и солифлюкционные отложения. Ниже залегает мощный комплекс верхнечетвертичных образований патомского оледенения, который определяют водно- и озерно-ледниковые пески, супеси, галечники и илы в верхней части и несортированная глинисто-валунно-галечная морена – в нижней. Погребенный рельеф (глубокий тальвег, комплекс террас) сложен золотоносными аллювиальными галечниками, песками и суглинисто-щебнистым элювием. Общая мощность четвертичных отложений варьирует от 2–5 до 50–75 м.

Средний-верхний рифей

В районе работ среднерифейские отложения представлены бужуихтинской, угаханской, хомолхинской и имняхской свитами.

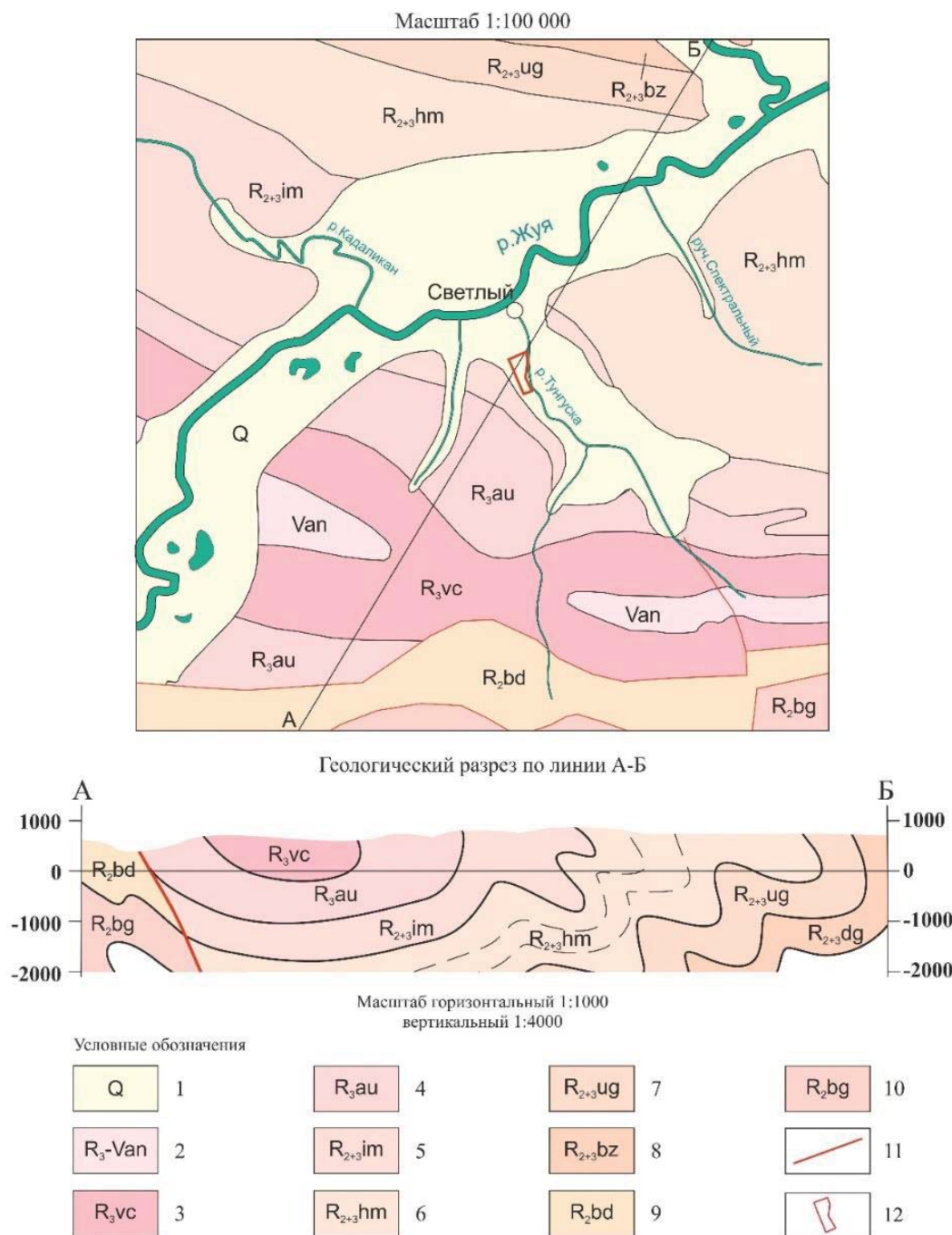


Рис. 1. Геологическое строение участка работ: 1 – Четвертичные отложения; 2 – Онангрская свита. Известковистые песчаники с прослоями сланцев и известняков; 3 – Вачская свита. Высокоуглеродистые кварцевые сланцы, графитистые кварцевые сланцы и метапесчаники; 4 – Аунакитская свита. Метапесчаники, песчаники, углеродистые сланцы, кварциты; 5 – Имняхская свита. Песчаники и метапесчаники, известковистые сланцы, известняки песчаные; 6 – Хомолхинская свита. Сланцы углеродистые, с прослоями песчаников; 7 – Угаханская свита. Переслаивающиеся известковистые сланцы и известняки мраморизированные; 8 – Бужуиктинская свита. Переслаивающиеся углеродистые металевролиты, метапесчаники, с прослоями известняков; 9 – Бодайбокская свита. Известняки; 10 – Бугориктинская свита. Метапесчаники, прослои сланцев; 11 – Тектонические контакты; 12 – Контур участка работ

Fig. 1. Geological structure of the exploration area: 1 – Quaternary deposits; 2 – Onangra suite. Calcareous sandstones with shale and limestone bands; 3 – Vacha suite. High carbon quartz schist, graphitic quartz schist and metasandstones; 4 – Aunakit suite. Metasandstone, sandstones, high carbon schist, quartzites; 5 – Imnyakh suite. Sandstones and metasandstones, calcareous shales, sandy limestones; 6 – Khomolkho suite. Carbonaceous shales with sandstone bands; 7 – Ugakhan suite. Interbedded calcareous shales and marbled limestones; 8 – Buzhuikhta suite. Interbedded carbonaceous metasiltstones, metasandstones with limestone bands; 9 – Bodaibokan suite. Limestones; 10 – Bugarikhta suite. Metasandstones, shale bands; 11 – Tectonic contacts; 12 – Boundaries of the exploration area

Бужуихтинская свита ($R_{2+3} bz$) представлена в северо-восточной части, смята в складки вместе с отложениями угаханской свиты. Сложена темно-серыми и серыми полевошпатокарцевыми, иногда известковистыми песчаниками, серыми и темными кварцево-серицитовыми и углистыми сланцами, присутствуют отдельные прослои углистых известняков. Мощность достигает 500 м.

Угаханская свита ($R_{2+3} uh$) вскрывается в крайней северо-восточной части района. Она сложена серыми и темно-серыми разномерными известняками (70 %) с пакетами мощностью 5–15 м тонкопереслаивающихся темно-серых до черных углеродистых, слюдисто-кварцевых, известковистых и не известковистых алевроитовых сланцев. Мощность подсвиты 320–380 м.

Хомолхинская свита ($R_{2+3} hm$) широко распространена на изученной территории. Она является рудомещающей на золоторудных месторождениях Сухой Лог, Высочайший и характеризуется флишеидным разрезом. Свита расчленена на три подсвиты. В ее составе преобладают алевроитовые и пелитовые сланцы. Особенностью разреза свиты является ритмичное тонкое переслаивание однообразных темных углеродистых пород – кварцевых песчаников, алевроитовых и филлитовидных сланцев, свойственное нижней и верхней подсвитам.

Имняхская свита нерасчлененная ($R_{2+3} im$) занимает центральную часть района работ. В нижней части свиты преобладают пакеты тонкопереслаивающихся серых и зеленовато-серых карбонатных и не карбонатных слюдистых сланцев с прослоями различной мощности карбонатных метапесчаников и слюдистых известняков. В зоне повышенного метаморфизма (изограда биотита) для сланцев характерно появление значительного количества порфиобласт биотита и ильменита, в результате этого они приобретают пятнистый облик. В верхней части увеличивается доля прослоев и слоев светлоокрашенных песчаных, часто слюдистых известняков. Мощность свиты 600–750 м [17, 18].

Методика работ

Геофизические работы методом электротомографии проводились в августе 2022 г. в Бодайбинском районе Иркутской области в 170 км от г. Бодайбо (рис. 2). В условиях ограниченного объема работ было выполнено четыре профиля общей длиной 1210 м. Детальное строение верхней части разреза до глубин 70–100 м было получено по данным электротомографии, выполненной аппаратурой «Скала 64K15E» [19].

Электротомография – это электроразведочный комплекс, включающий в себя как методику полевых работ, так и технологию обработки и интерпретации полевых данных. Данный метод основан

на применении многоэлектродных электроразведочных кос, подключаемых к аппаратуре, способной коммутировать токовые и измерительные электроды на произвольные выводы косы [20]. Ее особенностью является многократное использование в качестве питающих и измерительных одних и тех же фиксированных на профиле электродов. Данная методика приводит к уменьшению общего числа рабочих положений электродов при существенном увеличении плотности измерений по сравнению с обычным методом вертикальных электрических зондирований. Такой подход позволяет, с одной стороны, работать с современной высокопроизводительной аппаратурой, а с другой – применять эффективные алгоритмы моделирования и инверсии [21–23].

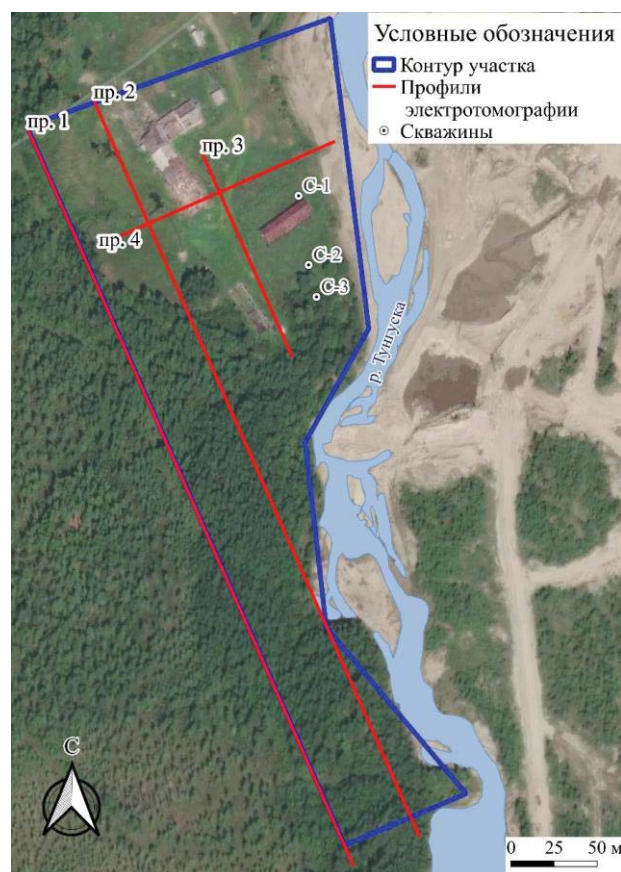


Рис. 2. Схема расположения профилей электротомографии

Fig. 2. Map of electrical resistivity tomography survey lines

Удельное электрическое сопротивление является параметром, который зависит от содержания воды в горной породе, ее пористости, электропроводности воды, типа минералов и температуры воды [24, 25]. Именно это определяет выбор метода электротомографии для поиска и локализации про-

ничаемых зон [26, 27]. Для наиболее распространенных осадочных, изверженных и метаморфических горных пород УЭС зависит от минерального состава, физико-механических и водных свойств горных пород, концентрации солей в подземных водах и в меньшей мере от их химического состава, а также от некоторых других факторов (температуры, глубины залегания, степени метаморфизма и др.) [28].

Метод электротомографии позволяет получить двумерную модель удельного электрического сопротивления верхней части разреза с высоким разрешением, учитывающую сложности геологического строения и топографию [29, 30]. Данный метод является наиболее распространенным и точным среди всех геофизических методов поиска подземных вод из-за большого диапазона значений УЭС, зависящего от условий насыщения горных пород подземными водами [31].

При проведении полевых измерений методом электротомографии использовалась прямая и обратная трехэлектродная установка, которая, так же, как и двухэлектродная, имеет хорошее горизонтальное покрытие и большую глубинность, сочетая это с помехоустойчивостью и высоким уровнем сигнала. При этом трехэлектродная установка, так же как и дипольная, имеет большую чувствительность к горизонтальным неоднородностям в исследуемом разрезе. Помимо прямой и обратной трехэлектродной установки использовалась установка Шлюмберже, которая обладает равной чувствительностью к вертикальным и горизонтальным границам и является компромиссным решением между установками Веннера и дипольной, а также характеризуется большей на 10 % глубинностью, чем у Веннера, и средним горизонтальным покрытием [32]. Расстояние между электродами было принято в 10 м. Выбор расстояния между электродами позволяет регулировать глубинность исследования и влиять на разрешающую способность [33]. Выходное напряжение составляло 200 В. Продолжительность импульса тока – 100 мс, паузы – 20 мс. Отсчеты брались на следующих временах 120, 140, 160 мс.

Результаты и их обсуждение

Инверсия данных выполнялась в программе ZondRes2d, которая предназначена для двумерной инверсии данных электротомографии методом сопротивлений и вызванной поляризации [34]. Задача инверсии заключается в сопоставлении модельных данных с наблюдаемыми для воссоздания геологической модели исследуемой среды. Из-за неполноты и зашумленности наблюдаемых данных решение обратной задачи может иметь множество решений [35].

Качество и достоверность результатов работы алгоритма автоматической двумерной инверсии зависело и от качества полевых данных, и от соответствия изучаемой геологической среды двумерной геоэлектрической модели, и от полноты использования априорной информации [36]. Известно, что при проведении автоматической инверсии данных электротомографии имеет место быть проблема завышения всех глубин. Данная проблема характерна в большей степени для контрастных разрезов, где идет чередование слоев высокого и низкого УЭС. Особенно сильно на увеличение глубинности влияет присутствие изоляторов в разрезе [37]. Модели удельного электрического сопротивления показывают резкий контраст между вмещающей породой и водоудерживающими пластами, особенно вблизи контакта двух разных геологических формаций.

По результатам двумерной инверсии данных, записанных комбинированной трехэлектродной установкой, были построены разрезы по профилям № 3 (рис. 3, а, б) и № 4 (рис. 3, в, г). На рис. 3, г показана проекция скважины № 1, располагающейся в 20 м от профиля № 4.

Геоэлектрический разрез представлен следующими элементами: супесями и суглинками с включением мелкообломочного материала со значениями УЭС 10–300 Ом·м; супесями с включением крупнообломочного материала до валуников со значениями УЭС 600–1500 Ом·м; водоносным слоем, представленным известняками трещиноватыми со значениями УЭС 200–400 Ом·м; плотными доломитами со значениями УЭС 2000–3000 Ом·м. Среднеквадратическое отклонение между наблюдаемыми и модельными данными составило 4 %.

На рис. 4 представлены разрезы по профилю № 4. Использование комбинированной трехэлектродной установки позволяет достичь наибольшей глубинности и разрешающей способности в отдельных геологических ситуациях [38]. Для повышения эффективности полевых наблюдений и уменьшения эквивалентности результатов инверсии наблюдаемых данных необходимо, по возможности, сравнивать полученные данные с данными, записанными другими типами электроразведочных установок. При сопоставлении результатов инверсии данных, зарегистрированных установками Шлюмберже и комбинированной трехэлектродной, установлено, что данные, записанные установкой Шлюмберже, имеют наименьшую глубинность. Кровля доломитов, отмеченная на рис. 4 пунктирной линией, завышена в среднем на 10 м относительно кровли доломитов, выделенной на стратиграфическом разрезе по ГИС.

Итогом интерпретации разрезов по параметру УЭС с учётом геологического строения являлось

выделение потенциальных зон, вероятно, содержащих подземные воды, что позволило определить несколько подходящих участков заложения поисково-разведочных скважин глубиной до 70 м. В них после бурения проведены опытно-фильтрационные работы.

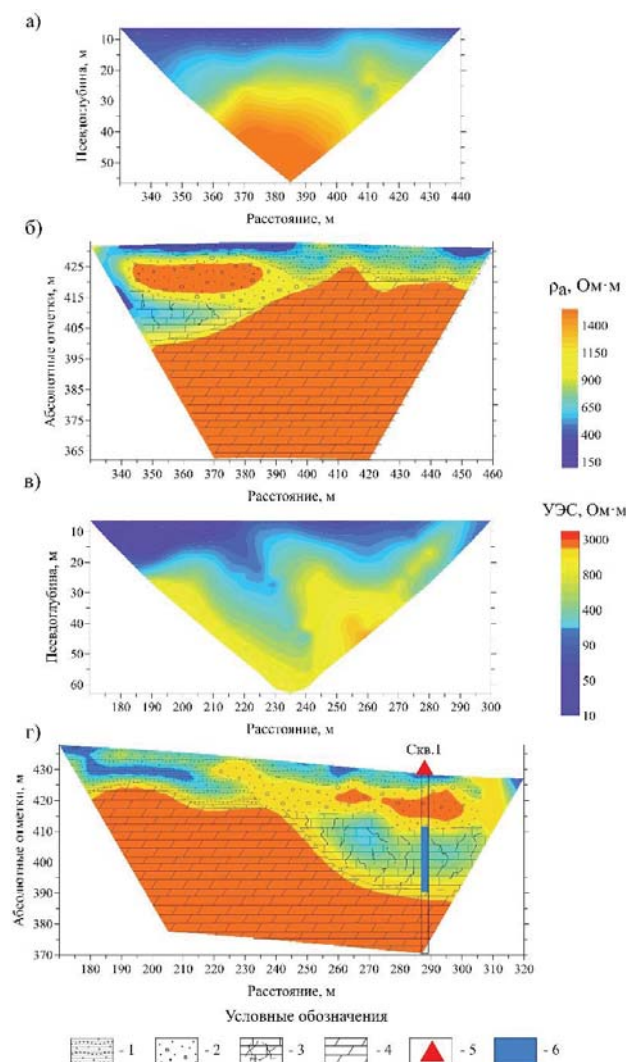


Рис. 3. Разрезы по профилю № 3: а) по параметру кажущегося сопротивления; б) по параметру УЭС; разрезы по профилю № 4: в) по параметру кажущегося сопротивления; г) по параметру УЭС. 1 – мелкообломочные супеси/суглинки; 2 – крупнообломочные супеси/валунники; 3 – известняки трещиноватые; 4 – доломиты плотные; 5 – проекция гидрогеологической скважины; 6 – обводненный слой, выделенный по данным ГИС

Fig. 3. Section of survey line 3: а) observed apparent resistivity data; б) electrical resistivity; section of survey line 4: в) observed apparent resistivity data; г) electrical resistivity. 1 – fine detrital loamy sands/loams; 2 – large detrital loamy sands/boulder gravels; 3 – fissured limestones; 4 – dense dolomites; 5 – hydrogeological well projection; 6 – watered layer selected based on geophysical well logging data

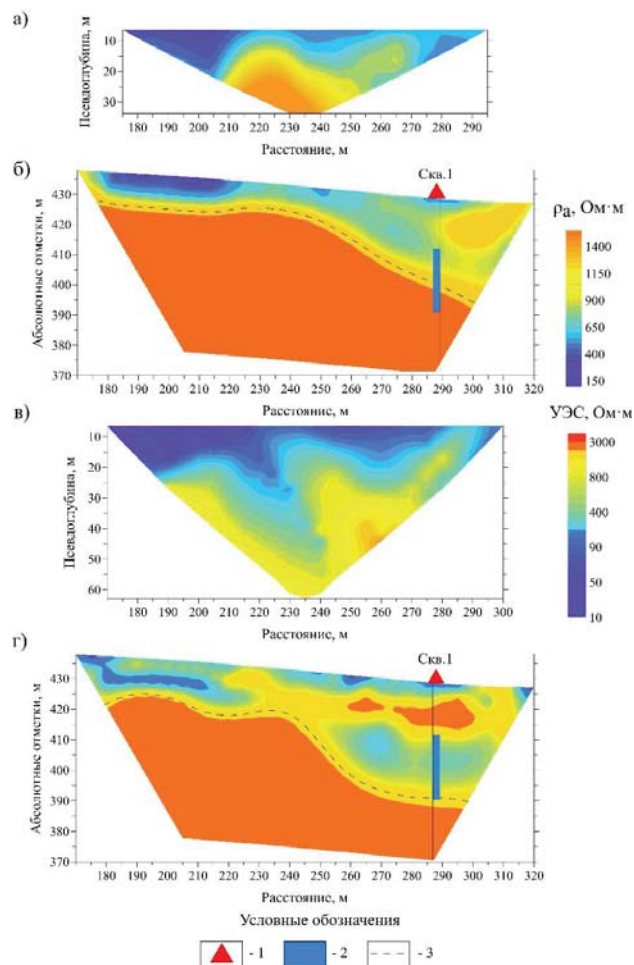


Рис. 4. Разрезы по профилю № 4: а) по параметру кажущегося сопротивления (установка Шлюмберже); б) по параметру УЭС (установка Шлюмберже); в) по параметру кажущегося сопротивления (трехэлектродная установка); г) по параметру УЭС (трехэлектродная установка). 1 – гидрогеологическая скважина; 2 – обводненный слой, выделенный по данным ГИС; 3 – кровля доломитов

Fig. 4. Section of survey line 4: а) observed apparent resistivity data (Schlumberger array); б) electrical resistivity (Schlumberger array); в) observed apparent resistivity data (three-electrode array); г) electrical resistivity (three-electrode array). 1 – hydrogeological well; 2 – watered layer selected based on geophysical well logging data; 3 – dolomite stratum surface (roof)

Таликовые зоны по результатам проведения работ методом электротомографии выявлены не были. Подземные воды сосредоточены в зонах повышенной трещиноватости протерозойских отложений (PR_{2+3im}).

Все три скважины во время бурения вскрыли водоносный горизонт, который в основном находится в карбонатных породах, сложенных трещиноватыми известняками. Поисковые скважины вы-

ставлялись на аномальных зонах, демонстрирующих хорошо выраженный контраст УЭС по отношению к вмещающим породам, а также с учетом элементов рельефа, не мешающих проведению буровых работ. Проектные скважины подтвердили результаты интерпретации разрезов по значению удельного электрического сопротивления.

По результатам бурения гидрогеологической скважины № 1 представлен следующими элементами:

- четвертичные аллювиальные и флювиогляциальные отложения. Верхняя часть разреза – с поверхности до глубины 10 м – представлена супесями и суглинками с редкими включениями мелкообломочного материала. С 12 м вскрываются грунтовые воды, тогда же разрез сменяется на супеси с обильными включениями средне- и крупнообломочных материалов до валунов с глубиной залегания до 17 м;
- слабопроницаемые отложения, представленные переслаиванием плотных известняков серого цвета и черных метапесчаников. Мощность слоя колеблется в пределах от 5 до 11 м;
- водоносный комплекс трещиноватых пород имняхской свиты протерозойского комплекса отложений (PR_{2-3im}), представлен трещиноватыми известняками от серых до голубоватых, с прослоями мусковитовых сланцев. Мощность вскрытых отложений составляет до 50 м, уровень подземных вод эксплуатационного горизонта вскрывается на глубинах от 21 до 28 м и устанавливается на глубине 10–11 м. В верхней части отложения представлены песчанистыми и слюдястыми известняками, плотными, серо-цветными. К концу вскрытого интервала наблюдается потемнение до светло-коричневых, значительное количество примеси биотита, плотные. По результатам проведенных опытно-фильтрационных работ средний коэффициент фильтрации водовмещающих отложений составляет 3,2 м/сут.

Геофизические исследования скважин проводились по всем трем скважинам и представлены комплексом методов: термометрия, метод кажущегося электрического сопротивления (КС) и кавернометрия (рис. 5).

По результатам термометрии температура в районе водопритока на уровне от 17 до 40 м повышалась на 1–1,5 °С, что говорит о стабильной фильтрации воды в зоне водопритока.

По полученным данным КС был выделен следующий литологический состав: песчано-глинистые валунно-галечные отложения со значениями УЭС 100–120 Ом·м; трещиноватые карбонатные отложения зоны водопритока, средние значения УЭС которых составляют 400 Ом·м; плотные карбонатные породы (доломиты) со значениями УЭС от 600 до 1000 Ом·м.

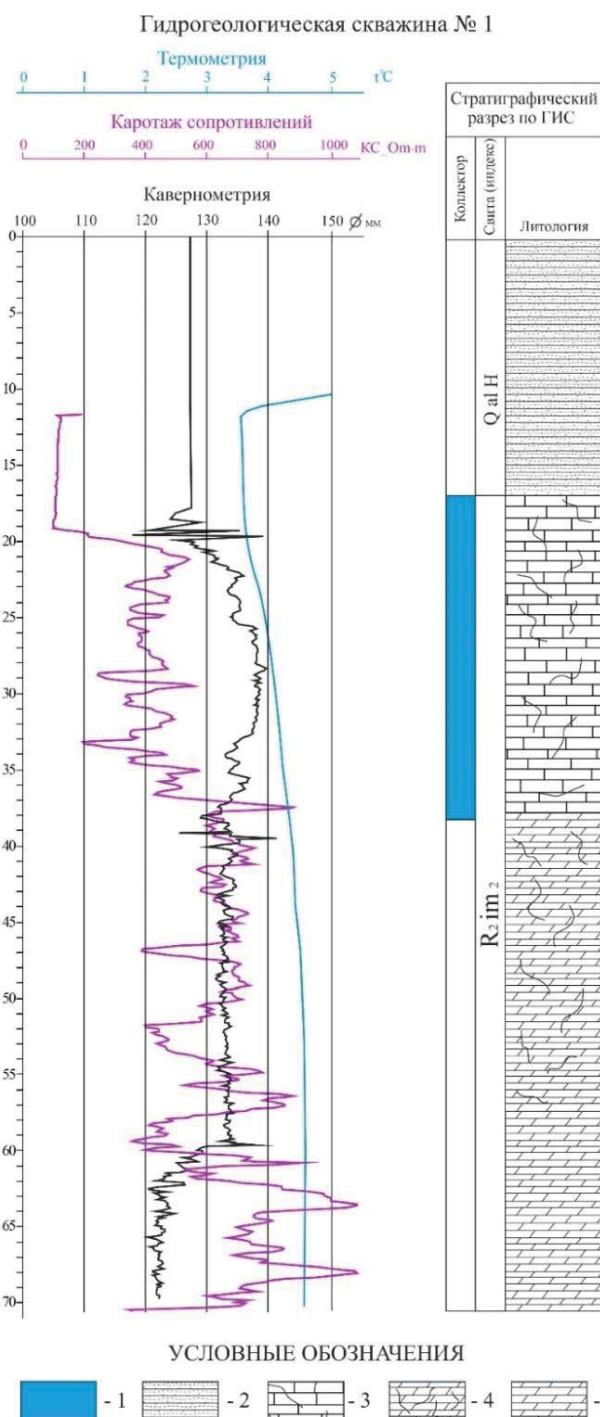


Рис. 5. Сводный планшет по скважине № 1: 1 – обводненный слой; 2 – четвертичные отложения; 3 – известняки трещиноватые; 4 – доломиты трещиноватые; 5 – доломиты плотные

Fig. 5. Summary panel for well No. 1: 1 – wet strata; 2 – quaternary deposits; 3 – fissured limestones; 4 – fissured dolomites; 5 – dense dolomites

По результатам кавернометрии выделен водопроницаемый интервал, представленный разрушенными породами в скважине в интервале от 20 до 38 м.

Отмечается, что искомый обводненный слой уверенно выделяется по данным всех трех проведенных методов ГИС. Исходя из данных по КС для обводненного слоя, средние значения УЭС, равные 400 Ом·м, совпадают с результатами инверсии данных электротомографии, где средние значения УЭС для обводненного слоя составляют 300–400 Ом·м.

Заключение

По результатам выполненных инженерных изысканий методом электротомографии, а также рекогносцировочных маршрутных обследований, был выделен перспективный участок для бурения гидрогеологических скважин. Была определена перспективная на водопроявление зона, характеризующаяся низкими значениями удельного электрического сопротивления. Гидрогеологические разрезы, построенные по данным буровых работ, и данные геофизических исследований скважин были сопоставлены с электроразведочными моделями,

что позволило получить достаточно полное понимание геологического строения участка работ. Проведенные исследования показали, что в комплексе с гидрогеологическими исследованиями метод электротомографии позволяет решить задачу оптимального распределения ограниченных объемов бурения и оценить геолого-гидрогеологические условия выделения интервалов водопритока.

Таким образом, в работе показаны возможности применения метода электротомографии для решения задач поиска подземных вод технического назначения на примере объекта, расположенного в Бодайбинском районе Иркутской области. При работе на подобных объектах метод электротомографии позволяет расчленять различные по составу слои, прослеживать их границы при отсутствии достаточного количества данных бурения, а также выявлять неоднородности в разрезе и обводненные трещиноватые зоны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Electric imaging and laboratory resistivity testing for geotechnical investigation of Pusan clay deposits / P.H. Giao, S.G. Chung, D.Y. Kim, H. Tanaka // *Journal of Applied Geophysics*. – 2003. – Vol. 52. – P. 157–175.
2. Bhattacharya P.K., Patra H.P. Direct current geoelectric sounding: principles and interpretation. – Amsterdam: Elsevier Publishing Company, 1968. – Vol. 9. – 135 p.
3. Kumar D., Rao V.A., Sarma V.S. Hydrogeological and geophysical study for deeper groundwater resource in quartzitic hard rock ridge region from 2D resistivity data // *Journal of Earth System Science*. – 2014. – Vol. 123. – P. 34–40.
4. Новые подходы к электрическим зондированиям горизонтально-неоднородных сред / А.А. Бобачев, М.Н. Марченко, И.Н. Модин, Е.В. Перваго, А.В. Урусова, В.А. Шевнин // *Физика Земли*. – 1995. – № 12. – С. 79–90.
5. Applied geophysics / W.M., Telford L.P. Geldart, R.A. Sheriff, D.A. Keys. – London: Cambridge University Press, 1976. – 860 p.
6. Groundwater exploration in limestone–shale–quartzite terrain through 2D electrical resistivity tomography in Tadipatri, Anantapur district, Andhra Pradesh / D. Kumar, K. Rajesh, S. Mondal, T. Warsi, R. Rangarajan // *Journal of Earth System Science*. – 2020. – Vol. 129. – № 71. – P. 1–5.
7. 15 лет развития электротомографии в России / И.Н. Модин, А.А. Бобачев, Д.К. Большаков, В.А. Шевнин, М.Н. Марченко, К.Д. Ефремов // *Инженерная и рудная геофизика 2020: Материалы 16-ой научно-практической конференции совместно с семинаром «Инженерная и рудная геология 2020»*. – М.: Общество с ограниченной ответственностью «ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ», 2020. – Т. 2020. – С. 1–16.
8. Zhou B. Electrical resistivity tomography: a subsurface-imaging technique // *Applied geophysics with case studies on environmental, exploration and engineering geophysics* / Ed. by A.I. Kanly. – London, United Kingdom: InTechOpen, 2019. – P. 123–137. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/64562> (дата обращения 07.06.2023).
9. Применение наземных геофизических исследований методом электротомографии в составе инженерно-геологических изысканий подтапливаемой территории одного из жилых районов г. Иркутска / М.С. Шкиря, Ю.К. Ланкин, С.А. Терешкин, А.В. Лазурченко, Ю.А. Давыденко // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 11. – С. 160–170.
10. Роль электротомографии и электромагнитных зондирований в поисково-оценочных работах для водоснабжения Озерного ГОКа / М.С. Шкиря, П.С. Бадминов, С.А. Терешкин, А.С. Башкеев, Ю.А. Давыденко // *Разведка и охрана недр*. – 2021. – № 12. – С. 26–34.
11. Построение объемной модели верхней части геологической среды по данным электротомографии для решения инженерно-геологических задач / И.Н. Модин, Д.К. Большаков, С.В. Бомкин, А.Д. Скобелев, К.И. Баранчук, К.Д. Ефремов, А.А. Пелевин, А.С. Репьев // *Геомодель 2015: Материалы 17-ой научно-практической конференции по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа*. – Геленджик: Европейская ассоциация геологов и инженеров, 2015. – Т. 2015. – С. 25–30.
12. Dahlin T. On the automatization of 2D resistivity surveying for engineering and environmental applications. – Lund: Lund University, 1993. – 187 p.
13. Hydrogeophysical tools for investigating groundwater storage in the subsurface of a karst system / A. Watlet, K. van Noten, T. Lecocq, J. Chambers, P. Meldrum, O. Francis, M. van Camp, O. Kaufmann // *Near Surface Geoscience: 20th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. – Athens: European Association of Geoscientists & Engineers, 2014. – Vol. 2014. – P. 1–5.
14. Patella D. Geophysical tomography in engineering geology: an overview // *7th International Congress of the Brazilian Geophysical Society*. – Salvador: European Association of Geoscientists & Engineers, 2001. – P. 1–5.
15. Jones G., Sentenac P., Zielinski M. Fissure detection in flood embankments using electrical resistivity tomography // *Near Surface Geoscience 2012: 18th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. – Paris: European Association of Geoscientists & Engineers, 2012. – P. 124–130.

16. Visualising groundwater flow using time-lapse electrical resistivity tomography / M. Karaoulis, W. Bakx, P. Doornenba, P. Kruiver, S. Rijpkema // 25th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. – The Hague: European Association of Geoscientists & Engineers, 2019. – Vol. 2019. – P. 1–5.
17. Иванов А.И. Отчет о результатах работ по объекту: «Поисково-оценочные работы на рудное золото на Светловском рудном поле (Иркутская область)». – Иркутск, 2009. – Т. 1. – 119 с.
18. Царегородцева М.И., Игнатъева О.П., Карасева Е.Ф. Отчет с подсчетом запасов россыпного золота по правобережной террасе р. Жуя, между устьями руч. Бол. Тунгуска и руч. Спектральный, для открытого раздельного способа разработки по результатам геологоразведочных работ 2011 г. по состоянию на 20.12.2012 г. – Бодайбо, 2012. – 132 с.
19. Скала64K15 // Официальный сайт Конструкторского Бюро Электротометрии. – 2023. URL: <https://kbelectrometry.ru/catalog/skala-64k15/> (дата обращения 05.06.2023).
20. Стойкин Т.А., Балков Е.В., Манштейн Ю.А. Опыт применения электротомографии для решения инженерно-геологических задач // Инженерная и рудная геофизика 2011: Материалы 7-ой научно-практической конференции и выставки. – М.: European Association of Geoscientists & Engineers, 2011. – С. 42–50.
21. Многоэлектродные электрические зондирования в условиях горизонтально-неоднородных сред / А.А. Бобачев, И.Н. Модин, Е.В. Перваго, В.А. Шевнин // Разведочная геофизика. Обзор. – М.: АОЗТ «Геоинформмарк», 1996. – Вып. 2. – 50 с.
22. Бортникова С.П., Ельцов И.Н., Борисенко Д.А. Возможности малоглубинной электротомографии при решении инженерно-геологических задач // Инженерная геофизика 2013: Материалы 9-ой международной конференции и выставки. – Геленджик: EAGE Publications BV, 2013. – P. 36–41.
23. Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации / А.А. Бобачев, А.А. Горбунов, И.Н. Модин, В.А. Шевнин // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2006. – № 2. – С. 14–17.
24. Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E. Applied Geophysics (2nd ed.). – New-York: Cambridge University Press, 1990. – 751 p.
25. Rein A., Hoffman R., Dietrich P. Influence of natural time-dependent variations of electrical conductivity on DC resistivity measurements // Journal of Hydrology. – 2004. – Vol. 285. – P. 215–232.
26. Санчаа А.М., Фаре А.Н., Шемелина О.В. Применение метода электротомографии для поиска водоносных горизонтов в геологических условиях восточной части Новосибирской области // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – № 10. – С. 90–105.
27. Fadilah T., Gross L., Schaa R. Estimation of aquifer properties using surface based electrical resistivity tomography // EAGE-HAGI 1st Asia Pacific Meeting on Near Surface Geoscience and Engineering. – Yogyakarta: European Association of Geoscientists & Engineers, 2018. – Vol. 2018. – P. 1–5.
28. Хмелевской В.К. Геофизические методы исследования земной коры. Кн. 2.: региональная, разведочная, инженерная и экологическая геофизика. – Дубна: Международный университет природы, общества и человека «Дубна», 1999. – 184 с.
29. Loke M.H. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies // A practical guide to 2D and 3D surveys. – 1999. – Vol. 2. – 70 p.
30. Kumar D., Mondal S., Warsi T. Deep insight to the complex aquifer and its characteristics from high resolution electrical resistivity tomography and borehole studies for groundwater exploration and development // Journal of Earth System Science. – 2020. – Vol. 129. – P. 1–15.
31. Kumari A., Kumar D., Warwade P. Application of multi-criteria decision making (MCDM) and electrical resistivity tomography (ERT) techniques for identification of groundwater recharge zone(s) in granitic hard rock aquifer // Journal of Earth System Science. – 2021. – Vol. 130. – № 81. – P. 1–17.
32. Бобачев А.А., Модин И.Н. Электротомография со стандартными электроразведочными комплексами // Разведка и охрана недр. – 2008. – № 1. – С. 43–47.
33. Ostrowski S., Lasocki M., Pacanowski G. Electrical resistivity tomography as a tool in geological mapping // 72nd EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC. – Barcelona: European Association of Geoscientists & Engineers, 2010. – P. 1–5.
34. Программа ZondRes2d // Zond Software. – 2023. URL: <http://zond-geo.com/software/resistivity-imaging-ves/zondres2d/> (дата обращения 06.06.2023).
35. Riwayat A.I., Nazri M.A.A., Abidin M.H.Z. Application of electrical resistivity method (ERM) in groundwater exploration // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2018. – Vol. 995. – № 1. – P. 012094.
36. Опыт применения электротомографии в геофизике / Е.В. Балков, Г.Л. Панин, Ю.А. Манштейн, А.К. Манштейн, В.А. Белобородов // Геофизика. – 2012. – № 6. – С. 54–63.
37. Результаты электроразведочных работ методом электротомографии на правобережье р. Волга / В.А. Поликарпова, В.А. Куликов, А.А. Бобачев, А.Г. Яковлев // Инженерная и рудная геофизика 2021: Материалы 17-й научно-практической конференции и выставки. – М.: Общество с ограниченной ответственностью «ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ», 2021. – С. 1–6.
38. Dahlin T. The development of electrical imaging techniques // Computers and Geosciences. – 2001. – № 27 (9). – P. 1019–1029.

Информация об авторах

Туяна Сергеевна Шойхонова, инженер-исследователь департамента геофизики Сибирской Школы Геонаук Иркутского национального исследовательского технического университета, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83. tshoikhonova@geo.istu.edu; <https://orcid.org/0009-0007-1641-6085>

Михаил Сергеевич Шкиря, младший научный сотрудник департамента геофизики Сибирской Школы Геонаук Иркутского национального исследовательского технического университета, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83. mshkiria@geo.istu.edu; <https://orcid.org/0000-0003-1570-0002>

Павел Геннадьевич Бирюков, инженер-исследователь департамента геофизики Сибирской Школы Геонаук Иркутского национального исследовательского технического университета, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83. pbiriukov@geo.istu.edu; <https://orcid.org/0009-0006-0991-2972>

Алексей Алексеевич Дунюшин, инженер-гидрогеолог 1 категории ООО «ЭКОСТАНДАРТ "Технические Решения"», Россия, 191186, г. Санкт-Петербург, наб. реки Мойки, 37. Dunyushin.A@ecostandard.ru, <https://orcid.org/0009-0002-7142-2158>

Аюр Саянович Башкеев, младший научный сотрудник департамента геофизики Сибирской Школы Геонаук Иркутского национального исследовательского технического университета, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83. abashkeev@geo.istu.edu, <https://orcid.org/0000-0002-5456-5221>

Поступила в редакцию: 22.06.2023

Поступила после рецензирования: 22.09.2023

Принята к публикации: 19.04.2024

REFERENCES

1. Giao P.H., Chung S.G., Kim D.Y., Tanaka H. Electric imaging and laboratory resistivity testing for geotechnical investigation of Pusan clay deposits. *Journal of Applied Geophysics*, 2003, vol. 52, pp. 157–175.
2. Bhattacharya P.K., Patra H.P. *Direct current geoelectric sounding: principles and interpretation*. Amsterdam, Elsevier Publ. Company, 1968. Vol. 9, 135 p.
3. Kumar D., Rao V.A., Sarma V.S. Hydrogeological and geophysical study for deeper groundwater resource in quartzitic hard rock ridge region from 2D resistivity data. *Journal of Earth System Science*, 2014, vol. 123, pp. 34–40.
4. Bobachev A.A., Marchenko M.N., Modin I.N., Pervago E.V., Urusova A.V., Shevnin V.A. New approaches to electric sounding of laterally inhomogeneous media. *Physics of the Earth*, 1995, no. 12, pp. 79–90. (In Russ.)
5. Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.A., Keys D.A. *Applied geophysics*. London, Cambridge University Press, 1976. 860 p.
6. Kumar D., Rajesh K., Mondal S., Warsi T., Rangarajan R. Groundwater exploration in limestone–shale–quartzite terrain through 2D electrical resistivity tomography in Tadipatri, Anantapur district, Andhra Pradesh. *Journal of Earth System Science*, 2020, vol. 129, no. 71, pp. 1–5.
7. Modin I.N., Bobachev A.A., Bolshakov D.K., Shevnin V.A., Marchenko M.N., Efremov K.D. 15 years of development of electrical resistivity tomography in Russia. *Engineering and ore geophysics 2020. Proc. of the 16th scientific and practical conference together with the seminar "Engineering and ore geology 2020"*. Moscow, Limited Liability Company "EAGE GEOMODEL", 2020. Vol. 2020, pp. 1–16. (In Russ.)
8. Zhou B. Electrical resistivity tomography: a subsurface-imaging technique. *Applied geophysics with case studies on environmental, exploration and engineering geophysics*. Ed. A.I. Kanli. London, United Kingdom, InTechOpen, 2019. pp. 123–137. Available at: <https://www.intechopen.com/chapters/64562> (accessed 07 June 2023).
9. Shkirya M.S., Lankin Yu.K., Tereshkin S.A., Lazurchenko A.V., Davydenko Yu.A. Applying ground geophysical prospecting using the method of electrical resistivity tomography as part of engineering and geological surveys of a flooded area in one of the residential areas of Irkutsk. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 11, pp. 160–170. (In Russ.)
10. Shkirya M.S., Badminov P.S., Tereshkin S.A., Bashkeev A.S., Davydenko Yu.A. The role of electrical resistivity tomography and electromagnetic sounding in search and assessment works for the water supply of Ozerny GOK. *Prospect and protection of mineral resources*, 2021, № 12, pp. 26–34. (In Russ.)
11. Modin I.N., Bolshakov D.K., Bomkin S.V., Skobelev A.D., Baranchuk K.I., Efremov K.D., Pelevin A.A., Repiev A.S. Construction of three-dimensional model top of the geological environment according electrical resistivity tomography for geotechnical problems. *Geomodel 2015. Proc. of the 17th science and applied research conference on oil and gas geological exploration and development*. Gelendzhik, European Association of Geologists and Engineers, 2015. Vol. 2015, pp. 25–30. (In Russ.)
12. Dahlin T. 2D resistivity surveying for environmental and engineering applications. *First Break*, 1996, no. 14, pp. 275–283.
13. Watlet A., Van Noten K., Lecocq T., Chambers J., Meldrum P., Francis O., Van Camp M., Kaufmann O. Hydrogeophysical tools for investigating groundwater storage in the subsurface of a karst system. *Near Surface Geoscience: 20th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. Athens, European Association of Geoscientists & Engineers, 2014. Vol. 2014, pp. 1–5.
14. Patella D. Geophysical tomography in engineering geology: an overview. *7th International Congress of the Brazilian Geophysical Society*. Salvador, European Association of Geoscientists & Engineers, 2001. pp. 1–5.
15. Jones G., Sentenac P., Zielinski M. Fissure detection in flood embankments using electrical resistivity tomography. *Near Surface Geoscience 2012: 18th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. Paris, European Association of Geoscientists & Engineers, 2012. pp. 124–130.
16. Karaoulis M., Bakx W., Doornenba P., Kruiver P., Rijpkema S. Visualising groundwater flow using time-lapse electrical resistivity tomography. *25th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. The Hague, European Association of Geoscientists & Engineers, 2019. Vol. 2019, pp. 1–5.
17. Ivanov A.I., Ageev Y.L., Pusenkov V.A., Kulikov E.G., Kalinina D.I., Klimansky A.V., Sinitskaya E.G., Kopyeva V.N., Kukhtina E.V. *Report on the results of work on the object "Search and evaluation work for ore gold on the Svetlovskoe ore field (Irkutsk region)"*. Irkutsk, 2009. Vol. 1, 119 p. (In Russ.)
18. Tsaregorodtseva M.I., Ignatyeva O.P., Karaseva E.F., Leskova L.I., Khalyavin V.S., Turanova A.V. *Report with calculation of placer gold reserves on the right bank terrace of the river Zhuya, between the mouths of the brook. Bol. Tunguska and the brook. Spectral, for an open separate method of development based on the results of geological exploration in 2011 as of 20.12.2012*. Bodaibo, 2012. 132 p. (In Russ.)

19. Scala 64K15E. *Official website Kbelectrometry*. (In Russ.) Available at: <https://kbelectrometry.ru/catalog/skala-64k15/> (accessed 5 June 2023).
20. Stoikin T.A., Balkov E.V., Manstein Yu.A. Experience in using electrical resistivity tomography for solving engineering-geological problems. *Proc. of the 7th EAGE International Scientific and Practical Conference and Exhibition on Engineering and Mining Geophysics*. Moscow, European Association of Geoscientists & Engineers Publ., 2011. pp. 42–50. (In Russ.)
21. Bobachev A.A., Modin I.N., Pervago E.V., Shevnin V.A. Multielectrode electric sounding in conditions of horizontally inhomogeneous media. *Exploration Geophysics. Review*. Moscow, CJSC «Geoinformmark», 1996. Iss. 2, 50 p. (In Russ.)
22. Bortnikova S.P., Eltsov I.N., Borisenko D.A. Possibilities of shallow electrical resistivity tomography in solving engineering-geological problems. *Engineering geophysics 2013. Proc. of the 9th International conference and exhibition*. Gelendzhik, EAGE Publications BV, 2013. pp. 36–41. (In Russ.)
23. Bobachev A.A., Gorbunov A.A., Modin I.N., Shevnin V.A. ERT as the method of resistivity and induced polarization. *Instruments and systems of exploration Geophysics*, 2006, no. 2, pp. 14–17. (In Russ.)
24. Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E. *Applied geophysics* (2nd ed.). New-York, Cambridge University Press, 1990. 751 p.
25. Rein A., Hoffman R., Dietrich P. Influence of natural time-dependent variations of electrical conductivity on DC resistivity measurements. *Journal of Hydrology*, 2004, vol. 285, pp. 215–232.
26. Sanchaa A.M., Fage A.N., Shemelina O.V. Application of electrical tomography to detecting aquifers in geological conditions of the eastern Novosibirsk Region. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2019, no. 10, pp. 90–105. (In Russ.)
27. Fadilah T., Gross L., Schaa R. Estimation of aquifer properties using surface based electrical resistivity tomography. *EAGE-HAGI 1st Asia Pacific Meeting on Near Surface Geoscience and Engineering*. Yogyakarta, European Association of Geoscientists & Engineers, 2018. Vol. 2018, pp. 1–5.
28. Khmelevsky V.K. *Geophysical methods for studying the earth's crust. B. 2: regional, exploration, engineering and environmental geophysics*. Dubna, International University of Nature, Society and Man "Dubna", 1999. 184 p. (In Russ.)
29. Loke M.H. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. *A practical guide to 2D and 3D surveys*, 1999, vol. 2, 70 p.
30. Kumar D., Mondal S., Warsi T. Deep insight into the complex aquifer and its characteristics from high-resolution electrical resistivity tomography and borehole studies for groundwater exploration and development. *Journal of Earth System Science*, 2020, vol. 129, pp. 1–15.
31. Kumari A., Kumar D., Warwade P. Application of multi-criteria decision making (MCDM) and electrical resistivity tomography (ERT) techniques for identification of groundwater recharge zone(s) in granitic hard rock aquifer. *Journal of Earth System Science*, 2021, vol. 130, no. 81, pp. 1–17.
32. Bobachev A.A., Modin I.N. Electrical resistivity tomography with standard electrical prospecting complexes. *Prospect and protection of mineral resources*, 2008, no. 1, pp. 43–47. (In Russ.)
33. Ostrowski S., Lasocki M., Pacanowski G. Electrical resistivity tomography as a tool in geological mapping. *72nd EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC*. Barcelona, European Association of Geoscientists & Engineers, 2010. pp. 1–5.
34. Program ZondRes2D. *Official website Zond Software*. (In Russ.) Available at: <http://zond-geo.com/software/resistivity-imaging-ves/zondres2d/> (accessed 5 June 2023).
35. Riwayat A.I., Nazri M.A.A., Abidin M.H.Z. Application of electrical resistivity method (ERM) in groundwater exploration. *Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing*, 2018, vol. 995, no. 1, pp. 012094.
36. Balkov E.V., Panin G.L., Manstein Yu.A., Manstein A.K., Beloborodov V.A. Experience in the use of electrical resistivity tomography in geophysics. *Geophysics*, 2012, no. 6, pp. 54–63. (In Russ.)
37. Polikarpova V.A., Kulikov V.A., Bobachev A.A., Yakovlev A.G. The results of electrical exploration by the method of electrical tomography on the right bank of the river Volga. *Engineering and Mining Geophysics 2021: Proc. of the 17th scientific-practical conference and exhibition*. Moscow, Limited Liability Company "EAGE GEOMODEL", 2021. Vol. 2021, pp. 1–6. (In Russ.)
38. Dahlin T. The development of electrical imaging techniques. *Computers and Geosciences*, 2001, no. 27 (9), pp. 1019–1029.

Information about the authors

Tuyana S. Shoikhonova, Research Engineer, Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russian Federation. tshoikhonova@geo.istu.edu, <https://orcid.org/0009-0007-1641-6085>

Mikhail S. Shkiria, Junior Researcher, Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russian Federation. mshkiria@geo.istu.edu, <https://orcid.org/0000-0003-1570-0002>

Pavel G. Biryukov, Research Engineer, Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russian Federation. pbiriukov@geo.istu.edu, <https://orcid.org/0009-0006-0991-2972>

Alexey A. Dunyushin, Hydrogeologist of the 1st category, LLC "ECOSTANDART "Engineering solution", 37, Moika river embankment, Saint Petersburg, 191186, Russian Federation. Dunyushin.A@ecostandard.ru, <https://orcid.org/0009-0002-7142-2158>

Ayur S. Bashkeev, Junior Researcher, Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russian Federation. abashkeev@geo.istu.edu, <https://orcid.org/0000-0002-5456-5221>

Received: 22.06.2023

Revised: 22.09.2023

Accepted: 19.04.2024

УДК 621.644.8
DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4325
Шифр специальности ВАК: 2.8.5

Методика определения местоположения утечек и несанкционированных врезок на нефтепроводах

А.А. Дульченко^{1✉}, Р.А. Шестаков¹, Ю.С. Матвеева²

¹ Российский государственный университет нефти и газа
(национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, Россия, г. Москва

² Университет дистанционного обучения в Хагене, Германия, г. Хаген

✉ dulchenko.anna@yandex.ru

Аннотация. Актуальность. Трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов является одним из наиболее эффективных и экономически выгодных видов транспорта в современном мире. Несмотря на это, данный вид транспорта может быть экологически опасен в случае возникновения утечек, вызванных, например, коррозией, нарушением правил эксплуатации, несанкционированными врезками. Неоперативные локализация и ликвидация утечек и несанкционированных отборов зачастую являются не только причиной значительных финансовых потерь, но и аварий и загрязнения местности разной степени тяжести и масштаба. В наши дни вопрос определения произошедшей утечки и ее местоположения за минимальное время остается открытым. В связи с этим разработка новых и совершенствование существующих методов обнаружения утечек и врезок в трубопроводы является актуальной задачей в наши дни. **Цель:** исследование влияния сдвига полного напора, происходящего при учете изменения мощности насосных агрегатов вследствие утечки продукта, на точность локализации утечки или несанкционированной врезки, а также усовершенствование существующих методов определения координаты утечки при помощи учета изменения напора, развиваемого нефтеперекачивающей станцией. **Методы:** моделирование возникновения утечки или несанкционированной врезки с различным процентом потерь продукта, построение линий гидравлического уклона с утечками различной интенсивности в различных координатах, сравнительный анализ результатов, полученных при рассмотрении существующих методик и методики, предложенной авторами. **Результаты.** Смоделированы утечки в различных координатах, и определена возможность работы предложенного метода поиска координаты утечек, также рассчитаны погрешности при определении места утечки или врезки, зависящие от перепадов мощности насосов при истечении продукта из нефтепровода. Предложена формула локализации утечек или врезок, учитывающая изменение мощности насосных агрегатов и, как следствие, полного напора.

Ключевые слова: нефть, трубопровод, нефтепровод, утечка, локализация, несанкционированная врезка, численное моделирование, определение координаты, потери при транспортировке

Для цитирования: Дульченко А.А., Шестаков Р.А., Матвеева Ю.С. Методика определения местоположения утечек и несанкционированных врезок на нефтепроводах // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 6. – С. 26–36. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4325

UDC 621.644.8
DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4325

Methodology for location of leakages and unauthorized tie-ins on oil pipelines

A.A. Dulchenko^{1✉}, R.A. Shestakov¹, Yu.S. Matveeva²

¹ National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russian Federation

² FernUniversität in Hagen, Hagen, Germany

✉ dulchenko.anna@yandex.ru

Abstract. Relevance. Pipeline transportation of oil and oil products is one of the most efficient and cost-effective modes of transport in the modern world. Despite this, this type of transport can also be environmentally hazardous in case of leakages caused, for example, by corrosion, violation of operating rules, unauthorized tie-ins. Non-operational localization and liquidation of leakages and unauthorized tie-ins is often not only the cause of significant financial losses, but also accidents and pollution of the area of varying severity and scale. Nowadays, the issue of determining the leakage that has occurred and its location in the shortest possible time remains open. In this regard, the development of new and improvement of existing methods for detecting leakages and tie-ins in pipelines is an urgent task today. **Aim.** To study the effect of the total head shift, which occurs when taking into account the change in the power of pumping units due to product leakage, on the accuracy of determining the localization of leakage or unauthorized tie-in; to improve the existing methods for determining the leakage coordinate taking into account the change in the total head developed by the oil pumping station. **Methods.** Modeling the occurrence of a leakage or unauthorized tie-in with a different percentage of product losses, constructing hydraulic slope lines with leakages of varying intensity in different coordinates, a comparative analysis of the results obtained from the considered existing methods and those proposed by the authors. **Results.** The authors have modeled the leakages in various coordinates and determined the possibility of the proposed method operation for finding the coordinates of leakages. They calculated as well the errors in determining the location of the tie-in or leakage, depending on the pump power drops when the product flows out of the oil pipeline. The paper introduces the formula for the localization of leakages or tie-ins, considering the change in the power of pumping units and, as a result, the total head.

Keywords: oil, pipeline, oil pipeline, leakage, localization, unauthorized tie-in, numerical modeling, coordinate determination, transportation losses

For citation: Shestakov R.A., Dulchenko A.A., Matveeva Yu.S. Methodology for location of leakages and unauthorized tie-ins on oil pipelines. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 6, pp. 26–36. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4325

Введение

При множестве известных способов локализации утечек и несанкционированных врезок (УНВ) найти их оперативно и точно не всегда удастся, несмотря на автоматизацию работ и модернизацию методов и устройств поиска УНВ [1–3]. Определение факта их наличия также затруднительно и зачастую зависит от квалификации врезки и процента отбора. Несмотря на существование формул определения координаты УНВ [4–6], в реальных ситуациях они дают существенную погрешность: начиная с сотен метров, заканчивая десятками километров [7, 8].

Одной из причин может служить отсутствие учета так называемого «сдвига» полного напора в начальной координате – на нефтеперекачивающей станции (НПС) [9, 10]. При откачке продукта из нефтепровода происходит изменение мощности всей НПС из-за изменения расхода продукта на участке трубопровода, и по этой же причине меняется полный напор транспортируемого продукта на выходе из НПС. Таким образом, происходит увеличение перепада напоров, связанного с УНВ, а полный напор НПС уменьшается [11–14].

В [15] рассматривается возможность локализации УНВ при учете перепада мощностей на насосной станции. При известных, снятых параметрах давления и мощности происходит пересчет расходного коэффициента и дальнейшее сравнение с требуемым значением расхода [16, 17]. Далее определяется время, за которое продукт проходит от одной НПС до последующей. В случае неравенства расходов подается сигнал на датчики измерения времени для их остановки. По зафиксированному времени происходит расчет координаты УНВ.

Рассмотрим, влияет ли данное уменьшение полного напора, связанное с откачкой продукта, на точность определения места врезки. При известных параметрах в начале и конце участка построим линии гидравлического уклона. Известно, что при наличии утечки или несанкционированной врезки происходит искажение линии, в самой координате УНВ наблюдается максимальный перепад напоров между «эталонном» без врезки и искаженной линией гидравлического уклона. Возникает предположение, что, если провести согласно начальным и конечным данным две линии гидравлического уклона, точка их пересечения будет соответствовать координате местоположения УНВ.

Материалы и методы исследования Метод гидравлической локации УНВ

Приведем методику расчета, принимая известными значениями в ней значения расходов [18–21] и давлений в начальной и конечной координатах участка с учетом изменения расхода и давления из-за совершенного несанкционированного отбора или возникшей утечки [22–24]. В таком случае рассчитаем полные напоры в начальной и конечной координатах, учитывая и не учитывая влияние изменения развиваемого насосными агрегатами напора из-за изменения подачи транспортируемой жидкости.

Расчет полного напора в начальной координате производим, используя формулу (1) [25]:

$$H_n = H_{\text{диф}} + z + \frac{v^2}{2g} + h_n, \quad (1)$$

где $H_{\text{диф}}$ – напор, развиваемый работающими насосами, м; z – высотная отметка, м; v – скорость потока, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; $h_{\text{п}}$ – подпор, м.

Зная, что на насосной станции работают три насосных агрегата, определим напор, развиваемый насосами, по формуле (2) [26]:

$$H_{\text{диф}} = n(a - bQ^2), \quad (2)$$

где a – коэффициент аппроксимации, м; b – коэффициент аппроксимации, м/(м³/ч)²; n – количество работающих насосов; Q – объемный расход нефти, м³/ч.

Определение коэффициентов a и b осуществляется согласно методике, описанной в [26]. В работе коэффициенты a и b принимают значение 285 м и $0,644 \cdot 10^{-5}$ м/(м³/ч)².

Расчет полного напора в конечной координате производим, используя формулу (3) [26]:

$$H_{\text{к}} = z_{\text{к}} + 1,02i(L - x) \cdot 10^3, \quad (3)$$

где $z_{\text{к}}$ – высотная отметка в конце участка, м; L – длина участка нефтепровода, км; x – соответствующая координата, км; i – гидравлический уклон.

Гидравлический уклон определяется по формуле (4) [26]:

$$i = \frac{\lambda}{d} \frac{v^2}{2g}, \quad (4)$$

где λ – коэффициент гидравлического сопротивления; d – диаметр трубопровода, м; v – скорость течения жидкости, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с².

Коэффициент гидравлического сопротивления λ определяется в зависимости от режима течения жидкости в трубопроводе, расчет которого проводится в соответствии с ГОСТ 34563-2019 «Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов» или [26]. В связи с тем, что в дальнейших расчетах коэффициент гидравлического сопротивления используется в формуле определения гидравлического уклона i , при любом значении λ расчет будет справедлив.

Скорость течения жидкости рассчитывается по формуле (5) [26]:

$$v = \frac{4Q}{\pi d^2}, \quad (5)$$

где Q – объемный расход нефти, м³/с; d – диаметр нефтепровода, м.

Также принимаем во внимание, что при изменении развиваемого насосными агрегатами напора учитывается уже возросшее значение расхода транспортируемой жидкости на участке до УНВ и, как следствие, полезной мощности, что в совокупности приведет к уменьшению полного напора на выходе из НПС при установлении стационарных условий [27–29].

Определение погрешности

Построим линии гидравлического уклона (ЛГУ) (рис. 1, 2). Первая ЛГУ не учитывает влияние насоса. Второе построение будет основано на учете снижения полного напора, то есть между начальной точкой «эталонной» линии и начальной точкой уклона с врезкой и откачкой будет определенное расстояние. Рассмотрим случай при количестве отбора равном 5 %.

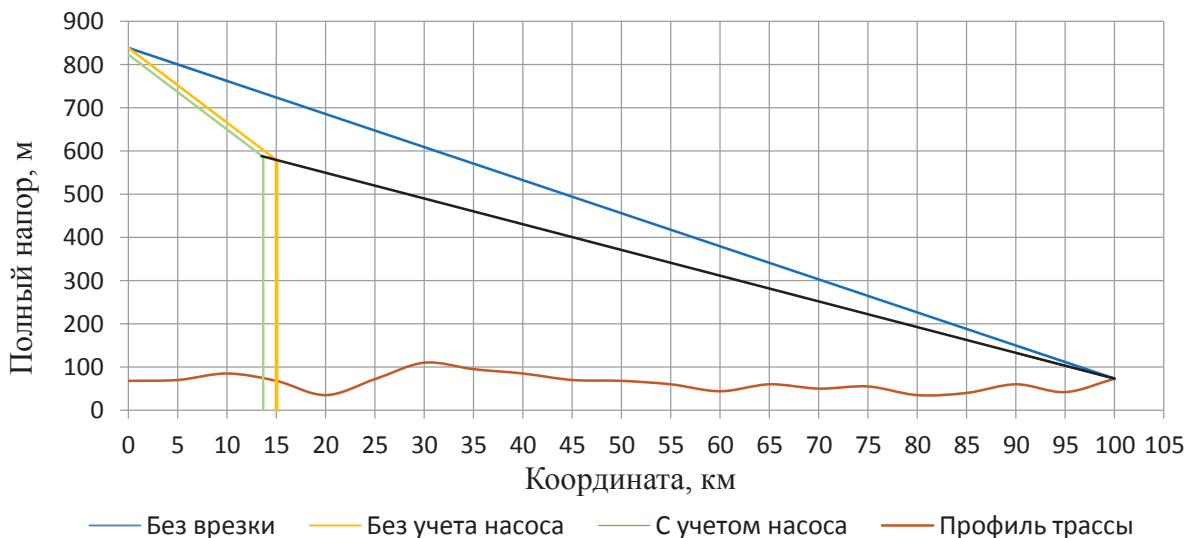


Рис. 1. Определение координаты врезки, совершенной на 15 км, при откачке 5 %

Fig. 1. Determining the coordinates of a tie-in made at 15 km, with pumping of 5%

Как видно из рис. 1, линии, проведенные согласно данным в начале участка (с учетом и без учета насоса между двумя НПС), пересекаются с линией, проведенной согласно конечным данным, в разных точках. Найдя координаты точек пересечения, сведем результаты в таблицу и проанализируем отклонения от реальной координаты врезки.

Анализируя таблицу, можно сделать вывод о том, что, если не учитывать изменение полного напора, погрешность локализации утечки довольно небольшая и в данном случае составляет 20 м. Однако в случае с учетом влияния насоса на гидравлическую систему погрешность возрастает уже до 1,14 км. Оперативно найти УНВ с погрешностью 1,14 км гораздо сложнее.

Рассмотрим также варианты, предполагая, что врезки произошли в других координатах – на 30, 40, 70, 80 и 85 км. Полученные данные также сведены в таблицу.

Таким образом, можно заметить, что, если не учитывать изменение напора, данный способ локализации врезки дает отклонение до 70 м, а в координатах 40, 70 и 80 км погрешность и вовсе равна нулю. В то же время при учете «сдвига» напора в начальной точке максимальная погрешность достигает 8,8 %, что составляет 2,64 км.

Рассмотрим случаи, если процент откачки составляет соответственно 2, 3 и 4 %. Из данных, представленных в таблице, видно, что при уменьшении процента откачки погрешность локализации увеличивается. Особенно хорошо это заметно в случае наличия «сдвига» полного напора. Более подробно рассмотрим вариант с УНВ 1 % (рис. 2) и результаты при данном проценте утечки также в таблице.

Таблица. Сравнение результатов локализации с учетом и без учета насоса
Table. Comparison of the results of localization with and without pumps

Координата, км Coordinate, km	Процент утечки, % Percentage of leakage, %	Без учета насоса, км Without pump, km	Погрешность, % Error, %	С учетом насоса, км With pump, km	Погрешность, % Error, %
15	5	15,02	0,13	13,86	7,60
15	4	14,98	0,13	13,44	10,40
15	3	14,99	0,07	13,11	12,60
15	2	15,68	4,55	12,82	14,53
15	1	15,07	0,47	12,25	18,33
30	5	29,93	0,23	27,36	8,80
30	4	29,94	0,20	26,91	10,30
30	3	30,02	0,07	26,34	12,20
30	2	29,87	0,43	25,69	14,37
30	1	29,86	0,47	24,34	18,87
40	5	40,00	0,00	36,98	7,55
40	4	39,95	0,12	35,99	10,03
40	3	39,94	0,15	35,19	12,03
40	2	40,00	0,00	34,58	13,55
40	1	39,91	0,23	32,7	18,25
70	5	70,00	0,00	66,76	4,63
70	4	70,04	0,06	63,25	9,64
70	3	69,86	0,20	62,78	10,31
70	2	70,00	0,00	61,82	11,69
70	1	70,90	1,28	58,75	16,07
80	5	80,00	0,00	76,22	4,73
80	4	79,92	0,10	73,28	8,40
80	3	80,00	0,00	72,45	9,44
80	2	80,11	0,14	70,98	11,28
80	1	79,86	0,18	68,51	14,36
85	5	84,95	0,06	79,53	6,44
85	4	85,04	0,05	78,96	7,11
85	3	84,89	0,13	77,65	8,65
85	2	85,13	0,15	78,35	7,82
85	1	84,86	0,16	74,05	12,88

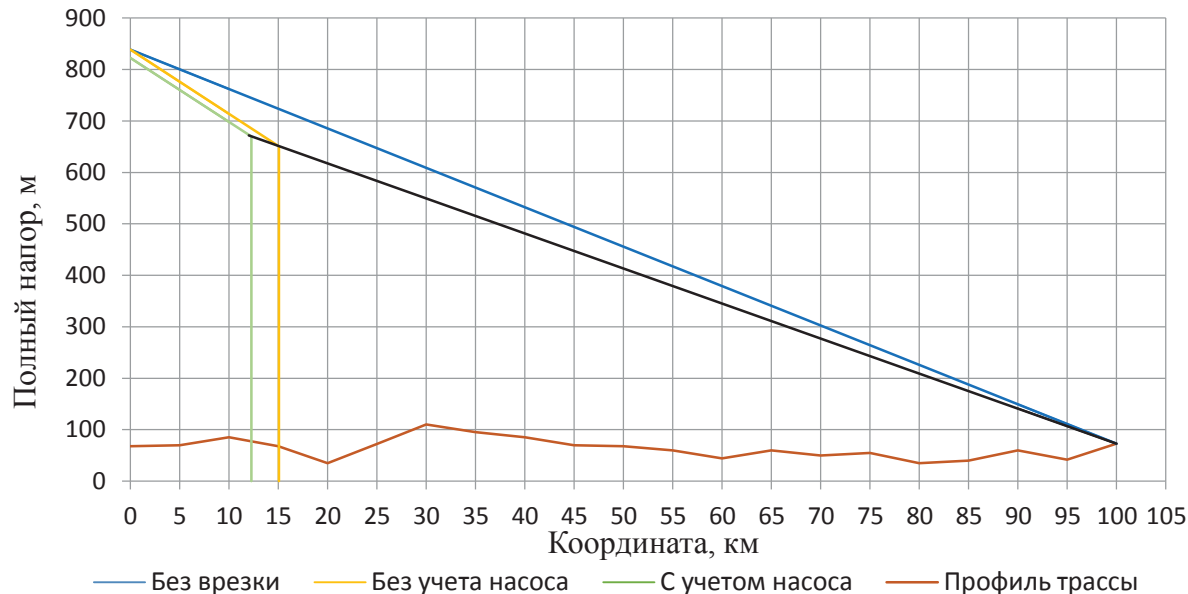


Рис. 2. Определение координаты врезки, совершенной на 15 км, при откачке 1 %
Fig. 2. Determining the coordinates of a tie-in made at 15 km, with pumping of 1%

В приведенной таблице видно, что при откачке в 1 % даже без учета насоса, расположенного между двумя НПС и совершающего откачку, погрешность измерений очень велика. Ни в одном из приведенных на рис. 2 графиков линии не пересеклись в требуемых точках 15, 30, 40, 70, 80 и 85 км. Максимальная погрешность здесь составила 1,28 %, то есть 900 м. В случае учета насоса максимальное отклонение – 10,95 км. Причем чем ближе к концу участка, тем больше в километрах отличие от реального местоположения врезки.

Представим в виде диаграммы зависимость погрешности в определении координаты от процента утечки, а также от координаты, в которой она произошла. Как следует из анализа диаграммы на рис. 3, погрешность в данном методе довольно хаотична и ее максимумы, если рассматривать зависимость от координаты, возникают при различных координатах, хотя можно заметить, что на 80 и 85 км максимальной погрешности не наблюдается ни в одном из рассматриваемых случаев. Также, если рассматривать каждую координату при различных процентах утечек, прослеживается максимум погрешности при утечке 1 %, кроме случая с УНВ на 15 км, где максимум находится на утечке 2 %. В случае учета сдвига напора (рис. 4) из-за перепада мощностей насосных агрегатов погрешность более «структурированная». Ее рост происходит с уменьшением процента утечки. Анализ зависимости от координат показывает, что точность возрастает к концу участка, независимо от степени

утечки. Максимальные погрешности наблюдаются на 15 и 30 км.

Таким образом, рассмотрев влияние насосного оборудования в стационарном режиме на локализацию утечек и несанкционированных врезок, предлагается модифицировать предложенный в [26] метод гидравлической локации УНВ.

Поиск координаты УНВ предлагается осуществлять по формуле (6):

$$x = L \frac{|\Delta i_2|}{|\Delta i_1| + |\Delta i_2|}. \quad (6)$$

Гидравлический уклон определяется (7):

$$i_{AA1} = \frac{H_A - H_{A1}}{l_1}, \quad (7)$$

где H_A – полный напор, м; H_{A1} – напор в выбранном сечении, м; l_1 – расстояние от начального до выбранного сечения, км.

А изменение гидравлических уклонов, представших быть равными при возникновении утечки, рассчитывается по формулам (8, 9):

$$\Delta i_1 = \frac{H_A - H_{A1}}{l_1}, \quad (8)$$

$$\Delta i_2 = \frac{H_{B1} - H_B}{l_2}. \quad (9)$$

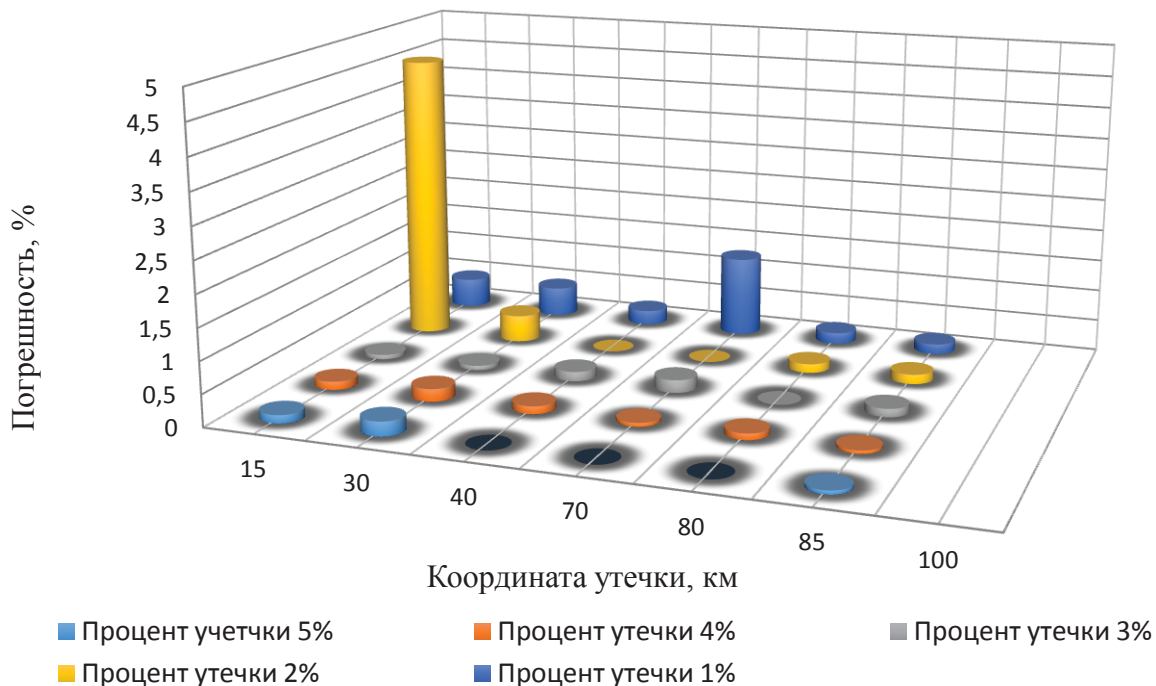


Рис. 3. Зависимость погрешности локализации от координаты и процента утечки
 Fig. 3. Dependence of the localization error on the coordinate and the leakage percentage

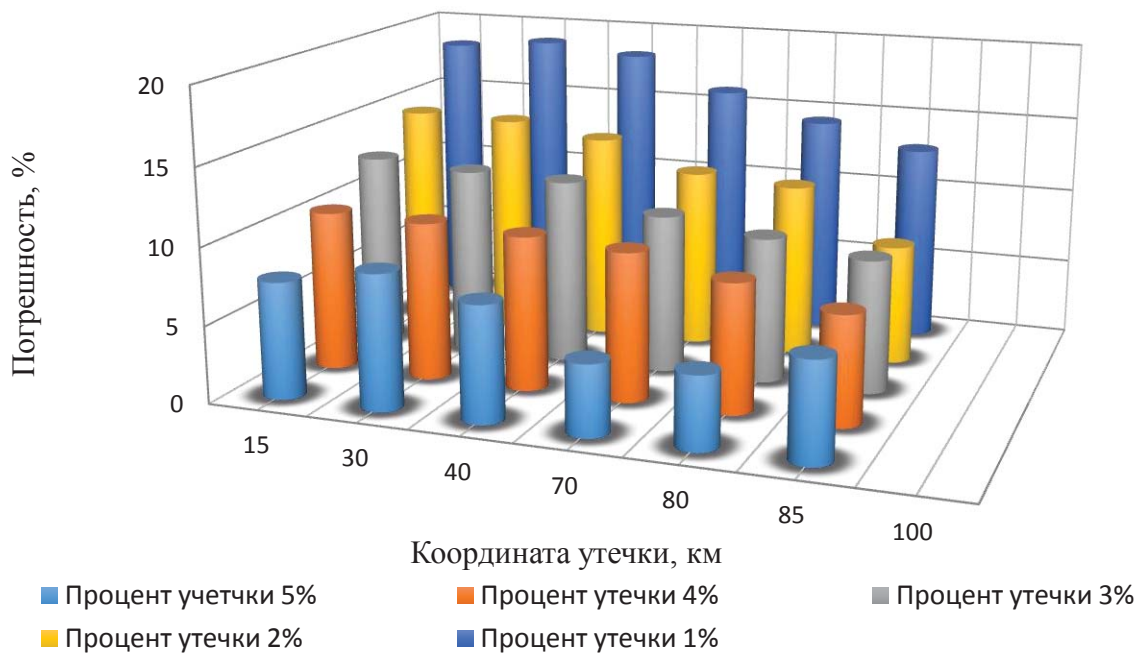


Рис. 4. Зависимость погрешности локализации от координаты и процента утечки при учете «сдвига» полного напора
Fig. 4. Dependence of the localization error on the coordinate and percentage of leakage, considering the "shift" of the total head

Причем полный напор в данной методике принято рассчитывать по формуле (10):

$$H_n = \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z, \quad (10)$$

где v – скорость потока, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; p – давление в начальном сечении, МПа; ρ – плотность жидкости, кг/м³; z – высотная отметка, м.

Так как исследовано и доказано влияние насосного оборудования на поиск координаты вследствие влияния на полный напор без учета нестационарных условий процесса, то при расчете координаты произошедшей утечки или несанкционированной врезки формула расчета принимает следующий вид (11):

$$H_n = n(a - bQ_n^2) + \frac{v_n^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z. \quad (11)$$

Усовершенствование метода обнаружения УНВ

Подводя итоги, вернемся к не совсем верному предположению о постоянстве полного напора в начальном сечении при возникновении УНВ. Доказано и проанализировано влияние перепада мощности насосных агрегатов на полный напор [30–32]. Тогда можно предположить возможность определения координаты утечки или несанкционированной врезки, учитывая изменение полного напора, связанного с изменением мощности. Продемон-

стрируем на рис. 5 предполагаемую произошедшую врезку.

На рис. 5: $F(x)$ – врезка не происходила, $F_d(x)$, $F_n(x)$ – функции до и после местоположения несанкционированной врезки.

Тогда рассмотрим каждую функцию отдельно более подробно. Известно, что гидравлический уклон рассчитывается по формуле (4) [26], тогда приведем функцию до местоположения утечки как (12):

$$F_d(x) = H_n - \lambda_n \frac{x}{d} \frac{v_n^2}{2g}, \quad (12)$$

где H_n – напор в начальном сечении, м; λ_n – коэффициент гидравлического сопротивления [26]; d – диаметр трубопровода, м; v_n – скорость течения жидкости, м/с (5); g – ускорение свободного падения, м/с²; x – координата, в которой произошла утечка, км.

Полный напор, рассчитанный по формуле (1), преобразуем, учитывая влияние насосного оборудования, и получим (13):

$$H_n = n(a - bQ_n^2) + z + \frac{v_n^2}{2g} + h_n, \quad (13)$$

где n – количество работающих насосов; a и b – коэффициенты аппроксимации; Q_n – объемный расход нефти, м³/ч; z – высотная отметка, м; v_n –

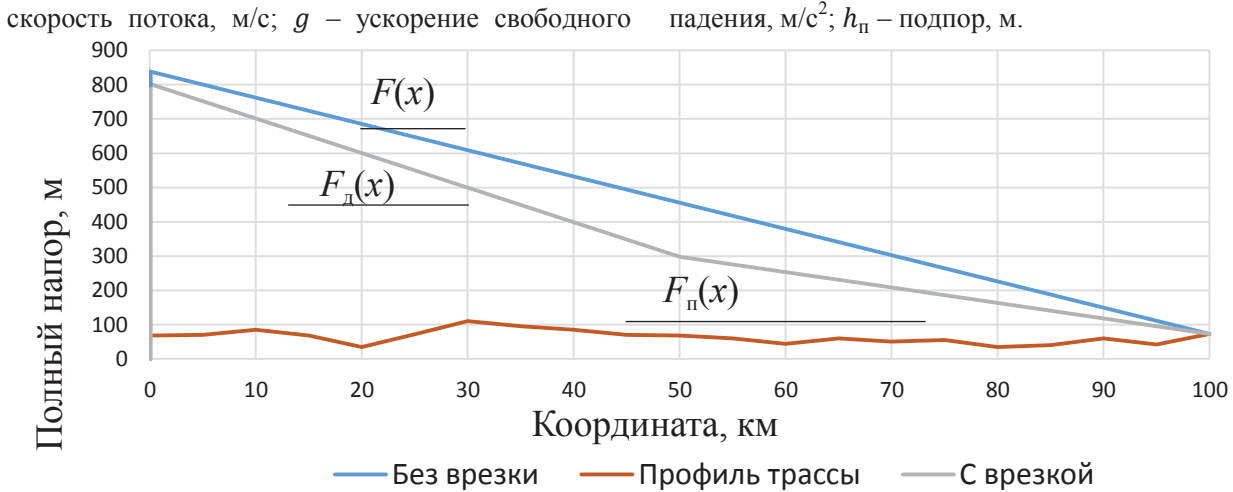


Рис. 5. Моделирование несанкционированной врезки в нефтепровод
 Fig. 5. Modeling of unauthorized tie-in into an oil pipeline

Так как рассматривается случай возникновения УНВ между промежуточными нефтеперекачивающими станциями, примем подпор $h_{\text{п}} = \text{const}$. При УНВ, произошедшей между головной нефтеперекачивающей станцией и последующей НПС, подпор $h_{\text{п}}$ необходимо не учитывать как постоянную величину.

В таком случае функция после местоположения врезки $F_{\text{п}}(x)$ будет рассчитываться как (14):

$$F_{\text{п}}(x) = H_{\text{к}} + \lambda_{\text{к}} \frac{L - x}{d} \frac{v_{\text{к}}^2}{2g}, \quad (14)$$

где $H_{\text{к}}$ – напор в конечном сечении, м; $\lambda_{\text{к}}$ – коэффициент гидравлического сопротивления [26]; d – диаметр трубопровода, м; $v_{\text{к}}$ – скорость течения жидкости, м/с (6); g – ускорение свободного падения, м/с²; L – длина диагностируемого участка, км; x – координата, в которой произошла утечка, км.

Для начала предположим, что ни утечек, ни врезок не происходило, в таком случае (15):

$$|F_{\text{д}}(x) - F_{\text{п}}(x)| = \varepsilon. \quad (15)$$

В таком случае получаем:

$$x = \frac{d2g(H_{\text{н}} - H_{\text{к}})}{(\lambda_{\text{н}}v_{\text{н}}^2 - \lambda_{\text{к}}v_{\text{к}}^2)} + \frac{\lambda_{\text{к}}v_{\text{к}}^2L}{(\lambda_{\text{н}}v_{\text{н}}^2 - \lambda_{\text{к}}v_{\text{к}}^2)}. \quad (16)$$

Подставляя уравнение (2) в приведенное уравнение (16), получим (17):

$$x = \frac{d2gn(a - bQ_{\text{н}}^2)}{(\lambda_{\text{н}}v_{\text{н}}^2 - \lambda_{\text{к}}v_{\text{к}}^2)} + \frac{d2gz + \frac{v_{\text{н}}^2}{2g} + h_{\text{п}} - H_{\text{к}}}{(\lambda_{\text{н}}v_{\text{н}}^2 - \lambda_{\text{к}}v_{\text{к}}^2)} + \frac{\lambda_{\text{к}}v_{\text{к}}^2L}{(\lambda_{\text{н}}v_{\text{н}}^2 - \lambda_{\text{к}}v_{\text{к}}^2)}. \quad (17)$$

Однако, как было описано выше, при произошедшей УНВ $F_{\text{д}}(x)$ и $F_{\text{п}}(x)$ будут различаться на некоторую величину ε .

Принимая во внимание факт, что разница между функциями при произошедшей врезке будет равна некоторой ε (18):

$$|F_{\text{д}}(x) - F_{\text{п}}(x)| \leq \varepsilon. \quad (18)$$

В данных обстоятельствах разность функций не может описываться уравнением, а будет являться неравенством (13). Этот факт связан с зависимостью скорости, коэффициента гидравлического сопротивления, а также непосредственно дифференциального напора нефтеперекачивающей станции (что доказано выше) от изменяющейся величины расхода. Из этого неравенства должно следовать, что искомая величина x – необходимая нам координата произошедшей несанкционированной врезки или утечки, определяется по формуле (19):

$$x = \frac{(H_{\text{н}} - H_{\text{к}})2dg}{\lambda_{\text{н}}v_{\text{н}}^2 - \lambda_{\text{к}}v_{\text{к}}^2} + \frac{\lambda_{\text{к}}v_{\text{к}}^2L}{\lambda_{\text{н}}v_{\text{н}}^2 - \lambda_{\text{к}}v_{\text{к}}^2}. \quad (19)$$

Тогда, согласно зависимости (2), итоговой формулой будет являться (20):

$$x = \frac{n(a - bQ_n^2)d2g}{\lambda_n v_n^2 - \lambda_k v_k^2} + \frac{\left(z + \frac{v_n^2}{2g} + h_n - H_k\right)2dg}{\lambda_n v_n^2 - \lambda_k v_k^2} + \frac{\lambda_k v_k^2 L}{\lambda_n v_n^2 - \lambda_k v_k^2} \pm \varepsilon. \quad (20)$$

Проведем численное моделирование согласно предложенной авторами методике обнаружения УНВ.

Исходя из предположений о том, что утечка произошла в координате $x=30$ км, примем существование некоторого участка нефтепровода длиной $L=100$ км, диаметром $d=\varnothing 720 \times 8$ мм, также принимая во внимание, что $z=68$ м, $h_n=60$ м. Известно, что расход на участке до врезки составил $3027,1 \text{ м}^3/\text{ч}$, после – $2125,5 \text{ м}^3/\text{ч}$. Примем $\varepsilon=0,05$.

Рассчитываем скорости по формуле (5), коэффициенты гидравлического сопротивления – согласно [26], подставляем полученные значения в формулу (20) и получаем координату $x = 30 \pm 1,676$ км, вычисленная погрешность составляет 5 %.

Заключение

Подводя итог, можно сделать вывод о том, что было рассмотрено влияние уменьшения полного

напора, развиваемого насосными агрегатами нефтеперекачивающей станции, на точность определения места утечки или несанкционированной врезки в связи с изменением подачи транспортируемой жидкости. Проведено численное моделирование при условии известных значений расходов и давлений в начальной и конечной координатах участка с учетом изменения расхода, давления и полного напора в начальном сечении участка при утечке или несанкционированной врезке.

Определено, что условие изменения расхода при утечке или несанкционированном отборе и, как следствие, изменение полного напора может значительно увеличивать погрешность при локализации – можно проследить ее зависимость от координаты и расхода утечки.

Предложена формула определения координаты утечки или несанкционированной врезки относительно начала участка трубопровода, которая учитывает гидравлическую характеристику насосного оборудования нефтеперекачивающей станции в стационарных условиях процесса и, как следствие, изменение полного напора на выходе из нефтеперекачивающей станции вследствие изменения подачи насосов, что привело к существенному снижению погрешности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Можаяев С.А., Коршунов С.А., Чионов А.М. Оценка параметров волоконно-оптических систем мониторинга возникновения утечек с целью обеспечения достоверности их работы // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2021. – Т. 11. – № 6. – С. 614–621.
2. Зверев Ф.С. Модифицированный метод материального баланса для оперативного обнаружения утечек нефти или нефтепродукта из магистральных трубопроводов // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2009. – № 3. – С. 48–51.
3. Gamboa-Medina M.M., Ribeiro Reis L.F. Sampling design for leak detection in water distribution networks // Procedia Engineering. – São Carlos: Elsevier, 2017. – P. 460–469.
4. Бондарь Д.В., Жолобов В.В., Надежкин О.С. Метод определения параметров утечек в трубопроводах на основе гидродинамических моделей // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2021. – Т. 11. – № 5. – С. 515–527.
5. Поляков В.А., Шестаков Р.А. К вопросу обеспечения точности измерений системы обнаружения утечек в нефтепроводе // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2015. – № 4 (20). – С. 76–79.
6. Бондарь Д.В., Коршунов С.А., Дацов Ю.В. Перспективы применения волоконно-оптических датчиков физических величин в качестве средств измерения в системах обнаружения утечек // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2019. – Т. 9. – № 2. – С. 191–199.
7. Сачедина К., Мохани А. Обзор методов постоянного и периодического контроля состояния трубопроводов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2018. – Т. 8. – № 6. – С. 668–679.
8. Kowalczyk Z., Gunawickrama K. Leak detection and isolation for transmission pipelines via non linear state estimation // Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes. – Budapest: Pergamon, 2000. – P. 921–926.
9. Hessel G., Schmitt W., Weff F.-P. A new method for acoustic leak detection at complicated geometrical structures // Supervision and Safety for Technical Processes. – 1994. – № 4. – P. 147–152.
10. A deep learning approach for motion segment estimation for pipe leak detection robot / C. Uyanik, E. Erdemir, E. Kaplanoglu, A. Sekmen // Procedia Computer Science. – Netherlands: Elsevier, 2019. – P. 37–44.
11. Сунагатуллин Р.З., Коршунов С.А., Дацов Ю.В. Анализ влияния характеристик измерительного оборудования на работу параметрических методов обнаружения утечек // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2018. – Т. 8. – № 5. – С. 548–557.
12. Шестаков Р.А., Дульченко А.А. Влияние утечек и несанкционированных отборов на параметры гидравлической системы // Деловой журнал Neftegaz.RU. – 2023. – № 3 (135). – С. 30–35.
13. Чионов А.М., Коршунов С.А. Зависимость погрешности определения координаты утечки от параметров оснащённости трубопровода средствами измерения давления // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2023. – Т. 13. – № 2. – С. 104–108.

14. Candelieri A., Conti D., Archetti F. A graph based analysis of leak localization in urban water networks // *Procedia Engineering*. – Netherlands: Elsevier, 2014. – P. 228–237.
15. Способ определения величины и места утечки в магистральном трубопроводе между двумя смежными насосными станциями насосно-трубопроводного комплекса по перекачке нефти и нефтепродуктов: пат. Рос. Федерация № 2362134; заявл. 13.11.2007; опубл. 20.07.2009, Бюл. № 20. – 21 с.
16. Оценка достоверности определения координаты утечки в нефтепроводе / А.М. Чионов, А.А. Амерханов, И.С. Симонов, С.В. Петренко // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. – 2019. – Т. 9. – № 4. – С. 378–386.
17. Dataset on water–glycerol flow in a horizontal pipeline with and without leaks / J.F. Noguera-Polania, J. Hernández-García, D.F. Galaviz-López // *Data in Brief*. – USA: Elsevier, 2020. – P. 105950.
18. Логинов И.Н., Коршунов С.А. Математический алгоритм для обнаружения утечек малой интенсивности // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. – 2021. – Т. 11. – № 5. – С. 528–534.
19. Чионов А.М., Амерханов А.А., Кудрицкий А.В. Стохастическая модель материального баланса для обнаружения утечек в нефтепроводе // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. – 2019. – Т. 9. – № 6. – С. 633–639.
20. Blesa J., Nejari F., Sarrate R. Robustness analysis of sensor placement for leak detection and location under uncertain operating conditions // *Procedia Engineering*. – 2014. – № 89. – P. 1553–1560.
21. Arifin B.M.S., Zukui Li, Shah L. Sirish. Pipeline leak detection using particle filters // *IFAC-PapersOnLine*. – London: Elsevier, 2015. – P. 076–081.
22. Lay-Ekuakille Aime, Vito Telesca. Flow distribution imaging and sensing for leaks in pipelines using decimated signal diagonalization // *Measurement: Sensors*. – United Kingdom: Elsevier, 2020. – P. 100014.
23. Soares Alexandre Kepler, Covas Di'dia I.C., Reis Luisa Fernanda R. Leak detection by inverse transient analysis in an experimental PVC pipe system // *Journal of Hydroinformatics*. – Great Britain: IWA Publishing, 2011. – P. 153–166.
24. Consideration on leak/fault detection system in mass transfer networks / C. Lupu, D. Chirita, S. Iftime, R. Miclaus // *Energy Procedia*. – Netherlands: Elsevier, 2017. – P. 58–66.
25. Лурье М.В., Макаров П.С. Гидравлическая локация утечек нефтепродуктов на участке трубопровода // *Транспорт и хранение нефтепродуктов*. – 1998. – № 12. – С. 65–69.
26. Мастобаев Б.Н., Нечваль А.М., Гареев М.М. Трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов: справочное пособие. – М.: Изд-во «Недра», 2017. – Т. 1. – 494 с.
27. Аралов О.В., Буянов И.В., Яровой А.Т. Выбор преобразователей расхода для систем обнаружения утечек в магистральных нефтепродуктопроводах // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. – 2022. – Т. 12. – № 2. – С. 169–177.
28. Сафаров А.М. Определение степени загрязнения при аварийных утечках нефти и нефтепродуктов. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2010. – 15 с.
29. Brennan M.J., Karimi M., Almeida F.C.L. On the role of vibro-acoustics in leak detection for plastic water distribution pipes // *Procedia Engineering*. – 2017. – № 199. – P. 1350–1355.
30. Поляков В.А. Методы и нормы технологического проектирования нефтепроводов: учебное пособие. – М.: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, 2019. – 113 с.
31. Галиуллин Р.М. Информационно-измерительная система обнаружения и определения местоположения несанкционированных врезок на нефтепродуктопроводах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Самара, 2005. – 24 с.
32. Qiang Fu, Hongjie Wan, Fupeng Qiu. Pipeline leak detection based on fiber optic early-warning system // *Procedia Engineering*. – 2009. – № 7. – P. 88–93.

Информация об авторах

Анна Алексеевна Дульченко, студент кафедры нефтепродуктообеспечения и газоснабжения, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр., 65, корп. 1. dulchenko.anna@yandex.ru

Роман Алексеевич Шестаков, кандидат технических наук, доцент кафедры нефтепродуктообеспечения и газоснабжения, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр., 65, корп. 1. shestakov.r@gubkin.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4437-0612>

Юлия Сергеевна Матвеева, студент Университета дистанционного обучения в Хагене, Германия, 58097, г. Хаген, Университет штрассе, 47. yulia2@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1157-6200>

Поступила в редакцию: 11.07.2023

Поступила после рецензирования: 18.09.2023

Принята к публикации: 19.04.2024

REFERENCES

1. Mozhaev S.A., Korshunov S.A., Chionov A.M. Estimation of the parameters of fiber-optic systems for monitoring the occurrence of leaks in order to ensure the reliability of their work. *Science and technology of oil and gas pipeline transport oil products*, 2021, no. 6, pp. 614–621. (In Russ.)

2. Zverev F.S. Modified material balance method for the operational detection of oil or oil product leaks from main pipelines. *Environmental protection in the oil and gas complex*, 2009, no. 3, pp. 48–51. (In Russ.)
3. Gamboa-Medina M.M., Ribeiro Reis L.F. Sampling design for leak detection in water distribution networks. *Procedia Engineering*. São Carlos, Elsevier Publ., 2017. pp. 460–469.
4. Bondar D.V., Zholobov V.V., Nadezhkin O.S. A method for determining the parameters of leaks in pipelines based on hydrodynamic models. *Science and technology of oil and gas pipeline transport oil products*, 2021, vol. 11, no. 5, pp. 515–527. (In Russ.)
5. Polyakov V.A., Shestakov R.A. On the issue of ensuring the accuracy of measurements of the leak detection system in an oil pipeline. *Science and technology of oil and gas pipeline transport oil products*, 2015, no. 4 (20), pp. 76–79. (In Russ.)
6. Bondar D.V., Korshunov S.A., Datsov Yu.V. Prospects for the use of fiber-optic sensors of physical quantities as measuring instruments in leak detection systems. *Science and technology of oil and gas pipeline transport oil products*, 2019, vol. 9, no. 2, pp. 191–199. (In Russ.)
7. Sachedina K., Mohani A. Review of methods of continuous and periodic monitoring of the state of pipelines. *Science and technology of oil and gas pipeline transport oil products*, 2018, vol. 8, no. 6, pp. 668–679. (In Russ.)
8. Kowalczyk Z., Gunawickrama K. Leak detection and isolation for transmission pipelines via non linear state estimation. *Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes*. Budapest, Pergamon Publ., 2000. pp. 921–926.
9. Hessel G., Schmitt W., Weff F.-P. A new method for acoustic leak detection at complicated geometrical structures. *Supervision and Safety for Technical Processes*, 1994, no. 4, pp. 147–152.
10. Uyanik C., Erdemir E., Kaplanoglu E., Sekmen A. A deep learning approach for motion segment estimation for pipe leak detection robot. *Procedia Computer Science*. Netherlands, Elsevier Publ., 2019. pp. 37–44.
11. Sunagatullin R.Z., Korshunov S.A., Datsov Yu.V. Analysis of the influence of measuring equipment characteristics on the operation of parametric leak detection methods. *Science and technology of oil and gas pipeline transport oil products*, 2018, vol. 8, no. 5, pp. 548–557. (In Russ.)
12. Shestakov R.A., Dulchenko A.A. Influence of leaks and unauthorized withdrawals on the parameters of the hydraulic system. *Business magazine Neftegaz.RU*, 2023, no. 3 (135), pp. 30–35. (In Russ.)
13. Chionov A.M., Korshunov S.A. Dependence of the error in determining the leak coordinate on the parameters of pipeline equipment with pressure measuring instruments. *Science and technology of oil and gas pipeline transport oil products*, 2023, vol. 13, no. 2, pp. 104–108. (In Russ.)
14. Candelieri A., Conti D., Archetti F. A graph based analysis of leak localization in urban water networks. *Procedia Engineering*. Netherlands, Elsevier Publ., 2014. pp. 228–237.
15. Krichke V.O., Krichke V.V., Groman A.O. *Method for determining the magnitude and location of a leak in the main pipeline between two adjacent pumping stations of a pumping and pipeline complex for pumping oil and oil products*. Patent RF, no. 2362134, 2009. (In Russ.)
16. Chionov A.M., Amerkhanov A.A., Simonov I.S., Petrenko S.V. Estimation of the reliability of determining the coordinates of a leak in an oil pipeline. *Science and technology of oil and gas pipeline transport oil products*, 2019, vol. 9, no. 4, pp. 378–386. (In Russ.)
17. Noguera-Polania J.F., Hernández-García J., Galaviz-López D.F. Dataset on water–glycerol flow in a horizontal pipeline with and without leaks. *Data in Brief*. USA, Elsevier Publ., 2020. pp. 105950.
18. Loginov I.N., Korshunov S.A. Mathematical algorithm for detecting low-intensity leaks. *Science and technology of pipeline transport of oil and oil products*, 2021, vol. 11, no. 5, pp. 528–534. (In Russ.)
19. Chionov A.M., Amerkhanov A.A., Kudritsky A.V. Stochastic material balance model for detecting leaks in an oil pipeline. *Science and technology of pipeline transport of oil and oil products*, 2019, vol. 9, no. 6, pp. 633–639. (In Russ.)
20. Blesa J. Nejari F., Sarrate R. Robustness analysis of sensor placement for leak detection and location under uncertain operating conditions. *Procedia Engineering*, 2014, no. 89, pp. 1553–1560.
21. Arifin B.M.S., Zukui Li, Shah Sirish L. Pipeline leak detection using particle filters. *IFAC-PapersOnLine*. London, Elsevier Publ., 2015. pp. 076–081.
22. Lay-Ekuakille Aime, Telesca Vito. Flow distribution imaging and sensing for leaks in pipelines using decimated signal diagonalization. *Measurement: Sensors*. United Kingdom, Elsevier Publ., 2020. pp. 100014.
23. Soares Alexandre Kepler, Covas Di'dia I. C., Reis Luisa Fernanda R. Leak detection by inverse transient analysis in a PVC pipe system. *Journal of Hydroinformatics*. Great Britain, IWA Publ., 2011. pp. 153–166.
24. Lupu C., Chirita D., Iftime S., Miclaus R. Consideration on leak/fault detection system in mass transfer networks. *Energy Procedia*. Netherlands, Elsevier Publ., 2017. pp. 58–66.
25. Lurie M.V., Makarov P.S. Hydraulic location of oil leaks on the pipeline section. *Transport and storage of petroleum products*, 1998, no. 12, pp. 65–69. (In Russ.)
26. Mastobaev B.N., Nechval A.M., Gareev M.M. *Pipeline transport of oil and oil products: reference manual*. Moscow, Nedra Publ., 2017. Vol. 1, 494 p.
27. Aralov O.V., Buyanov I.V., Yarovoy A.T. Choice of flow transducers for leak detection systems in main oil and oil product pipelines. *Science and Technology of Oil and Oil Products Pipeline Transport*, 2022, vol. 12, no. 2. pp. 169–177. (In Russ.)
28. Safarov A.M. *Determination of the degree of pollution in case of emergency oil and oil products leaks*. Ufa, Ufa State Oil Technical University Publ., 2010. 15 p. (In Russ.)
29. Brennan M.J., Karimi M., Almeida F.C.L. On the role of vibro-acoustics in leak detection for plastic water distribution pipes. *Procedia Engineering*, 2017, no. 199, pp. 1350–1355.
30. Polyakov V.A. *Methods and norms of technological design of oil pipelines*. Moscow, Russian State University of Oil and Gas (National Research University) named after I.M. Gubkin Publ., 2019. 113 p. (In Russ.)
31. Galiullin R.M. *Information-measuring system for detecting and locating unauthorized tie-ins on oil product pipelines*. Cand. Diss. Abstract. Samara, 2005. 24 p.

32. Qiang Fu, HongJie Wan, Fupeng Qiu. Pipeline leak detection based on fiber optic early-warning system. *Procedia Engineering*, 2009, no. 7, pp. 88–93.

Information about the authors

Anna A. Dulchenko, Student, National University of Oil and Gas «Gubkin University», 65, bld. 1, Leninsky avenue, Moscow, 119991, Russian Federation. dulchenko.anna@yandex.ru

Roman A. Shestakov, Cand. Sc., Associate Professor, National University of Oil and Gas «Gubkin University», 65, bld. 1, Leninsky avenue, Moscow, 119991, Russian Federation. shestakov.r@gubkin.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4437-0612>

Yulia S. Matveeva, Student, FernUniversität in Hagen, 47, Universitätsstraße, Hagen, 58097, Germany. yulia2@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1157-6200>

Received: 11.07.2023

Revised: 18.09.2023

Accepted: 19.04.2024

УДК 622.276

DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4593

Шифр специальности ВАК: 2.8.4

Настройка PVT-моделей. Моделирование нагнетательного фонда скважин. Настройка моделей системы сбора и трубопроводов и системы поддержания пластового давления

Р.Н. Коротков✉, Д.М. Овчаренко, В.И. Ерофеев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉klimatqwf@gmail.com

Аннотация. *Актуальность* исследования заключается в возможности обеспечить более точную и эффективную оценку и управление процессом добычи углеводородов при помощи программных продуктов для интегрированного моделирования месторождений. Однако такой подход требует анализа качества исходных данных, а также выбора корректного подхода к созданию моделей. Последовательная и систематическая работа позволяет с высокой точностью воспроизвести действительную ситуацию для того, чтобы использовать полученные результаты в дальнейшей работе. Интегрированная модель месторождения является совершенно новым подходом к разработке месторождения, когда текущая работа строится не от существующих решений, а от потенциала. Прогнозирование поведения пласта, скважин и инфраструктуры, системы сбора и системы поддержания пластового давления позволяет комплексно оценивать возможности получения максимального дебита нефти и газа с минимизацией возможных потерь. **Цель:** формирование и анализ подхода к настройке PVT-моделей флюидов, моделей нагнетательного фонда скважин, системы сбора и транспорта и системы поддержания пластового давления путем адаптации параметров к фактическим данным. **Методы:** настройка и адаптация моделей нагнетательных скважин; настройка и адаптация моделей системы сбора и трубопроводов; подход к работе с системой поддержания пластового давления. **Результаты.** Полученные результаты позволяют адаптировать компоненты интегрированной модели с точностью свыше 95%, что делает возможным моделирование режима работы месторождения. В результате анализа были выявлены критерии настройки, а также представлен минимальный необходимый набор параметров для качественной адаптации моделей. Также доказана эффективность и точность прогнозных расчетов на настроенных моделях посредством сравнения фактических данных о режимах работы с синтетическими. На основании проделанной работы можно сделать вывод о том, что использование интегрированной модели демонстрирует нам высокое сходжение с реальными данными, что позволяет оптимально подходить к режиму разработки месторождения.

Ключевые слова: Petroleum Experts, PETEX, Prosper, PVT, PVT-модель, интегрированная модель, модель скважины, модель ССиТ, модель ППД, адаптация скважин

Благодарности: Авторы выражают благодарность Центру коллективного пользования «Физико-химические методы анализа» Томского политехнического университета.

Для цитирования: Коротков Р.Н., Овчаренко Д.М., Ерофеев В.И. Настройка PVT-моделей. Моделирование нагнетательного фонда скважин. Настройка моделей системы сбора и трубопроводов и системы поддержания пластового давления // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 6. – С. 37–45. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4593

UDC 622.276

DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4593

Setup of PVT-models. Modeling of injection wells. Configuring models of collection system and pipelines and reservoir pressure maintenance system

R.N. Korotkov[✉], D.M. Ovcharenko, V.I. Erofeev

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

[✉]klimatqwf@gmail.com

Abstract. Relevance. The ability to provide more accurate and efficient assessment and management of hydrocarbon production using software products for integrated field modeling. However, this approach requires an analysis of the source data quality, as well as the selection of the correct approach to creating models. Consistent and systematic work makes it possible to reproduce the actual situation with high accuracy in order to use the results obtained in further work. The integrated field model is a completely new approach to field development, when current work is based not on existing solutions, but on potential. Forecasting the behavior of the reservoir, wells and infrastructure, the collection system and the system for maintaining reservoir pressure allows for a comprehensive assessment of the possibilities of obtaining maximum oil and gas production while minimizing possible losses. **Aim.** Formation and analysis of an approach to setting up PVT-models of fluids, models of injection well stock, collection and transport systems and reservoir pressure maintenance systems by adapting parameters to actual data. **Methods.** Setting up and adapting injection well models; setting up and adapting collection system and pipeline models; approach to work with the reservoir pressure maintenance system. **Results.** The results obtained make it possible to adapt the components of the integrated model with an accuracy of over 95%, which makes it possible to simulate the operating conditions of the field. Because of the analysis, tuning criteria were identified, and the minimum required set of parameters for high-quality adaptation of models was presented. Efficiency and accuracy of predictive calculations on adapted models were proven as well by comparing actual performance data with synthetic data. Based on the work done, we can conclude that the use of an integrated model shows us a high convergence with real data, which allows us to optimally approach the field development regime.

Keywords: Petroleum Experts, PETEX, Prosper, PVT, PVT-model, integrated model, well model, reservoir pressure model, well adaptation

Acknowledgements: The authors are grateful to the TPU center «Physical and chemical methods of analysis».

For citation: Korotkov R.N., Ovcharenko D.M., Erofeev V.I. Setup of PVT-models. Modeling of injection wells. Configuring models of collection system and pipelines and reservoir pressure maintenance system. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 6, pp. 37–45. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4593

Введение

Использование программных продуктов для интегрированного моделирования месторождений требует анализа качества исходных данных, а также выбора корректного подхода к созданию моделей. Для практического применения полученных результатов от прогнозирования поведения месторождения необходимо производить комплексную оценку возможности получения дополнительной добычи нефти и газа [1]. Интегрированное моделирование позволяет повысить эффективность месторождения путем построения текущей работы от потенциала [2]. Комбинация методов моделирования пласта, скважин и инфраструктуры, системы сбора и системы поддержания пластового давления в совокупности воспроизводят более точные к реальности условия [3]. При помощи такого комплексного подхода можно оптимизировать процессы добычи с минимальными потерями и рисками путем симулирования различных режимов работы месторождения.

Методы

Адаптация уравнения состояния производится на основе данных из проектно-технической документации, где представлены осредненные результаты лабораторных исследований пластовых проб. Для адаптации модели уравнения состояния использовался программный пакет PVTr [4].

При адаптации уравнения состояния применяется принцип наименьшего вмешательства, т. е. автоадаптация (регрессия) проводится по наименьшему количеству параметров [5]. Основной фокус при адаптации делался на такие параметры, как:

- 1) давление насыщения (фазовая диаграмма) (рис. 1);
- 2) плотность нефти при пластовых условиях и давлении насыщения (рис. 2);
- 3) вязкость нефти, замеренная по результатам дифференциального разгазирования (рис. 3).

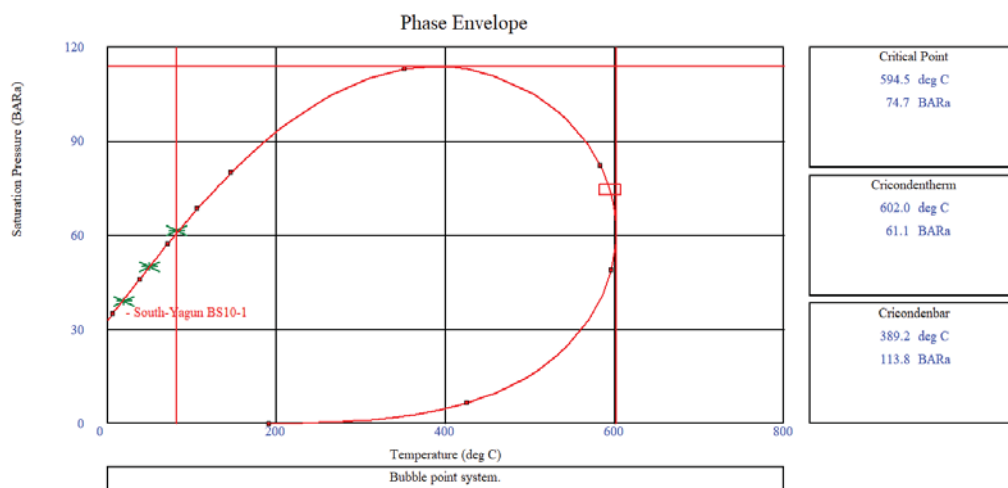


Рис. 1. Фазовая диаграмма с замеренным давлением насыщения
Fig. 1. Phase diagram with measured saturation pressure

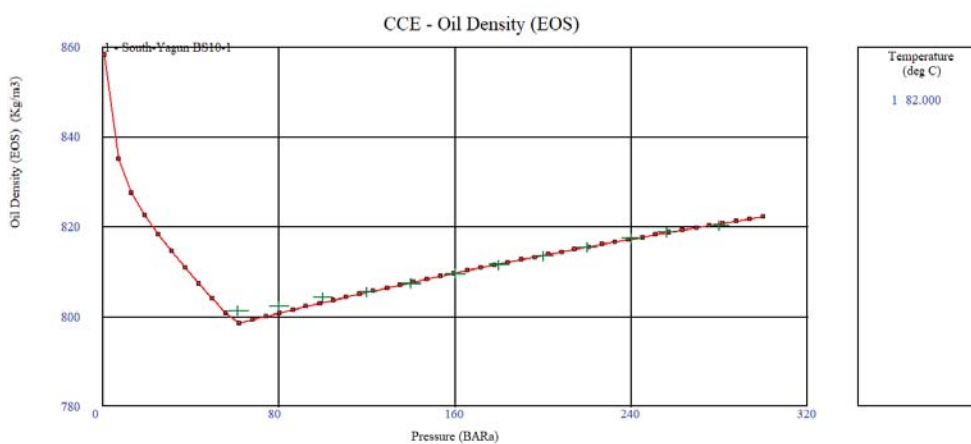


Рис. 2. PV-соотношение – Плотность нефти
Fig. 2. PV-ratio – oil density

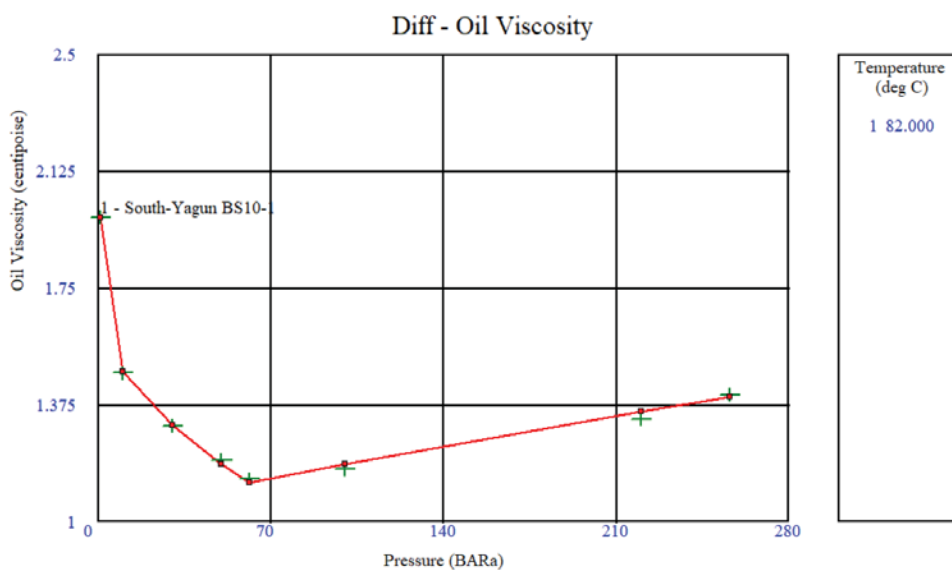


Рис. 3. Дифференциальное разгазирование – вязкость нефти
Fig. 3. Differential degassing – oil viscosity

Красными точками на графиках отображены расчётные данные, зелёными – фактические результаты лабораторных исследований. Сопоставляя эти точки на графиках, можно наблюдать сходимость (или несходимость) между расчётными и фактическими параметрами. Основной фокус при

адаптации модели черной нефти делался на такие параметры, как:

- 1) газовый фактор (рис. 4);
- 2) объемный коэффициент нефти (рис. 5);
- 3) вязкость нефти (рис. 6) [6].

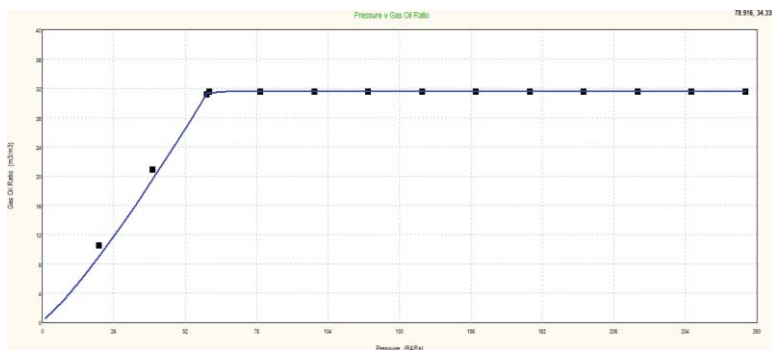


Рис. 4. Результаты адаптации газового фактора

Fig. 4. GOR adaptation results

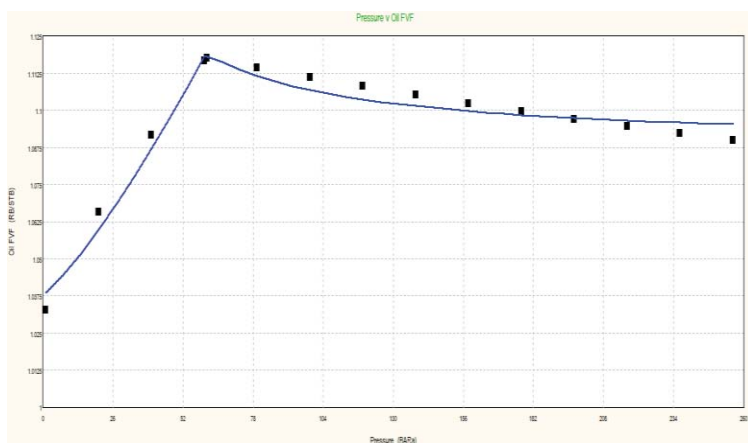


Рис. 5. Результаты адаптации объемного коэффициента нефти

Fig. 5. Results of an oil volume factor adaptation

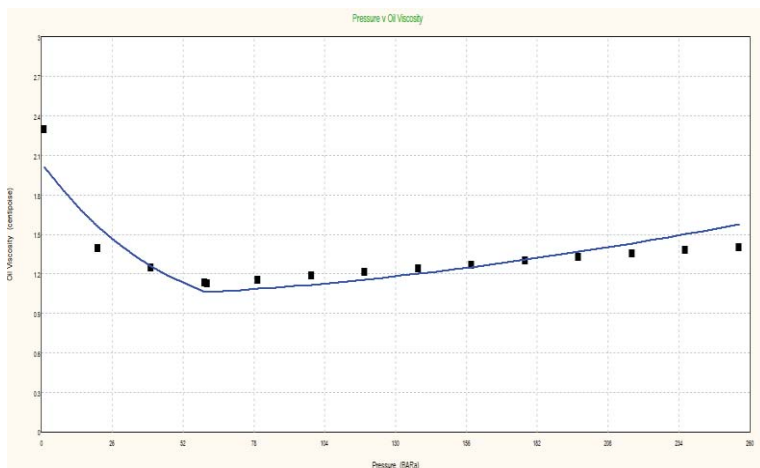


Рис. 6. Результаты адаптации вязкости нефти

Fig. 6. Oil viscosity matching results

Чёрными точками отображены значения, полученные на адаптированной модели уравнения состояния. Эти данные используются для выбора наиболее подходящей корреляции модели чёрной нефти (эта корреляция на графике отображена синим цветом).

Настройка и адаптация моделей нагнетательных скважин осуществляется в секции «VLP/IPR Matching» программного продукта Petroleum Experts PROSPER. Для этого необходимо занести данные по температуре закачки и фактические данные по замерам на дату актуализации модели, настроить вертикальный лифт и индикаторную кривую, проверить расчёт в секции «System» и сгенерировать кривые вертикального лифта.

Для дальнейших расчетов необходимо занести следующие данные:

- Test Point Date – дата актуализации модели скважины;
- Test Point Comment – информация об устьевом штуцере (диаметр штуцера или отсутствие штуцера);
- Injected Fluid Pressure – буферное давление;
- Downstream Temperature – температура флюида на забое скважины;
- Water Cut – обводненность закачиваемого флюида;
- Liquid Rate – закачка воды;
- Gauge Depth (Measured) – глубина спуска датчика;
- Gauge Pressure – давление на датчике;
- Reservoir Pressure – пластовое давление на верхних дырах перфорации.

Значение по замерам температуры на забое (U-Value) обычно отсутствует, поэтому для всех нагнетательных скважин U-Value было принято равным 15 Вт/м²/К (среднее значение по результатам предварительной настройки скважин Тевлинско-Русскинского месторождения).

Для настройки вертикального лифта следует зайти в меню «Correlation Comparison» в секции «VLP/IPR Matching». На вкладке «Correlation

Comparison» выполняется расчёт и построение градиента давления и температуры в скважине для данных на дату актуализации.

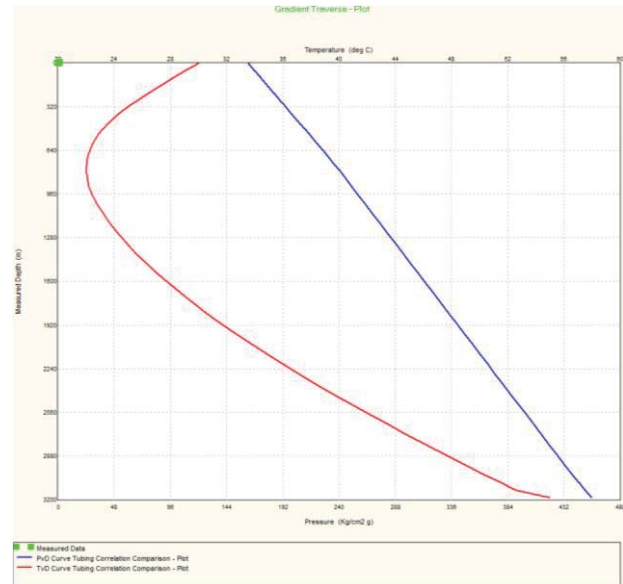


Рис. 7. График градиента давления

Fig. 7. Pressure gradient plot

На графике градиента давления (рис. 7) визуально оценивается форма кривой. В случае нефизичных перегибов и/или переломов линии следует проверить правильность внесения исходных данных. Для выполнения настройки индикаторной кривой следует зайти в меню «VLP/IPR» в секции «VLP/IPR Matching». На вкладке «VLP/IPR» выполняется расчёт для данных на дату актуализации с выбранной корреляцией Petroleum Experts 2.

По результатам расчёта оценивается, насколько расчётное значение по дебиту жидкости (пересечение кривых VLP и IPR) совпадает с фактическим (рис. 8).

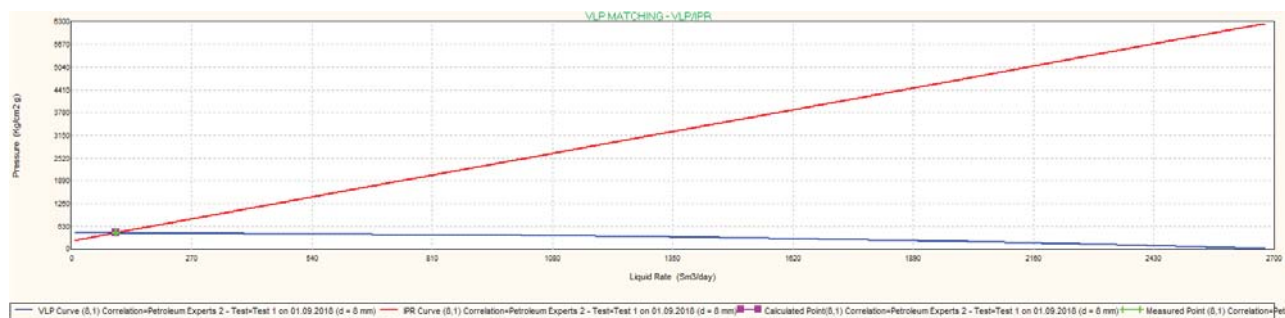


Рис. 8. Пересечение кривых VLP и IPR

Fig. 8. Intersection of VLP and IPR curves

При расхождении более 5 % подбирается коэффициент приёмистости скважины. Это может быть сделано вручную в секции «IPR» или автоматически с использованием функции «Adjust PI». Указанную функцию стоит использовать с осторожностью, так как в некоторых случаях рассчитанное значение PI может быть не найдено либо быть некорректным (при нестабильном (слабом) пересечении VLP/IPR). В случае, если подобранный PI значительно изменился по отношению к заданному (изменение более чем на 10 %), необходимо перепроверить пластовое давление. Возможно, оно изменилось от указанного в технологическом режиме с течением времени [7].

При совпадении расчётного и фактического дебитов в пределах 5 % настройка скважины заканчивается.

В секции «System» выполняется расчёт для данных на дату актуализации с использованием геометрического распределения в диапазоне объема закачки от 1 м³/сут до двух текущих дебитов с разделением на 20 шагов.

Если все предыдущие шаги выполнены корректно, то рассчитанные значения закачки (Liquid Rate) должны совпадать с фактическими в пределах 5 %. В противном случае необходимо искать ошибку при выполнении вышеперечисленных шагов.

При настройке и адаптации модели системы сбора и транспорта (ССиТ) выполняется расчёт со следующими граничными условиями: на устьях скважин – буферные давления, на дожимной насосной станции (ДНС) – давление на входе. Все остальные давления в системе рассчитываются с учётом параметров каждого трубопровода, расхода жидкости, штуцеров, которые были заданы в модели [8].

Настройка модели ССиТ заключается в адаптации параметров трубопроводов, штуцеров, чтобы расчётные значения давлений соответствовали замеренным в каждой точке системы, где есть замер.

Одним из основных требований к настройке модели ССиТ является использование тех же значений входных параметров (дебиты жидкости, обводнённость, PVT-свойства флюидов), на которые настраивались модели скважин [9].

При настройке ССиТ основным адаптируемым параметром являлся поправочный коэффициент на трение (Friction Coefficient). Этот коэффициент отвечает за потери давления в системе за счёт местных сопротивлений: износ трубопроводов, стыки, переходы, отводы, врезки, задвижки, различные отложения и т. д.

Вероятными причинами отклонений фактического перепада давления от рассчитанного по корреляции являются [10–12]:

1) некорректные замеры давлений и/или расходов жидкости. На месторождении отсутствуют ма-

нометры в промежуточных точках ССиТ, замеры в постоянном режиме ведутся только на автоматической групповой замерной установке и ДНС. При настройке использовались замеры в промежуточных точках, выполненные в период адаптации модели. Использование фактических данных на разные временные срезы может привести к искажённой оценке перепадов давлений по трубопроводам и, следовательно, к снижению точности настройки модели ССиТ. При следующем обновлении модели рекомендуется выполнить замеры давлений на дату актуализации;

2) неучтённые в модели дополнительные сопротивления (не до конца открыта задвижка, коррозия, в трубопроводе присутствуют отложения механических примесей, солей, парафинов, скопления водяных пробок в локальных снижениях профиля и др.).

В дальнейшем при обновлении модели следует обратить особое внимание на эти участки, а также провести по ним поиск причин повышенных перепадов давлений [13].

При настройке модели системы поддержания пластового давления (ППД) граничными условиями являются: на устьях скважин – приемистость жидкости, на источниках водоснабжения – давления [14]. Распределение давления в системе рассчитывается с учетом параметров каждого трубопровода, расхода жидкости, штуцеров, которые были заданы в модели.

Настройка модели системы ППД заключается в адаптации параметров трубопроводов, штуцеров, чтобы расчётные значения давлений соответствовали замеренным в каждой точке системы, где есть замер.

Одним из основных требований к настройке модели системы ППД является использование тех же значений входных параметров (расходы воды, свойства закачиваемой воды), на которые настраивались модели скважин.

При настройке системы ППД основным адаптируемым параметром являлся поправочный коэффициент на трение (Friction Coefficient). Этот коэффициент отвечает за потери давления в системе за счёт местных сопротивлений: износ трубопроводов, стыки, переходы, отводы, врезки, задвижки, различные отложения и т. д.

Вероятными причинами отклонений фактического перепада давления от рассчитанного по корреляции являются [15, 16]:

1) некорректные замеры давлений и/или расходов воды. На месторождении отсутствуют манометры в промежуточных точках системы ППД, замеры в постоянном режиме ведутся только на блоке гребенки и водозаборных скважинах. При следующем обновлении модели рекомендуется

выполнить замеры давлений на дату актуализации в промежуточных точках системы ППД для повышения точности настройки модели;

- 2) неучтенные в модели дополнительные сопротивления (не до конца открыта задвижка, коррозия, в трубопроводе присутствуют отложения механических примесей, солей и др.).

В дальнейшем при обновлении модели следует обратить особое внимание на эти участки, а также провести по ним поиск причин повышенных перепадов давлений [17].

При настройке модели ССiT на температуру граничными условиями является температура флюида на устье скважины. При настройке модели ППД на температуру граничными условиями является температура жидкости на ДНС (блок гребенки) [18]. Для этого используются следующие параметры: в трубопроводах – температура окружающей среды вокруг трубы, общий коэффициент теплопередачи, теплоемкостные свойства нефти, газа и воды, в скважинах (источниках) – температура флюида на устье скважины.

Температура окружающей среды вокруг трубопровода принимается на основании справочных данных по средней температуре грунта на глубине 1,6 м за летний/зимний период.

Общий коэффициент теплопередачи задается вручную либо рассчитывается автоматически. При расчете учитывается геология грунта, температура окружающей среды вокруг трубопровода, диаметр трубопровода, температура перекачиваемого флюида, среда эксплуатации трубопровода (вода, воздух, земля), материал изоляции, а также теплоемкостные свойства всех материалов и флюида [19, 20].

Результаты

Вышеописанная методика по настройке моделей добывающих и нагнетательных скважин, ССiT и системы ППД позволяет определить оптимальные режимы эксплуатации для достижения максимальной производительности и эффективности добычи. По результатам адаптации моделей на фактические данные был достигнут необходимый уровень схожести. Кроме того, корректный подход к созданию моделей дает возможность проводить оптимизационные расчеты для перераспределения объемов закачки воды/газа в нагнетательные скважины таким образом, чтобы увеличить коэффициент извлечения нефти и продлить срок рентабельной добычи.

Примером успешной практики применения оптимизационных расчетов на моделях скважин,

ССiT и системы ППД является работа по построению интегрированной модели пилотного участка Южно-Ягунского месторождения (ООО «Лукойл-Западная Сибирь»). В результате опытно-промышленных испытаний были получены рекомендации программного обеспечения по перераспределению объемов закачиваемой воды по части нагнетательных скважин месторождения (таблица), что позволило увеличить абсолютную добычу нефти за 5 лет на 3 % (относительно первоначальных расчетов).

Таблица. Перераспределение объемов закачки воды по кустовым площадкам пилотного участка Южно-Ягунского месторождения

Table. Redistribution of water injection volumes across the cluster sites of the pilot area of the Yuzhno-Yagunske field

Скважина, № Well no.	Объем закачки воды, м³/сут Water injection volume, m³/day	
	до/before	после/after
2011	135	144
2013	142	159
2014	210	225
2015	11	45
2016	25	58
2017	83	108
Итого/Total	606	739

Заключение

Предложенная методика адаптирует компоненты интегрированной модели с точностью $\pm 95\%$, что позволяет с высокой точностью моделировать различные режимы работы месторождения для поиска оптимального. В результате анализа были выявлены критерии настройки, а также представлен минимальный необходимый набор параметров для качественной адаптации моделей.

Научная новизна работы заключается в формировании подхода к настройке и адаптации моделей добывающих и нагнетательных скважин, ССiT и системы ППД. В ходе проведенной работы был получен результат о том, что корректная настройка позволяет получить реальный эффект в виде дополнительной добычи нефти за счет перераспределения закачки и более интенсивного вытеснения коллекторных флюидов.

На основании проделанной работы можно сделать вывод о том, что использование интегрированной модели позволяет оптимально подходить к режиму разработки месторождения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Применение интегрированного моделирования в нефтегазовой отрасли / Е.В. Филиппов, Г.Н. Чумаков, И.Н. Пономарева, Д.А. Мартюшев // Недропользование. – 2020. – Т. 20. – № 4. – С. 386–400.
2. Особенности разработки месторождений высоковязкой нефти в условиях низкого пластового давления / А.Н. Иванов, М.М. Велиев, Э.М. Велиев, Л.С. Кулешова, Е.А. Удалова // Нефтяное хозяйство. – 2021. – № 8. – С. 50–52.

3. Повышев К.И., Вершинин С.А., Берниковская О.С. Комплексная модель «Пласт–Скважина–Инфраструктура» и ее возможности // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. – 2016. – № 2. – С. 48–53.
4. Интегрированное моделирование-инструмент повышения качества проектных решений для разработки нефтяных оторочек многопластовых нефтегазоконденсатных месторождений / Р.Т. Апасов, И.Л. Чамеев, А.И. Варавва, О.С. Верниковская, А.Р. Ильясов, В.И. Вирт // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 12. – С. 46–49.
5. Яночкин С.В., Рычков А.Ф. Интегрированное моделирование. Опыт реализации пилотных проектов // Нефть. Газ. Новации. – 2018. – № 12. – С. 29–30.
6. Проблемы расчетов промысловых систем сбора и транспорта добываемой продукции месторождений высоковязкой нефти / М.М. Велиев, А.Н. Иванов, А.Г. Ахмадеев и др. // Нефтяное хозяйство. – 2021. – № 10. – С. 108–111.
7. Интегрированное моделирование как инструмент, повышающий эффективность разработки многопластового нефтегазоконденсатного месторождения / Е.В. Богданов, И.Л. Чамеев, Д.А. Решетников, И.В. Первозкин, А.В. Ткачук, А.Н. Шорохов // Нефтяное хозяйство. – 2019. – № 12. – С. 52–55.
8. Рычков А.Ф., Кадыков И.А. Построение интегрированных моделей месторождений с высокопродуктивными скважинами, в условиях малых значений депрессий на пласт на примере Памятно-Сасовского месторождения // Сб. статей VII Конференции молодых ученых и специалистов Головного офиса ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг». – М., 2018. – С. 664–673.
9. Bandilla K.W., Guo B., Celia M.A. Applicability of vertically integrated models for carbon storage modeling in structured heterogeneous domains // Energy Procedia. – 2017. – Vol. 114. – P. 3312–3321.
10. Towards the development of an integrated modelling framework underpinned by mineralogy / S. Ntlhabane, M. Becker, E. Charikinya, M. Voight, R. Schouwstra, D. Bradshaw // Minerals Engineering. – 2018. – Vol. 116. – P. 123–131.
11. Создание и эксплуатация интегрированной модели, учитывающей особенности газоконденсатной залежи / В.Г. Зипир, А.Г. Менгалиев, А.Г. Рясный, М.Н. Курбатова, О.М. Рудая // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 10. – С. 159–168.
12. Liu C., Li Y., Xu M. An integrated detection and location model for leakages in liquid pipelines // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – Vol. 175. – P. 852–867.
13. An integrated model for asphaltene deposition in wellbores/pipelines above bubble pressures / Q. Guan, A. Goharzadeh, J. Chai, F.M. Vargas, S.L. Biswal, W.G. Chapman, M. Zhang, Y.F. Yap // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – Vol. 169. – P. 353–373.
14. An integrated simulation model for analysing electricity and gas systems / B.C. Erdener, K.A. Pambour, R.B. Lavin, B. Dengiz // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2014. – Vol. 61. – P. 410–420.
15. Integrated field operation and optimization / S.D. Rahmawati, C. Whitson, B. Foss, A. Kuntadi // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2012. – Vol. 81. – P. 161–170.
16. Margaret A.W. Modelling and forecasting the supply of oil and gas: a survey of existing approaches // Journal of Resources and Energy. – 1992. – Vol. 14. – P. 287–309.
17. Aydin G. Production modeling in the oil and natural gas industry: an application of trend analysis // Journal of Petroleum Science and Technology. – 2014. – Vol. 32. – P. 555–564.
18. Технология бинарных смесей как современный комплексный метод увеличения нефтеотдачи для разработки трудноизвлекаемых запасов на месторождениях Западной Сибири / Р.Н. Коротков, А.А. Коновалов, Д.М. Овчаренко, В.И. Ерофеев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 9. – С. 146–153. DOI: 10.18799/24131830/2023/9/4176
19. Коротков Р.Н., Овчаренко Д.М., Ерофеев В.И. Настройка модели пласта методом материального баланса в программном обеспечении petroleum experts MBAL. Настройка интегрированной модели в GAP // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 2. – С. 133–140. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4434.
20. Коротков Р.Н., Овчаренко Д.М., Ерофеев В.И. Использование программного обеспечения Petroleum Experts Prosper для получения дополнительной добычи нефти путем анализа режима работы скважин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 3. – С. 31–39. DOI: 10.18799/24131830/2024/3/4457.

Информация об авторах

Роман Николаевич Коротков, аспирант отделения нефтегазового дела Школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. klimatqwf@gmail.com; <http://orcid.org/0009-0000-5118-9198>

Диана Маратовна Овчаренко, магистрант отделения нефтегазового дела Школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. dmo4@tpu.ru; <http://orcid.org/0009-0009-5799-2972>

Владимир Иванович Ерофеев, доктор технических наук, профессор отделения нефтегазового дела Школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. erofeevvi@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0001-5153-887X>

Поступила в редакцию: 26.02.2024

Поступила после рецензирования: 14.03.2024

Принята к публикации: 26.04.2024

REFERENCES

1. Filippov E.V., Chumakov G.N., Ponomareva I.N., Martyushev D.A. Application of integrated modeling in the oil and gas industry. *Nedropolzovanie*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 386–400. (In Russ.)
2. Ivanov A.N., Veliev M.M., Veliev E.M., Kuleshova L.S., Udalova E.A. Features of the development of high-viscosity oil fields under conditions of low reservoir pressure. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2021, no. 8, pp. 50–52. (In Russ.)
3. Povyshev K.I., Vershinin S.A., Bernikovskaya O.S. Integrated model "reservoir–well–infrastructure" and its capabilities. *PRONEFT. Professionalno o nefti*, 2016, no. 2, pp. 48–53. (In Russ.)
4. Apasov R.T., Chameev I.L., Varavva A.I., Vernikovskaya O.S., Ilyasov A.R., Virt V.I. Integrated modeling as a tool for improving the quality of design solutions for the development of oil rims of multilayer oil and gas condensate fields. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2018, no. 12, pp. 46–49. (In Russ.)
5. Yanochkin S.V., Rychkov A.F. Integrated modeling. Experience in implementing pilot projects. *Neft. Gaz. Novatsii*, 2018, no. 12, pp. 29–30. (In Russ.)
6. Veliev M.M., Ivanov A.N., Akhmadeev A.G. Problems of calculations of field systems for collecting and transporting produced products from high-viscosity oil fields. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2021, no. 10, pp. 108–111. (In Russ.)
7. Bogdanov E.V., Chameev I.L., Reshetnikov D.A., Perevozkin I.V., Tkachuk A.V., Shorokhov A.N. Integrated modeling as a tool that increases the efficiency of the development of a multilayer oil and gas condensate field. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2019, no. 12, pp. 52–55. (In Russ.)
8. Rychkov A.F., Kadykov I.A. Building integrated models of fields with highly productive wells under conditions of low reservoir pressure drawdowns on the example of the Pamyatno-Sasovskoye field. *Proc. of the VII Conference of Young Scientists and Specialists of the Head Office of OOO LUKOIL-Engineering*. Moscow, 2018, pp. 664–673. (In Russ.)
9. Bandilla K.W., Guo B., Celia M.A. Applicability of vertically integrated models for carbon storage modeling in structured heterogeneous domains. *Energy Procedia*, 2017, no. 114, pp. 3312–3321.
10. Ntlhabane S., Becker M., Charikinya E., Voight M., Schouwstra R., Bradshaw D. Towards the development of an integrated modelling framework underpinned by mineralogy. *Minerals Engineering*, 2018, no. 116, pp. 123–131.
11. Zipir V.G., Mengaliev A.G., Ryasny A.G., Kurbatova M.N., Rudaya O.M. Creation and exploration of the integrated model, taking into account the features of the gas condensate deposit. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 10, pp. 159–168. (In Russ.)
12. Liu C., Li Y., Xu M. An integrated detection and location model for leakages in liquid pipelines. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, no. 175, pp. 852–867.
13. Guan Q., Goharzadeh A., Chai J., Vargas F.M., Biswal S.L., Chapman W.G., Zhang M., Yap Y.F. An integrated model for asphaltene deposition in wellbores/pipelines above bubble pressures. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, no. 169, pp. 353–373.
14. Erdener B.C., Pambour K.A., Lavin R.B., Dengiz B. An integrated simulation model for analysing electricity and gas systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2014, no. 61, pp. 410–420.
15. Rahmawati S.D., Whitson C., Foss B., Kuntadi A. Integrated field operation and optimization. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2012, no. 81, pp. 161–170.
16. Margaret A.W. Modelling and forecasting the supply of oil and gas: a survey of existing approaches. *Journal of Resources and Energy*, 1992, vol. 14, pp. 287–309.
17. Aydin G. Production modeling in the oil and natural gas industry: an application of trend analysis. *Journal of Petroleum Science and Technology*, 2014, no. 32, pp. 555–564.
18. Korotkov R.N., Kononov D.M., Ovcharenko D.M., Erofeev V.I. Binary mixture technology as a modern complex method of increasing oil recovery for the development of hard-to-recover reserves in the fields of Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 9, pp. 146–153. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2023/9/4176.
19. Korotkov R.N., Ovcharenko D.M., Erofeev V.I. Adjustment of a reservoir model by the material balance method in the petroleum experts MBAL program. Setting up the integrated model in GAP. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 2, pp. 133–140. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4434.
20. Korotkov R.N., Ovcharenko D.M., Erofeev V.I. Use of Petroleum Experts Prosper software to obtain additional oil production by analysis of well operation mode. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 3, pp. 31–39. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2024/3/4457.

Information about the authors

Roman N. Korotkov, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. klimatqwf@gmail.com; <http://orcid.org/0009-0000-5118-9198>

Diana M. Ovcharenko, Master Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. dmo4@tpu.ru; <http://orcid.org/0009-0009-5799-2972>

Vladimir I. Erofeev, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. erofeevvi@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0001-5153-887X>

Received: 26.02.2024

Revised: 14.03.2024

Accepted: 26.04.2024

УДК 504.064.45
DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4607
Шифр специальности ВАК: 2.4.6

Совершенствование технологий утилизации отходов нефтепродуктов

Т.А. Кулагина[✉], О.Г. Дубровская, Е.Н. Зайцева, Р.Н. Крылышкин

Сибирский федеральный университет, Россия, г. Красноярск

[✉]tak.sfu@gmail.com

Аннотация. Актуальность. В настоящее время особое значение приобретает рациональное и экономное использование нефтепродуктов. Это относится, в том числе, и ко всем известным видам масел. Отработанные масла, попадающие в окружающую природную среду, лишь частично обезвреживаются в результате естественных процессов. Большая их часть является источником загрязнения почв, водных объектов и атмосферного воздуха, приводя к нарушению воспроизводства птиц, рыб, млекопитающих, оказывая вредное воздействие на человека. Таким образом, повсеместная проблема сбора и утилизации отработанных нефтепродуктов является актуальной, рентабельной и наукоемкой областью, так как при правильной организации процесса регенерации стоимость восстановленных масел на 40–70 % ниже стоимости свежих масел при практически одинаковом их качестве. **Цель.** Цель работы заключается в совершенствовании технологии утилизации отработанных нефтепродуктов в условиях северных территорий для достижения эко- и энергоэффективности. Отработанные масла после этапа регенерации могут использоваться по прямому назначению – возвращаться в системы смазки оборудования, это до 70–80 % от исходного количества образующегося отработанного масла. Оставшееся, «невосстановленное», в количестве 20–30 % – сжигаться в виде водотопливной смеси на предприятиях, оборудованных котлами на жидком топливе. Имеющихся в литературных источниках сведений недостаточно для создания эффективной системы утилизации отработанных масел и других нефтепродуктов особенно в условиях циркумполярных территорий. Требуется дифференцированный подход к проблеме с учетом особенностей климата, удаленности арктических территорий от транспортных инфраструктур с обязательным соблюдением регламентов защиты окружающей среды. **Методы.** Кавитационная технология (эффекты кавитации) и метод глубокого обучения LSTM (Long Short-Term Memory) для обработки отходов углеводородов на примере индустриального масла W30 и, соответственно, моделирование миграции поллютантов от промышленных объектов в открытых природных водных источниках. **Результаты и выводы.** Полученные результаты говорят о том, что комплексное использование сырья – это результат наиболее полного, экономически и экологически оправданного использования всех полезных компонентов, содержащихся в сырье, а также в отходах производства. Любые углеводородные отходы можно рассматривать в качестве вторичных материальных ресурсов, которые допустимо использовать в хозяйственных целях, частично или полностью замещая традиционные виды материально-сырьевых и топливно-энергетических ресурсов, главной ценностью которых является их постоянная воспроизводимость в производственном секторе.

Ключевые слова: нефтесодержащие отходы, утилизация, кавитационное воздействие, энергетические ресурсы, окружающая природная среда

Для цитирования: Совершенствование технологий утилизации отходов нефтепродуктов / Т.А. Кулагина, О.Г. Дубровская, Е.Н. Зайцева, Р.Н. Крылышкин // Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 6. – С. 46–54. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4607

UDC 504.064.45
DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4607

Improvement of technologies for recycling waste petroleum

T.A. Kulagina[✉], O.G. Dubrovskaya, E.N. Zaytseva, R.N. Krylyshkin

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

[✉]tak.sfu@gmail.com

Abstract. Relevance. Currently, the rational and economical use of petroleum products is of particular importance. This applies, among other things, to all known types of oils. Waste oils entering the natural environment are only partially neutralized as a result of natural processes. Most of them are a source of pollution of soils, water bodies and atmospheric air, leading to disruption of the reproduction of birds, fish, mammals, and having a harmful effect on humans. Thus, the widespread problem of collecting and recycling waste petroleum products is a relevant, cost-effective and knowledge-intensive area; since with the correct organization of regeneration, the cost of recovered oils is 40–70% lower than the cost of fresh oils with almost the same quality. **Aim.** To improve the technology of recycling spent petroleum products in the conditions of the northern territories in order to achieve eco- and energy efficiency. After the regeneration stage, used oils can be used for their intended purpose – returned to equipment lubrication systems, this is up to 70–80% of the original amount of waste oil generated. The remaining, “unrecovered” amount of 20–30% is burned in the form of a water-fuel mixture at enterprises equipped with liquid fuel boilers. The information available in the literature is insufficient to create an effective system for the disposal of used oils and other petroleum products, especially in the circumpolar territories. A differentiated approach to the problem is required, taking into account the peculiarities of the climate, the remoteness of the Arctic territories from the transport infrastructure, with mandatory compliance with environmental standards. **Methods.** Cavitation technology (i. e. cavitation effects) and the LSTM (Long Short-Term Memory) deep learning method for processing hydrocarbon waste using the example of industrial oil W30 and, accordingly, modeling the migration of pollutants from industrial objects in open natural water sources. **Results and conclusions.** The results obtained indicate that the integrated use of raw materials is the result of the most complete, economically and environmentally justified application of all advantageous components contained in raw materials, as well as in production waste. Any hydrocarbon waste can be considered as secondary material resources that can be used for economic purposes, partially or completely replacing traditional types of material, raw materials and fuel and energy resources, the main value of which is their constant reproducibility in the production sector.

Keywords: oily waste, recycling, cavitation effects, energy resources, natural environment

For citation: Kulagina T.A., Dubrovskaya O.G. Zaytseva E.N., Krylyshkin R.N. Improvement of technologies for recycling waste petroleum. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 6, pp. 46–54. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4607

Введение

Ежегодно в России потребляется порядка 1,85 млн т масел, при этом собирается всего около 500 тыс. Согласно действующему Временному положению об организации сбора и рационального использования отработанных нефтепродуктов величина среднего показателя норматива сбора по отработанным маслам составляет 0,5. То есть от годового количества потребления сбор должен составлять 925 тыс. т отработанного масла. Существующие в стране легальные мощности по утилизации [1] готовы ежегодно перерабатывать около 100 т, а значит, не учтенными остаются порядка 400 т нефтепродуктов.

Отработанные нефтяные масла и смазочные материалы, не вовлеченные в процесс утилизации [2], попадают в незаконный оборот топливных продуктов, которые, являясь преимущественно отходами 3-го класса опасности, сжигаются, загрязняя окружающую среду бесконтрольными выбросами опасных продуктов горения [3].

По данным источника [4] более благополучные ситуации с отработанными нефтепродуктами складываются:

- в европейской части страны (Вологодская, Курская, Смоленская, Саратовская области, республика Коми, республика Татарстан и пр.), где осуществляется сбор и накопление масел;
- Красноярском и Краснодарском крае, Волгоградской, Иркутской, Томской, Новосибирской и Амурской областях – сбор и утилизация.

В республике Удмуртия, Омской области, Алтайском и Приморском крае ведутся поиск и переговоры с потенциальными партнерами переработчиками.

Количественные показатели сбора отработанных масел от объемов потребляемого исходного смазочного материала по субъектам РФ складываются так (%):

- Центральный – 150,8;
- Приволжский – 108,8;
- Уральский – 102,1;
- Сибирский – 70,4;
- Северо-западный – 58,5;
- Южный – 56,3;
- Дальневосточный – 29,1.

Ту же величину сбора, но относительно сфер образования отработанных масел можно представить так (%):

- промышленность – 290,6;
- физические лица – 68,5;
- строительство – 47,8;
- автомобильный транспорт – 37,3;
- сельское хозяйство – 35,1;
- армия – 13,1;
- ж/д транспорт – 8,8;
- флот – 5,4;
- авиация – 4,4;
- прочее – 65,3;

Экологически безопасное использование отработанных смазочных материалов предполагает их

переработку с получением товарных продуктов самого различного назначения (топлив, масел, пластичных смазок, СОТС, консервационных материалов и др.) [5]. Современное состояние вопроса безопасной утилизации сталкивается с трудностями и в теории, и на практике [6].

Восстановленное топливо не уступает качеству первично изготовленного, в отработанном масле доля содержания ценных углеводородов достаточно высока [7]. Из отработок удаляются механические примеси, продукты окисления, а глубина очистки дает максимальный выход базового масла [8].

Оптимальный метод утилизации должен сочетать в себе следующие характеристики:

- высокое качество очистки;
- экономичность технологии;
- возможность переработки максимального объема отработанного масла;
- минимально возможная продолжительность процесса;
- максимальная автоматизация производственных операций;
- безопасность для человека и окружающей среды;
- получение вторичного сырья, востребованного на рынке [9].

Отработанные масла после этапа регенерации могут использоваться по прямому назначению – возвращаться в системы смазки оборудования, это до 75–80 % от исходного количества образующегося отработанного масла, оставшееся, «невосстановленное», в количестве 20–25 % – сжигаться в виде водотопливной смеси на предприятиях, оборудованных котлами на жидком топливе. Действующие требования Росприроднадзора по прекращению бесцельного сжигания отработанных масел ставят задачу получения из отработанных промышленных масел двух видов товарного продукта: исходного масла и топлива.

Специфические свойства водотопливной смеси определяются свойствами составляющих системы жидкость–жидкость [10]. Углеводородсодержащие отходы [11] характеризуются повышенной вязкостью, наличием крупных и абразивных частиц дисперсной фазы, склонной к образованию осадков [12], и рядом других отклонений от стандартных топлив, препятствующих использованию этих топлив вместо топливного мазута без специальной обработки [13].

Кавитационная обработка [14], способствующая активации жидких сред [15], изменяющая свойства и интенсифицирующая химико-технологические процессы, может применяться как непосредственно к отработанным промышленным маслам с целью улучшения их физико-химических характеристик [16] и к водотопливным смесям для создания

устойчивых эмульсий [17], так и к воде, изменяя ее физико-химическое состояние.

Целью работы было оценить влияние кавитационного воздействия на свойства отработанных промышленных масел и их возможный возврат в хозяйственную деятельность предприятий, а также воды и её структурных изменений до и после заморозки для эффективного использования при создании водотопливных эмульсий для сжигания в малых котельных районах Крайнего севера.

Материалы и методы

В эксперименте исследовалась активированная вода до и после замораживания, а также три пробы промышленного масла W30:

- исходное матричное масло – проба № 1;
- отработанное масло – проба № 2;
- отработанное масло после кавитационного воздействия – пробы № 3а и 3б.

Двенадцать проб воды, каждая по 500 мл, подверглись кавитационной обработке: время обработки 1, 3, 5 и 10 мин, скорость вращения кавитатора в каждом случае составляло 5, 10 и 15 тыс. оборотов в мин. Следом за каждым воздействием проба анализировалась по величине водородного показателя pH, удельной электропроводности (УЭП), температуре. После поочередной разморозки у исследуемых образцов измерялись следующие параметры:

- для воды – водородный показатель pH, УЭП, солесодержание, жесткость, щелочность и температура;
- для отработанного масла – водородный показатель, вязкость и коэффициент фильтрации.

Исследования проводились с использованием следующего оборудования: термометр лабораторный ТЛ-4, pH-метр/ионизметр ИТАН, кондуктометр МАРК 603, вискозиметр ВПЖТ-1, фильтрационный аппарат УОФТ, морозильная камера Бирюса. Для определения жесткости воды использовались МУ 08-47/234, щелочности МУ 08-47/232. Кавитационная обработка выполнялась на установках двух типов: ультразвуковым генераторе и суперкавитационном миксере марка Silverston 5L.

Работа с отработанным маслом проводилась в два этапа:

- 1) для исходного и отработанного масла были определены параметры вязкости, значение pH и коэффициенты фильтрации;
- 2) отработанное масло, представленное пробой № 2, подвергли кавитационной обработке двумя способами: ультразвуковой, мощностью 400 Гц, и в суперкавитационном миксере при числе оборотов ротора 7600 об/мин, с последующим определением заявленных ранее физико-химических характеристик. Время обработки составило, соответственно: 5, 7, 10 и 15 мин.

Результаты исследования и их обсуждение

Значения показателей и анализируемых данных по активированной воде представлены в табл. 1. Графическую зависимость полученных числовых значений параметров активированной воды после заморозки можно увидеть на рис. 1.

При работе любые виды смазочных материалов соприкасаются с металлами, подвергаются воздействию температуры, давления, кислорода воздуха, минеральных примесей и других факторов, под влиянием которых с течением времени происходит изменение свойств масла, называемое старением (табл. 2) [13].

Кавитационная обработка отработанных промышленных масел способствовала изменению их физико-химических свойств: вязкости, величины водородного показателя, минерального состава, что подтверждается следующими результатами.

Показатели вязкости заявленных образцов (табл. 3) исходного и отработанного масел были определены по формуле (1) по ГОСТ 33-2016:

$$\nu = Ct_{cp}, \quad (1)$$

где C – постоянная вискозиметра, $\text{мм}^2/\text{с}^2$; t_{cp} – среднеарифметическое значение времени обработки, с.

Величина вращения ротора суперкавитационного миксера

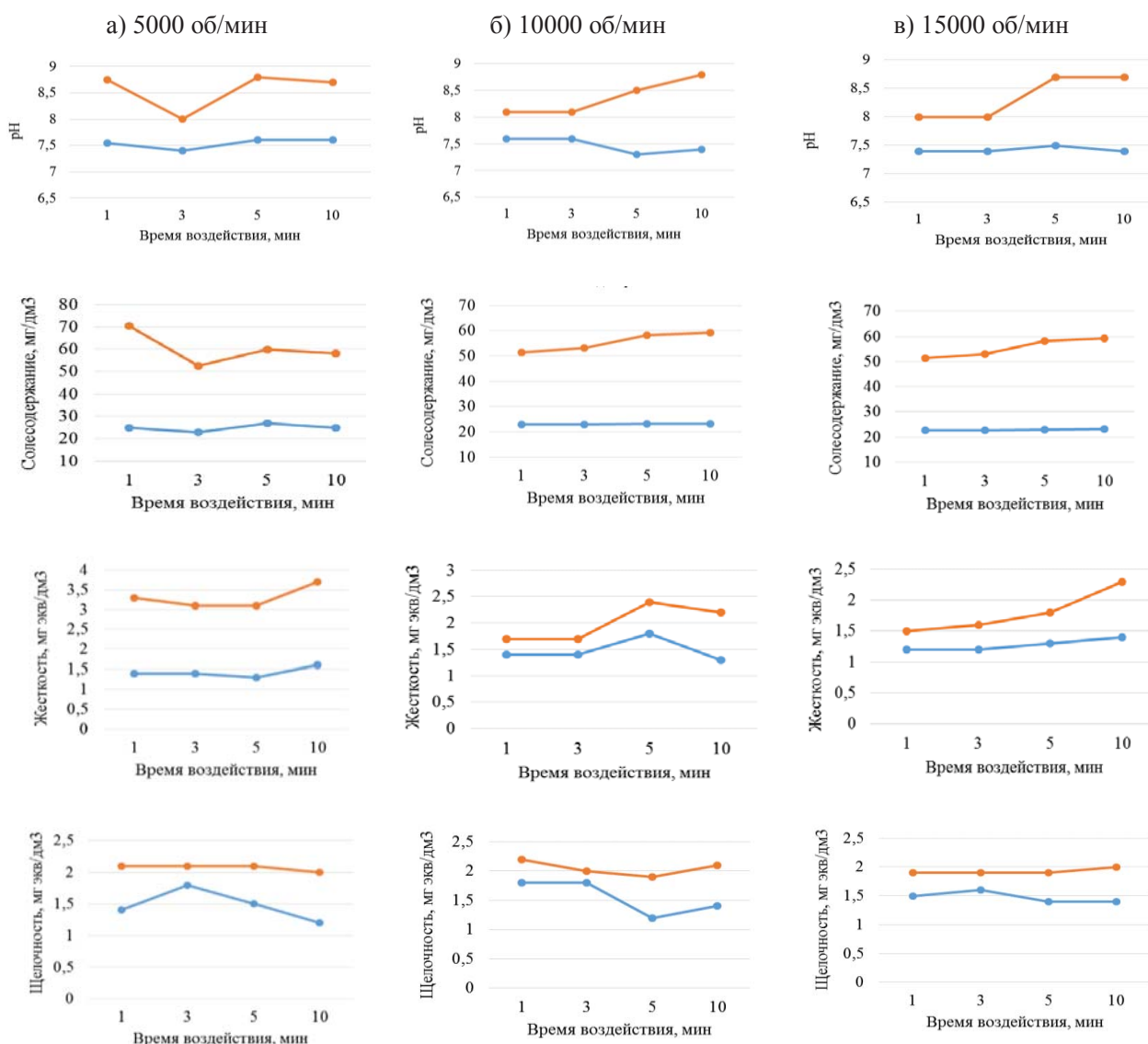


Рис. 1. Зависимости физико-химических параметров воды от времени кавитационной обработки: —●— кавитированная вода после разморозки; —●— кавитированная вода до заморозки

Fig. 1. Dependences of physical and chemical parameters of water on cavitation treatment time: —●— cavitated water after defrost; —●— cavitated water before freezing

Таблица 1. Результаты измерений

Table 1. Measurement results

№ пробы Sample no.	Обороты, тыс./мин Turnovers, ths/min	Время, мин. Time, min.	pH	УЭП (МАРК 603) UEP (MARK 603)	t, °C	№ пробы Sample no.	Обороты, тыс./мин Turnovers, ths/min	Время, мин. Time, min.	pH	УЭП (МАРК 603) UEP (MARK 603)	t, °C
1	15	1	8,7	114	30,5	7	15	5	9,4	116	27,5
2	10	1	8,1	121	24	8	10	5	9,4	125	25
3	5	1	8,2	131	22,5	9	5	5	8,7	128	24
4	15	3	9,1	134	29	10	15	10	10	152	28
5	10	3	9,3	130	24,5	11	10	10	10,2	129	25
6	5	3	9,3	111	23	12	5	10	9,3	133	24
солеосодержание – менее 1 гр/дм ³ щелочность – не менее 0,5 мг-экв/дм ³ жесткость – 0–4 мг-экв/дм ³						salt content – less than 1 g/dm ³ alkalinity – not less than 0.5 mg-eq/dm ³ hardness – 0–4 mg-eq/dm ³					

Таблица 2. Характеристика масел марки W30

Table 2. Characteristics of W30 oils

Образец (цветность) Sample (color)	Вязкость, ν (40 °C), мм ² /с Viscosity, ν (40°C), mm ² /s	Кислотное число, KOH/г Acid number, KOH/g	Температура застывания, °C Solidification temperature, °C	Плотность при 20 °C, кг/м ³ Density at 20°C, kg/m ³	Элементарный состав, мас. % Elemental composition, wt %				
					C	H	N	S	O
A	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Матричное масло (светло-желтое) Matrix oil (light yellow)	3,0250	9	-15,2	865	85,9	15,7	0,10	0,20	0,10
Отработанное масло (темно-коричневое) Used oil (dark brown)	3,2667	12	-11,9	905	87,4	11,2	0,31	0,41	2,65

Таблица 3. Значения вязкости тестируемых образцов

Table 3. Viscosity values of the tested samples

Номер пробы Sample no.	Время обра- ботки, с Processing time, s	Среднеарифметическая величина обработки, с Arithmetic mean value of processing, s	Постоянная вискози- метра, мм²/с² Viscometer constant, mm²/s²	Кинематическая вязкость, ν мм²/с при t=23,8 °C Kinematic viscosity, ν mm²/s at t=23,8 °C	Класс вязкости по ISO 3448 Viscosity class to ISO 3448
№ 1	31,33	31,17	0,09705	3,0250	3 (ν_{cp} =2,88–3,52 мм²/с) (ν_{cr} =2.88–3.52 mm²/s)
	31,30				
	30,87				
№ 2	33,79	33,66		3,2667	
	33,34				
	33,86				

Величина водородного показателя этих же образцов составила:

- проба № 1 pH=8,85;
- проба № 2 pH=9,71.

Коэффициент фильтрации масла K находится по формуле (2) по ГОСТ 19006-73:

$$K = \frac{t_2}{t_1}, \quad (2)$$

где t_1 – время фильтрации первых двух см³ масла;
 t_2 – время фильтрации последних двух см³ масла.

Начальные два см³ масла в первой пробе фильтровались в течение 15,19 с, последние – в течение 62,56 с, т. е. коэффициент фильтрации по формуле (2) равен 4,12. Для второй пробы:

$$K = \frac{485,62}{16,24} = 29,9.$$

Увеличение коэффициентов фильтрации в отработанном масле более чем в 7 раз свидетельствует о присутствии тяжелых загрязнителей, таких как смолистые вещества, механические примеси и пр.

Далее, отработанное масло пробы № 2 подвергли кавитационной обработке на двух типах установок: ультразвуковой и гидродинамической. Для дальнейшего исследования получили серии проб с результатами в зависимости от типа установки (табл. 4).

Таблица 4. Полученные результаты тестируемых образцов

Table 4. Obtained results of tested samples

Тип кавитационного воздействия Type of cavitation impact	Ультразвуковой Ultrasonic												Суперкавитационный Supercavitation											
Время, мин Time, min	5			7			10			15			5			7			10			15		
Время истечения, с Expiration time, s	43,73	44,04	44,18	48,54	47,84	48,10	48,59	48,94	49,09	49,07	48,66	48,92	46,09	47,37	47,61	48,61	47,01	48,27	49,51	47,93	49,45	49,66	48,07	49,79
t_{cp} , с (s)	43,98			48,16			48,87			48,88			47,02			47,96			48,96			49,17		
C , мм ² /с ² mm ² /s ²	0,09705																							
ν , мм ² /с (при $t=23,8^{\circ}\text{C}$) ν , mm ² /s (at $t=23,8^{\circ}\text{C}$)	4,2683			4,6730			4,7428			4,7438			4,5633			4,6545			4,7515			4,7719		
pH	8,20			7,92			7,80			7,63			8,21			8,06			7,70			7,47		
5 класс вязкости по ISO 3448 ($\nu_{cp}=4,14-5,06$ мм ² /с) Viscosity class 5 according to ISO 3448 ($\nu_{cp}=4.14-5.06$ mm ² /s)																								

Результаты исследования говорят о том, что процесс кавитации позволяет поднять класс вязкости отработанного масла с 3 до 5 (рис. 2), то есть оно становится гуще, плотнее, а следовательно, увеличиваются максимальные нагрузки, при которых масла сохраняют свои свойства. Графическое сравнение полученных результатов можно увидеть на рис. 2, 3.

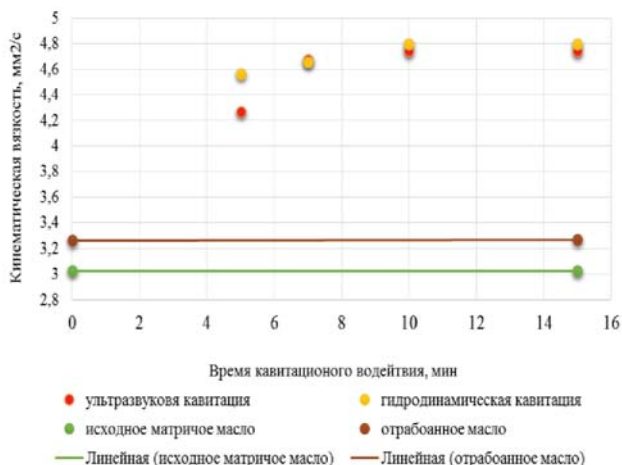


Рис. 2. Сравнение показателей вязкости масла – исходного, отработанного и после кавитационного воздействия

Fig. 2. Comparison of oil viscosity indicators – original, used and after cavitation exposure

Кроме того, величина водородного показателя проб, подвергшихся кавитации, находится в диапазоне 6–8 (рис. 3), что является оптимальным даже для исходных матричных масел. В отличие от проб

№ 1, 2, где в первом случае масло содержит присадки, а во втором закишен в процессе эксплуатации оборудования.

Полученные данные и наблюдения за фильтрацией проб № 1, 2 (табл. 3) дают понимание о наличии в отработанном масле осадка, содержащего минеральные примеси, свинец, продукты износа деталей оборудования и т. д. У отработанного масла после кавитационной обработки визуально наблюдается эффект выпадения осадка и присутствия запаха серы уже спустя 10 минут от начала воздействия.

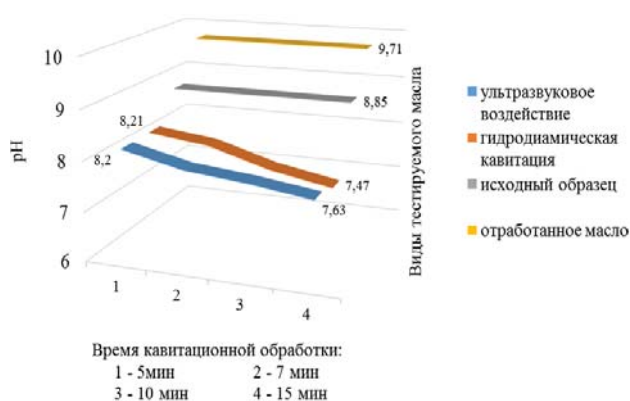


Рис. 3. Результаты определения величины водородного показателя pH

Fig. 3. Results of determining the pH value

Таким образом, получая повышенный класс вязкости по ISO 3448 восстановленного масла, и с учетом наличия осадка в тестируемом образце [18], было найдено оптимальное соотношение получае-

мого полезного продукта после кавитационной обработки: 70–80 % идет на повторное использование в хозяйственной деятельности, оставшаяся доля в количестве 20–30 % углеводородного осадка может быть отправлена на сжигание, при обязательном условии создания кавитационно обработанной ВТС с содержанием воды до 10–15 % [19].

Заключение

Эффективность утилизации отработанных масел и других нефтепродуктов в условиях Крайнего Севера может быть достигнута с учетом комплексного подхода за счет использования эффектов гидродинамического воздействия.

Полученные результаты дают право утверждать, что размороженная активированная вода сохраняет свои приобретенные физико-химические свойства. Перевод кавитационно обработанной воды в твердое агрегатное состояние делает возможным ее до-

ставку на удаленные расстояния. Ее естественное замерзание в районах с низкими температурами не будет носить фатального характера, и она может использоваться для создания водотопливных эмульсий на предприятиях, работающих на жидком топливе.

Комплексное потребление ресурсов – это результат наиболее полного, экономически и экологически оправданного использования всех полезных компонентов, содержащихся в сырье, а также в отходах производства [20]. Любые углеводородные отходы можно рассматривать в качестве вторичных материальных ресурсов, которые допустимо использовать в хозяйственных целях, частично или полностью заменяя традиционные виды материально-сырьевых и топливно-энергетических ресурсов, главной ценностью которых является их постоянная воспроизводимость в производственном секторе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крапивский Е.И. Нефтьшламы: уничтожение, утилизация, дезактивация: монография. – М.; Вологда: Инфра Инженерия, 2021. – 432 с.
2. Технологические аспекты экологически безопасной утилизации отработанных масел / О.П. Филиппова, С.З. Калаева, Э.С. Цховребов, Е.С. Сергеев // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Строительство. Электротехника и химические технологии. – 2023. – № 4 (20). – С. 91–96.
3. Chenavaz R.Y., Dimitrov S. From waste to wealth: policies to promote the circular economy // Journal of Cleaner Production. – 2024. – Vol. 443. – P. 1–11.
4. Кулагин В.А., Кулагина Л.В., Штым К.А. Перспективы развития кавитационных технологий: теория и практика // Безопасность и мониторинг природных и техногенных систем. – Новосибирск: ФИЦ ИВТ, 2023. – С. 51–55.
5. Крылышкин Р.Н., Гурина Р.В. Энергоэффективность термической утилизации нефтяных остатков // Енисейская теплофизика: Тезисы докладов I Всероссийской научной конференции с международным участием. – Красноярск: СФУ, 2023. – С. 372–373.
6. Штриплинг Л.О. Переработка и утилизация нефтьшламов и нефтезагрязненных материалов, образующихся в местах добычи, транспортировки и переработки углеводородного сырья: монография / под ред. Н.А. Лившиц. – Новосибирск: Изд-во Сибирского отделения Российской акад. наук, 2013. – 174 с.
7. Кулагина Т.А., Гурина Р.В. Высокотемпературное коксование как эффективная переработка нефтяных остатков // Наука, образование, производство в решении экологических проблем (Экология-2022): Материалы XVIII Международной научно-технической конференции. В 2-х т. – Уфа: ФГБОУ ВО УГАТУ, 2022. – С. 131–134.
8. Кулагина Т.А., Хаглеев П.Е., Зайцева Е.Н. Обращение с промышленными и особо опасными отходами. – Красноярск: СФУ, 2021. – 512 с.
9. Szaja A., Montusiewicz A., Lebioccka M. Challenges of hydrodynamic cavitation of organic wastes // Applied sciences. – Lublin, Poland, 2022. DOI: 10.3390/app12157936
10. Degradation of pefloxacin by hybrid hydrodynamic cavitation with H₂O₂ and O₃ / B. Wang, H. Jiao, H. Su, T. Wang // Chemosphere. – 2022. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.135299
11. Economic and environmental benefits of using cavitation treated fuel in vehicles of internal combustion engines / I. Aftanaziv, M. Malovanyy, L. Shevchuk, O. Strogan, L. Strutynska // Communications – 2022. – Vol. 3 (24). – P. 158–169
12. Impact of hydrodynamic cavitation on the properties of coal-water fuel: an experimental study / O.P. Stebeleva, L.V. Kashkina, A.V. Minakov, O.A. Vshivkova // ACS Omega. – 2022. – Vol. 7. – P. 37369–37378.
13. Treatment of bio-refractory real effluent from polymer processing industry using cavitation-based hybrid treatment techniques / N.J. Lakshmi, P. Surabhi, P.R. Gogate, A.B. Pandit // Arabian Journal for Science and Engineering. – 2023. – Vol. 12. – P. 1–20.
14. Effects of hybrid nanoparticle additives in n-butanol/waste plastic oil/diesel blends on combustion, particulate and gaseous emissions from diesel engine evaluated with entropy-weighted PROMETHEE II and TOPSIS: environmental and health risks of plastic waste / A.A. Yusuf, J.D. Ampah, M.E.M. Soudagar, I. Veza, U. Kingsley, S. Afrane, C. Jin, H. Liu // Energy Conversion and Management. – 2022. DOI: 10.1016/j.enconman.2022.115758
15. Современное состояние использования кавитационных технологий (краткий обзор) / А.Ю. Радзюк, Е.Б. Истягина, Л.В. Кулагина, А.В. Жуйков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 9. – С. 209–218. DOI: 10.18799/24131830/2022/9/3623
16. Ekaterinchev A.V., Baranova M.P. Significance of physical and chemical processes in energy technologies // 21 century: fundamental science and technology. Proceedings of XXX international scientific-practical conference. – Bengaluru, Karnataka, India, 2022. – P. 88–91.

17. Insight into the sludge reduction performances by hydrodynamic cavitation / Y. Yao, Y. Sun, X. Wang, Y. Song, Z. Wang // *Journal of Water Process Engineering*. – 2022. – Vol. 49 – P. 1–8.
18. Гульков А.Н., Сухова Т.Н., Осипова Е.Б. Модельное исследование кавитации в вязких средах на примере нефти // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2013. – № S3. – С. 46–52.
19. Кулагина Т.А. Разработка режимов сжигания обводненных топочных мазутов и водотопливных эмульсий: дис. ... канд. техн. наук. – Красноярск, 2000. – 178 с.
20. Гурина Р.В. Утилизация накопленных и образующихся отходов нефтяной промышленности // *Экология и безопасность жизнедеятельности: Сборник статей XVIII Международной научно-практической конференции*. – Пенза: ФГБОУ ВО Пензенский ГАУ, 2018. – С. 127–131.

Информация об авторах

Татьяна Анатольевна Кулагина, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой техносферной и экологической безопасности Политехнического института Сибирского федерального университета, Россия, 660074, г. Красноярск, ул. Борисова, 5. tak.sfu@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-2601-9570>

Ольга Геннадьевна Дубровская, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерных систем зданий и сооружений Инженерно-строительного института Сибирского федерального университета, Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82, стр. 1. dubrovskayaolga@mail.ru

Елена Николаевна Зайцева, старший преподаватель кафедры техносферной и экологической безопасности Политехнического института Сибирского федерального университета, Россия, 660074, г. Красноярск, ул. Борисова, 5. Lenap1978@mail.ru

Роман Николаевич Крылышкин, аспирант кафедры техносферной и экологической безопасности Политехнического института Сибирского федерального университета, Россия, 660074 г. Красноярск, ул. Борисова, 5. roma@z-gorod.ru

Поступила в редакцию: 06.03.2024

Поступила после рецензирования: 24.04.2024

Принята к публикации: 26.04.2024

REFERENCES

1. Krapivsky E.I. *Oil sludge: destruction, utilization, decontamination: monograph*. Moscow, Infra Engineering Publ., 2021. 432 p. (In Russ.)
2. Filippova O.P., Kalaeva S.Z., Tskhovrebov E.S., Sergeev E.S. Technological aspects of environmentally safe utilization of used oils. *Vestnik of Tver State Technical University. Series: Construction. Electrical engineering and chemical technologies*, 2023, vol. 4 (20), pp. 91–96. (In Russ.)
3. Chenavaz R.Y., Dimitrov S. From waste to wealth: policies to promote the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 2024, vol. 443, pp. 1–11.
4. Kulagin V.A., Kulagina L.V., Shtym K.A. Prospects of cavitation technologies development: theory and practice. *Safety and monitoring of natural and technogenic systems*. Novosibirsk, FIC IVT Publ., 2023. pp. 51–55. (In Russ.)
5. Krylyshkin R.N., Gurina R.V. Energy efficiency of the thermal utilization of the oil residues. *Yenisei thermophysics. Theses of reports of the I All-Russian scientific conference with international participation*. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2023. pp. 372–373. (In Russ.)
6. Shtripling L.O., Tokarev V.V., Gerzhberg Y.M., Kraus Y.A., Logunova Y.V. *Processing and utilization of oil sludge and oil-contaminated materials formed in places of extraction, transportation and processing of hydrocarbon raw materials: monograph*. Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2013. 174 p. (In Russ.)
7. Kulagina T.A., Gurina R.V. High-temperature coking as an effective processing of oil residues. *Science, education, production in solving environmental problems (Ecology-2022). Materials of XVIII International Scientific and Technical Conference*. Ufa, FGBOU VO UGATU Publ., 2022. Vol. 2, pp 131–134. (In Russ.)
8. Kulagina T.A., Khagleyev P.E., Zaitseva E.N. *Handling of industrial and highly hazardous wastes*. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2021. 512 p. (In Russ.)
9. Szaja A., Montusiewicz A., Lebiocka M. Challenges of hydrodynamic cavitation of organic wastes. *Applied sciences*. Lublin, Poland, 2022. DOI: 10.3390/app12157936
10. Wang B., Jiao H., Su H., Wang T. Degradation of pefloxacin by hybrid hydrodynamic cavitation with H₂O₂ and O₃. *Chemosphere*, 2022. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.135299
11. Aftanaziv I., Malovanyy M., Shevchuk L., Strogan O., Strutynska L. Economic and environmental benefits of using cavitation treated fuel in vehicles of internal combustion engines. *Communications*, 2022, vol. 3 (24), pp. 158–169.
12. Stebeleva O.P., Kashkina L.V., Minakov A.V., Vshivkova O.A. Impact of hydrodynamic cavitation on the properties of coal-water fuel: an experimental study. *ACS Omega*, 2022, vol. 7, pp. 37369–37378.
13. Lakshmi N.J., Surabhi P., Gogate P.R., Pandit A.B. Treatment of bio-refractory real effluent from polymer processing industry using cavitation-based hybrid treatment techniques. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2023, vol. 12, pp. 1–20.
14. Yusuf A.A., Ampah J.D., Soudagar M.E., Veza I., Kingsley U., Afrane S., Jin C., Liu H. Effects of hybrid nanoparticle additives in n-butanol/waste plastic oil/diesel blends on combustion, particulate and gaseous emissions from diesel engine evaluated with

- entropy-weighted PROMETHEE II and TOPSIS: environmental and health risks of plastic waste. *Energy Conversion and Management*, 2022. DOI: 10.1016/j.enconman.2022.115758
15. Radziuk A.Yu., Istiagina E.B., Kulagina L.V., Zhuikov A.V. Current state of cavitation technology use (brief review). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 9, pp. 209–218. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2022/9/3623
16. Ekaterinchev A.V., Baranova M.P. Significance of physical and chemical processes in energy technologies. *21 century: fundamental science and technology. Proceedings of XXX international scientific-practical conference*. Bengaluru, Karnataka, India, 2022. pp. 88–91.
17. Yao Y., Sun Y., Wang X., Song Y., Wang Z. Insight into the sludge reduction performances by hydrodynamic cavitation. *Journal of Water Process Engineering*, 2022, vol. 49, pp. 1–8.
18. Gulkov A.N., Sukhova T.N., Osipova E.B. Model study of cavitation in viscous media by the example of oil. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2013, vol. S3, pp. 46–52. (In Russ.)
19. Kulagina T.A. *Development of modes of combustion of watered furnace fuel oils and water-fuel emulsions*. Cand. Diss. Krasnoyarsk, 2000. 178 p. (In Russ.)
20. Gurina R.V. Utilization of accumulated and generated wastes of oil industry. *Ecology and Life Safety. Collection of articles of the XVIII International Scientific and Practical Conference*. Penza, FGBOU VO Penza GAU Publ., 2018. pp. 127–131. (In Russ.)

Information about the authors

Tatiana A. Kulagina, Dr. Sc., Professor, Head of the Technosphere and Environmental Safety Department, Siberian Federal University, 5, Borisiv street, Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation. tak.sfu@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-2601-9570>

Olga G. Dubrovskaya, Cand. Sc., Associate Professor, Siberian Federal University, 82/1, Svobodniy avenue, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation. dubrovskayaolga@mail.ru

Elena N. Zaytseva, Senior Lecturer, Siberian Federal University, 5, Borisiv street, Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation. Lenap1978@mail.ru

Roman N. Krylyshkin, Postgraduate Student, Siberian Federal University, 5, Borisiv street, Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation. roma@z-gorod.ru

Received: 06.03.2024

Revised: 24.04.2024

Accepted: 26.04.2024

УДК 004.415.2:004.932.1:582.47

DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4600

Шифр специальности ВАК: 2.3.1.; 2.3.5

Модели и методы глубокого обучения для решения задач дистанционного мониторинга лесных ресурсов

Н.Г. Марков, К.Р. Мачука[✉]

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

[✉]kristianrodrigo1@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. Обусловлена необходимостью высокоточного анализа данных дистанционного мониторинга лесных ресурсов Земли, проводимого с использованием космических аппаратов и (или) беспилотных летательных аппаратов. **Цель.** Анализ современного состояния исследований в области дистанционного мониторинга лесов с использованием космических аппаратов и беспилотных летательных аппаратов и формулировка направлений перспективного развития этой области; разработка и исследование новых моделей глубокого обучения для анализа снимков высокого и сверхвысокого разрешения хвойных лесов. **Объекты.** Аппаратные средства, модели, методы и информационные системы и технологии для оперативного анализа данных дистанционного мониторинга лесных ресурсов, полученных в виде снимков высокого и сверхвысокого разрешения. **Методы.** Модели и методы глубокого обучения для классификации деревьев на снимках; методология проведения оперативного дистанционного мониторинга лесов; методы обучения, валидации и исследования сверточных нейронных сетей. **Результаты и выводы.** Аналитический обзор моделей, методов и информационных технологий для оперативного анализа данных дистанционного мониторинга лесных ресурсов; перечень сформулированных направлений перспективного развития методологии и инструментария для оперативного проведения дистанционного мониторинга лесов; разработанные на основе классической модели полносверточной сети U-Net две модели Mo-U-Net и Mo-Res-U-Net. Для обучения, валидации и исследования этих моделей созданы два датасета по снимкам с беспилотного летательного аппарата. Получены результаты исследования моделей при решении задач мультиклассификации хвойных деревьев пихты *A. sibirica* и кедра *P. sibirica*, пораженных насекомыми-вредителями. Исследования показали, что в отличие от классической модели U-Net, для всех классов деревьев *A. sibirica* и *P. sibirica*, включая промежуточные классы, эти модели дают точность классификации по метрикам *IoUc* и *mIoU* выше порогового значения 0,5, это указывает на практическое значение таких моделей для лесной отрасли.

Ключевые слова: дистанционный мониторинг лесных ресурсов Земли, космический аппарат, беспилотный летательный аппарат, глубокое обучение, модель полносверточной нейронной сети, мультиклассификация снимков хвойных деревьев

Благодарности: Авторы выражают глубокую благодарность кандидату биологических наук, заведующему лабораторией Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН Ивану Андреевичу Керчеву за предоставленные снимки лесных массивов и кандидату технических наук, доценту Томского политехнического университета Ольге Сергеевне Токаревой за помощь в дешифрировании этих снимков.

Для цитирования: Марков Н.Г., Мачука К. Модели и методы глубокого обучения для решения задач дистанционного мониторинга лесных ресурсов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 6. – С. 55–74. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4600

UDC 004.415.2:004.932.1:582.47
DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4600

Deep learning models and methods for solving the problems of remote monitoring of forest resources

N.G. Markov, C.R. Machuca[✉]

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

[✉]kristianrodrigo1@tpu.ru

Abstract. Relevance. The need for precise data analysis in remote monitoring of Earth's forest resources through satellites and unmanned aerial vehicles. **Aim.** Analysis of the current research status in forest remote monitoring via satellites and unmanned aerial vehicles, formulation of directions for the prospective development of this area; implementation and investigation of new deep learning models for analyzing high and very high-resolution images of coniferous forests. **Objects.** Hardware, models, methods, information systems, and technologies for real-time analysis of remote monitoring data of forest resources, obtained in the form of high and very high-resolution images. **Methods.** Deep learning models and methods for classifying trees in images; methodology for conducting real-time remote forest monitoring; methods for training, validation, and research of convolutional neural networks. **Results and conclusions.** Analytical review of models, methods, and information technologies for real-time analysis of remote forest monitoring data; list of formulated directions for prospective development of methodology and tools for efficient remote forest monitoring; development of two models, Mo-U-Net and Mo-Res-U-Net, based on the classical U-Net model. Two datasets based on imagery from an unmanned aerial vehicle were created for training, validation, and research of these models. The research results were obtained for solving multiclass classification tasks of Siberian fir (*A. sibirica*) and Siberian pine (*P. sibirica*) trees infested by insect pests. The studies showed that unlike the classical U-Net model, these models provide a higher classification accuracy for all classes of *A. sibirica* and *P. sibirica* trees, including intermediate classes, with *IoU* and *mIoU* metrics above the threshold value of 0.5, indicating the practical value of such models for the forestry industry.

Keywords: remote monitoring of the Earth's forest resources, satellite, unmanned aerial vehicle, deep learning, convolutional neural network model, multiclass classification of coniferous trees

Acknowledgements: The authors extend their sincere appreciation to Ivan A. Kerchev, Cand. Sc., Head of the Laboratory at the Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems at the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, for generously providing images of forest areas. Special thanks also go to Olga S. Tokareva, Cand. Sc., Associate Professor at Tomsk Polytechnic University, for her invaluable assistance in labeling and interpreting these images.

For citation: Markov N.G., Machuca C. Deep learning models and methods for solving the problems of remote monitoring of forest resources. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 6, pp. 55–74. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4600

Введение

В настоящее время специалисты лесной отрасли во всем мире периодически осуществляют мониторинг лесов, причем не только наземный, но и с использованием различных систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). При этом мониторинг выполняется с разными целями, начиная с обнаружения заболеваний деревьев (лесопатологические наблюдения) и заканчивая выявлением участков незаконных рубок деревьев. Сегодня все чаще выполняют мониторинг лесов с помощью систем ДЗЗ и используют данные такого дистанционного мониторинга при решении самых различных задач в лесной отрасли.

Известно, что вспышки массового размножения насекомых-вредителей наносят непоправимый вред лесам во многих странах мира [1]. Увеличивающи-

еся масштабы разрушительных последствий в результате проникновения в леса чужеродных насекомых ставят под серьезную угрозу биологическую безопасность ряда регионов мира [1, 2]. Не является исключением и Россия, например, в Западной Сибири самым известным и опасным вредителем является сибирский шелкопряд *Dendrolimus sibiricus* (Tschetv), очаги его массового размножения в кедровниках ежегодно занимают площадь от десятков тысяч до нескольких миллионов гектаров [3]. В последнее десятилетие по наносимому ущербу лесопользованию в один ряд с ним можно поставить дальневосточного вредителя – уссурийского полиграфа *Polygraphus proximus* (Blandford). Этот короед стал наиболее агрессивным из всех известных видов короедов в сибирских пихтовых

лесах [4]. Такие леса содержат большие массивы деревьев пихты сибирской *Abies sibirica* (Ledeb) (далее для краткости – пихты). Многочисленные очаги массового размножения уссурийского полиграфа различной интенсивности обнаружены, начиная с 2007 г., далеко за пределами Сибири в ряде центральных регионов России, например, в Московской области, а в последнее время – в пихтовых лесах Удмуртии и Прибайкалья [5, 6]. Другим примером агрессивного лесного вредителя стал обнаруженный в 2019 г. в кедровниках нескольких областей Сибири союзный короед *Ips amitinus* (Eichhoff) [7, 8]. В связи с проникновением союзного короеда в Сибирь и массовой гибелью деревьев в припоселковых кедровниках возникает риск деградации ценных лесных насаждений сосны сибирской кедровой *Pinus sibirica* (Du Tour) (далее для краткости – кедра). Опираясь на эти примеры вспышек массового размножения таких насекомых-вредителей и на большое число подобных случаев в мировой практике, известные ученые и специалисты лесной отрасли сегодня делают выводы о наличии необратимых экономических и экологических последствий от массового размножения насекомых-вредителей лесов, если не принимать соответствующие меры [1, 2, 6, 8]. Сегодня вспышки массового размножения лесных вредителей во многих странах мира ежегодно приводят к многомиллиардным экономическим потерям в связи с утратой деловой древесины [1, 2]. Все это указывает на необходимость организации оперативного мониторинга лесов с целью раннего выявления очагов размножения таких вредителей.

Другой крупной и практически важной задачей мониторинга лесов является выявление (идентификация) сухостоя и анализ его пространственного распределения (занимаемая площадь, одиночные или группы деревьев и т. п.) [1, 2]. Сухостой является результатом болезни деревьев или следствием изменений климата. Обычно после проведения мониторинга лесных ресурсов необходимо с учетом его результатов решить ряд различных лесоустроительных задач, включая фитосанитарные задачи. Под лесоустроительными задачами понимается комплекс работ (мероприятий), направленных на получение актуальных и точных сведений о лесных ресурсах с целью дальнейшего их использования при решении различных лесохозяйственных задач. При этом для решения лесоустроительных задач используются не только результаты анализа данных мониторинга, но и координатная привязка пораженных деревьев. Наконец, мониторинг лесов также должен позволять решать ряд крупных задач техногенного характера: оперативно выявлять техногенные и ветровые повреждения древостоя, возгорания лесов и т. п.

Однако специалисты лесной отрасли постоянно сталкиваются с отсутствием современного инструментария – аппаратных средств, моделей, методов и информационных систем и технологий для оперативного проведения мониторинга и анализа полученных данных. В данной статье дается аналитический обзор инструментов, используемых сегодня при мониторинге лесов, и формулируются направления их перспективного развития. Предлагаются и исследуются новые модели глубокого обучения для анализа снимков высокого и сверхвысокого разрешения лесов.

Проблема оперативного мониторинга лесных ресурсов

Кратко рассмотрим основные аспекты проблемы мониторинга лесов. В первую очередь, они определяются как особенностями физиологических процессов, протекающих у деревьев различных пород, так и особенностями экосистемы, в которую включены подлежащие мониторингу лесные массивы. Так, одной из важных особенностей поражения хвойных лесов насекомыми-вредителями являются резкие колебания их численности, обусловленные тем, что в системе взаимодействия чужеродного вида с сообществом не сразу устанавливается баланс. После латентной фазы в период акклиматизации на новой территории, когда этот вид имеет низкую численность, следует вспышка, а за ней резкий спад численности, за которой может вновь последовать резкий подъем [4, 6, 8]. Все это указывает на важность не только оперативного выявления очагов размножения вредителей, но и проведения постоянного и оперативного мониторинга выявленных очагов с помощью новейших инструментальных средств для оценки состояния здоровья (степени поражения) заселенных вредителями деревьев. Выявление деревьев на ранней стадии поражения вредителями имеет большое практическое значение для сохранения хвойных лесов, поскольку для таких деревьев своевременно могут быть проведены эффективные фитосанитарные мероприятия вплоть до уничтожения пораженных деревьев. Итак, в связи с высокой динамичностью популяций стволовых вредителей существует необходимость их оперативного выявления на ранних стадиях и важность отслеживания здоровья пораженных деревьев. При этом сложность выявления очагов вредителей и получение достоверных оценок состояния здоровья деревьев обусловлены не только большой площадью подлежащих мониторингу лесов, но и разнообразием пород деревьев и их лесопатологических состояний. Все это подчеркивает актуальность научной проблемы создания современных методологии и инструментария для оперативного проведения мониторинга пораженных вредителями лесов.

Практически важной целью мониторинга деревьев любых пород является выявление, иногда говорят обнаружение или идентификация, среди них сухостоя и анализ его пространственного распределения (занимаемая площадь, одиночные или группы деревьев и т. п.) [1, 2]. Сухостой появляется в результате болезни деревьев или является следствием изменений климата. Например, усыхание ельников имеет место из-за резких изменений температуры и недостаточности влаги в определенные периоды года. Необходимо оперативно осуществлять мониторинг лесов и выявлять сухостой, что в итоге позволит определять запасы древесной фитомассы и углерода в ней на обследуемых участках леса. Более того, после нескольких десятилетий исследований продолжает оставаться актуальной сложная и важная для практиков задача определения породного состава лесов по данным их дистанционного мониторинга [3, 9].

Как показывает анализ многих публикаций по автоматической классификации деревьев по породам и по степени поражения их вредителями, распознать деревья на снимках, полученных при дистанционном мониторинге, с требуемой точностью не всегда удается [9–12]. Более того, практически все известные методы интеллектуального анализа изображений, включая методы машинного обучения, дают невысокие результаты по точности распознавания состояния пораженных вредителями деревьев, особенно на начальных этапах их поражения. Это означает, что необходимо дальнейшее развитие новых моделей, методов и алгоритмов классификации деревьев на снимках, удовлетворяющих весьма жестким требованиям к точности распознавания повреждений (состояния здоровья) деревьев. Более того, проблема создания современного инструментария не будет решена, если разрабатываемая информационно-аналитическая система, в которой реализуются такие модели и методы, не будет поддерживать оперативный режим обработки и анализа получаемых при мониторинге снимков лесов. Отсутствие таких систем для оперативной работы ведет к тому, что даже при организации оперативного мониторинга лесов только в ряде лесничеств России, и тем более в масштабе отрасли, огромный пласт данных этого мониторинга останется незадействованным или потребуются их ежедневная полуручная обработка и экспертный анализ (дешифрирование снимков) большим числом специалистов. Требования к точности и скорости вычислений при обработке и анализе снимков должны формулироваться и прописываться в методологии мониторинга хвойных лесов. Более того, ученые и специалисты сходятся во мнении, что необходимо комплексно решать важную научную проблему создания современной методологии и инновационного инструментария для

оперативного дистанционного мониторинга лесов. Это касается и большого этапа обработки и анализа данных такого мониторинга.

Применение систем ДЗЗ

Сегодня все чаще в мире начинают выполнять мониторинг лесов с помощью систем ДЗЗ и использовать полученные данные такого дистанционного мониторинга при проведении различных лесоустроительных работ, включая лесотаксационные работы. Как показали результаты работ, проведенных рядом исследователей, проблему оперативного мониторинга лесов можно решить, используя высокоточную съемку деревьев с космических аппаратов (КА), самолетов (вертолетов) или с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и квалифицированно проводя дешифрирование данных ДЗЗ, полученных в виде снимков [2–4, 8]. Например, в работах [4, 9–12] показано, что на снимках высокого (0,1–1,0 м/пиксель) и сверхвысокого (0,02–0,1 м/пиксель) пространственного разрешения, полученных с помощью дистанционной съемки лесов, экспертами обнаружены и идентифицированы даже сравнительно небольшие повреждения крон деревьев сосны, кедра и пихты насекомыми-вредителями.

Дистанционные наблюдения лесов, проводимые с помощью КА и БПЛА, оснащенных специальным оборудованием для многоспектральной фото- и (или) киносъемки, в несколько раз дешевле мониторинга лесов с помощью самолетов и вертолетов, поэтому сегодня чаще всего предпочтение отдается этим аппаратам. Преимуществом использования БПЛА перед КА при мониторинге лесов является возможность оперативного получения снимков с помощью БПЛА при слабой зависимости от состояния атмосферы (прозрачность, облачность). Более того, установленные на БПЛА современные цифровые фото- или видеокамеры сегодня позволяют получать снимки сверхвысокого пространственного разрешения, на которых специалисты могут дешифрировать особенности деревьев на уровне ветвей, а иногда и листьев. Такие снимки позволяют выделять не только спектральные признаки деревьев, но и пространственные (текстуры и геометрия крон) признаки, что особенно важно при решении задачи распознавания пород деревьев. Все эти аргументы, изложенные с разной степенью детальности в работах [9–12], позволяют специалистам считать, что сегодня созданы основы требуемой методологии оперативного мониторинга лесов. Главное положение этой методологии – набор требований и рекомендаций при использовании КА и (или) БПЛА различных классов со специальной аппаратурой для получения многоспектральных снимков лесов высокого и сверхвысокого разрешения.

С начала 2000-х гг. во всем мире на самолетах, а в последние годы и на БПЛА, при мониторинге лесов наряду с аппаратурой для многоспектральной съемки стали устанавливать компактные LiDAR-сканеры (лидары) [2, 3, 13]. Суть LiDAR-технологии показывает ее название: LiDAR (от английского Light Identification Detection and Ranging) – обнаружение с помощью лазерного луча объектов мониторинга и определение дальности до них. Технология реализуется в два этапа. На первом этапе БПЛА с установленным на нем лидаром пролетает над исследуемым лесным участком и сканирует массив деревьев. Проникая сквозь полог леса до самой земли, лазерный луч встречает на своем пути множество объектов и отражается от них. Отраженные сигналы фиксируются приемником лидара. В результате сканирования формируется «облако точек» – плотное поле точек, расположенных в трехмерной системе координат. На втором этапе с помощью специального программного обеспечения ведется интерпретация точек этого облака. Каждой точке в облаке задается свой класс, например, низкорослая растительность, растительность средней высоты и т. п. В результате строятся 3D-модели рельефа, высотные модели растительности и т. д., используемые в последующем для решения самых разных лесохозяйственных и лесоустроительных задач.

Отметим, что сегодня во всем мире LiDAR-технологии все чаще используют вместо традиционных методов таксации лесов [2, 12]. Они позволяют с высокой точностью определять высоту деревьев, размер их крон, вертикальную и горизонтальную пространственную структуру древесного полога и диаметр стволов деревьев. Оперативное и точное получение лесотакционных показателей, в первую очередь таких, как высота дерева, диаметр ствола, позволяет своевременно решать различные лесохозяйственные задачи (построение карт отводов для лесозаготовительных работ, актов плановых рубок и т. д.). Проведены первые исследования по комплексированию данных многоспектральной съемки лесов и лидарных данных при решении задачи обнаружения очагов вредителей и пораженных ими деревьев и задачи выявления породного состава лесов, показавшие перспективность этого направления работ [12, 14, 15]. Обсуждаются возможности использования LiDAR-технологии для решения задач устойчивого лесоводства: мониторинг лесов с помощью лидаров в принципе позволяет отслеживать динамику роста стволов деревьев, их крон и подлеска. Перспективным направлением, на наш взгляд, является использование LiDAR-технологии для замеров биомассы и оценки объема углерода, который способны поглотить леса на конкретной территории, а также оценки объема

углерода, который могут выделить выявленные сухостои на заданной территории (проведение оценки вклада сухостоев в так называемую «углеродную проблему» того или иного региона).

Методы, модели и технологии анализа снимков лесов

Проанализируем существующие на сегодняшний день решения проблемы оперативного дистанционного мониторинга лесов в части имеющегося у специалистов лесной отрасли инструментария (моделей, методов и технологий на их основе) для анализа результатов такого мониторинга. Как показано выше, сегодня приоритетным направлением дистанционного мониторинга лесов является использование БПЛА и (или) КА, оснащенных прецизионными фото- или видеокамерами и иными датчиками для получения многоспектральных снимков деревьев высокого и сверхвысокого разрешения. Анализ (интерпретацию) этих снимков ведут с целью решения той или иной описанной выше прикладной задачи полуручным способом (эксперт ведет дешифрирование снимков с использованием вспомогательных программ) или автоматически, решая задачу классификации снимков с помощью программно- или аппаратно-реализованных методов и алгоритмов классификации. При автоматической классификации снимков решается как задача бинарной классификации, например, распознавание деревьев – сухостоев, так и задача мультиклассификации, когда по ряду признаков на снимке дерево надо отнести к одному из нескольких классов. Обычно задача мультиклассификации решается при выявлении породного состава участка леса, при оценке состояния здоровья пораженных вредителем деревьев, когда на снимках необходимо распознавать несколько классов (состояний) таких деревьев, и т. д. Например, в случае поражения деревьев пихты *Abies sibirica* уссурийским полиграфом *Polygraphus proximus* Blandford (далее – *P. proximus*) надо распознать пять классов: четыре состояния деревьев пихты разной степени поражения вредителем и фон.

В настоящее время для решения задач автоматической классификации деревьев на снимках с КА и с БПЛА продолжают применять традиционные классификаторы, уже довольно давно используемые при решении других прикладных задач анализа данных ДЗЗ [13, 14]. Среди них хорошо известные методы параметрической и непараметрической статистической классификации и традиционные методы машинного обучения, включая неконтролируемые нейросетевые классификаторы [16]. При этом для определения породного состава лесов путем решения задачи мультиклассификации чаще всего исходными данными являются многоспек-

тральные снимки [13], а для выявления сухостойных деревьев путем решения задачи бинарной классификации – снимки в оптическом диапазоне (RGB-снимки) [2]. Среди используемых традиционных методов машинного обучения иногда встречаются комбинированные методы. Например, в работе [17] для классификации деревьев пихты, пораженных *P. proximus*, на снимках применяется метод градиентного бустинга в комбинации с методом деревьев принятия решений, причем учитываются как спектральные признаки, так и текстурные признаки Харалика. К сожалению, известные методы классификации и традиционные методы машинного обучения при решении различных задач классификации деревьев на снимках дают невысокую точность их распознавания [13, 14, 17]. В частности, в работах [13, 15] приведены результаты решения задачи изучения породного состава лесов, не востребованные на практике в лесной отрасли.

Поэтому в последние годы наряду с традиционными методами классификации деревьев на снимках лесов с БПЛА и с КА начали разрабатывать и применять более эффективные модели и методы глубокого обучения. Так, в работе [15], видимо, впервые предложено классифицировать деревья различных пород с использованием методов глубокого обучения, а в статье [9] при решении задачи классификации пораженных вредителями деревьев пихты *A. sibirica* на RGB-снимках с БПЛА исследуются различные модели сверточных нейронных сетей (СНС). Авторы [9] для классификации пораженных деревьев *A. sibirica*, находящихся в четырех состояниях, применили двухэтапный подход: сначала на снимке с помощью разработанного ими алгоритма ведется поиск регионов-кандидатов, содержащих кроны деревьев, а затем проводится их классификация с помощью предложенной новой модели СНС. Показано, что на датасете с аугментацией исходных снимков эта модель дает более высокую точность классификации пораженных деревьев, чем известные весьма мощные модели СНС Xception, VGG-16, VGG-19, ResNet-50, Inception-V3, Inception ResNet-V2, DenseNet-121, DenseNet-169 и DenseNet-201 на этом же датасете. Однако реализация предложенного двухэтапного подхода весьма сложна, и поэтому предлагаемая модель СНС применения на практике, по-видимому, не найдет.

Некоторые исследователи для распознавания деревьев на снимках используют модели СНС класса YOLO, предназначенные для решения задач объектного детектирования (англ. *Object Detection*) изображений. Так, в [18] применялась модель YOLOv5 для обнаружения повреждений деревьев пальмы на оптических снимках с БПЛА, а в [19]

использовалась эта же модель для анализа многоспектральных снимков пораженных деревьев сосны с БПЛА. Точность классификации деревьев в каждой из этих работ оказалась невысокой, но скорость вычисления модели очень высока. Высокие результаты по скорости вычислений еще раз подтверждают неоспоримое преимущество моделей класса YOLO, являющихся однопроводными. В статье [20] изложены результаты исследований по классификации многоспектральных изображений с БПЛА пораженных вредителями деревьев сосны. Деревья на снимках были разделены на четыре класса: три класса жизненного состояния сосны (начально зараженные деревья, средне зараженные деревья и погибшие деревья) и класс деревьев других пород (широколиственные деревья). Анализ снимков проводился с использованием моделей СНС Faster R-CNN и YOLOv4, а также двух методов традиционного машинного обучения: опорных векторов (англ. *Support Vector Machine*, SVM) и случайного леса (англ. *Random Forest*, RF). По точности классификации лучшие результаты показали модель СНС Faster R-CNN, осуществляющая семантическую сегментацию (попиксельную классификацию) изображений, и методы SVM и RF, а самая низкая точность у модели YOLOv4. В [21] приведены результаты решения задачи обнаружения на снимках с БПЛА раннего увядания деревьев сосны из-за болезни, называемой древесная нематода сосны. Для исследования использовались различные модели СНС из класса YOLO: YOLOv3, YOLOv4, YOLOv5n, YOLOv5s, YOLOv5m, YOLOv5l и YOLOv5x. Даже лучшие результаты по точности классификации увядающих деревьев сосны, полученные с помощью модели YOLOv5m, не являются практически приемлемыми. Поэтому авторы статьи предложили метод комбинации исходного снимка с его отображением в частотной области и модифицировали модели семейства YOLOv5. Проведенные ими дополнительные исследования дали более высокие результаты по точности классификации деревьев сосны на ранней стадии увядания, но и они пока не устроили специалистов лесной отрасли. Поэтому авторы [21] наметили провести еще ряд исследований, в том числе по дальнейшей модификации моделей семейства YOLOv5. Подводя итоги анализа эффективности моделей класса YOLO по результатам исследований [18–21], следует считать, что эти модели СНС не показывают высокую точность классификации и поэтому в условиях высоких требований по точности классификации деревьев на снимках с БПЛА и КА не могут применяться на практике.

В последние годы для классификации деревьев на снимках с помощью моделей СНС все чаще применяют полносверточные нейронные сети U-

Net [22] и подобные им модели, позволяющие решать задачи семантической сегментации (попиксельной классификации) изображений. В работе [23] при исследовании точности классификации деревьев разных пород на снимках с КА Sentinel-2 использовались полносверточные нейронные сети U-Net и SegNet, а также принадлежащие к этому классу модели PSPNet и FCN-8. При этом показано, что наиболее высокую точность дает модель U-Net. При бинарной классификации деревьев на хвойные и лиственные на RGB-снимках с КА с помощью U-Net-подобной модели также получена высокая точность классификации по метрике Ассигасу, равная 0,96 [24]. В работе [25] при распознавании состояний пораженных вредителями деревьев сосны на RGB-снимках, полученных с БПЛА, решалась задача семантической классификации с помощью улучшенной модели CHC Mask R-CNN с большим числом сверточных слоев. Однако в [20, 25] показано, что модели Faster R-CNN и Mask R-CNN, осуществляющие семантическую сегментацию снимков, обеспечивают довольно высокую точность классификации деревьев, но скорость их вычисления весьма низка, что делает эти модели CHC не конкурентными с полносверточными нейронными сетями при практическом применении моделей. С помощью классической модели U-Net [22] получены обнадеживающие результаты мультиклассификации пораженных уссурийским полиграфом *P. proximus* деревьев пихты *A. sibirica* и пораженных союзным короедом *Ips amitinus* (далее – *I. amitinus*) деревьев кедра *P. sibirica*, описанные в [10, 26]. Точность классификации на тестовых выборках по усредненной по всем классам деревьев метрике *mIoU* для деревьев *A. sibirica* составила 0,66, а для деревьев *P. Sibirica* – 0,61 (значения этой метрики, превышающие 0,5, соответствуют высокой точности классификации). Однако наряду с высокими результатами по точности классификации для большинства классов пораженных вредителями хвойных деревьев наблюдается невысокая точность классификации одного (случай деревьев *A. sibirica*) или двух (случай деревьев *P. sibirica*) промежуточных классов (состояний) деревьев. Распознавание деревьев в промежуточных состояниях (состояния между здоровым деревом и старым сухостоем), особенно на ранней стадии их поражения вредителями, имеет большое практическое значение для их сохранения, поскольку выявленные деревья своевременно могут быть подвергнуты эффективным фитосанитарным мероприятиям. Невысокая точность распознавания деревьев в промежуточных состояниях не устраивает специалистов лесной отрасли. Результаты классификации пораженных деревьев *A. Sibirica*, полученные в [10] с помощью классической модели U-Net на датасете,

который также использовался в работе [17], значительно лучше, чем при использовании метода градиентного бустинга в комбинации с методом деревьев принятия решений (значение метрики *mIoU* для модели U-Net равно 0,66 против 0,49 для метода градиентного бустинга в комбинации с методом деревьев принятия решений). Это позволяет считать, что полносверточные нейронные сети при мультиклассификации пораженных деревьев на снимках с БПЛА показывают более высокие результаты, чем традиционные методы машинного обучения.

Проанализируем работы, связанные с созданием информационных или информационно-аналитических систем и технологий на их основе для анализа снимков лесов. В отличие от довольно большого числа работ, посвященных методам исследования проблемы дистанционного мониторинга лесных ресурсов, имеется только несколько статей, в которых описываются реализуемые в виде информационных систем и технологий предлагаемые методы и модели анализа снимков лесов с БПЛА и КА. Так, в [21, 24, 26], наряду с результатами исследования моделей и методов классификации деревьев на снимках, рассматриваются особенности их программной реализации в составе информационных систем, автоматизирующих основные процессы обработки и анализа таких снимков. Однако из известных нам работ только в [4] описана полноценная технология, охватывающая этапы получения снимков пораженных пихтовых лесов с помощью БПЛА, обработки этих снимков и их анализа с помощью современных методов. Эта технология позволяет решать задачу выявления очагов размножения уссурийского полиграфа *P. Proximus* в таких лесах.

В последние годы при решении задач семантической сегментации снимков земной поверхности наряду с программно-реализованными моделями CHC все чаще используют их аппаратную реализацию в современных системах на кристалле (СнК) с программируемыми логическими интегральными схемами (ПЛИС). Многие из используемых при этом моделей CHC являются сложными и поэтому требуют параллельных вычислений для ускорения процессов анализа получаемых в больших объемах при ДЗЗ снимков. Сегодня это направление развивается весьма интенсивно, причем значительное число исследований проведено для наиболее перспективных при решении задач сегментации полносверточных моделей U-Net и SegNet. При создании ускорителей (в англоязычной литературе – акселераторов) для вычисления таких моделей используются в основном ПЛИС современных СнК, например, Intel Arria-10 GX1150 в работе [27] и Xilinx Zynq ZC706 в [28]. Отметим, что основным

направлением работ являются масштабные исследования производительности и энергопотребления предлагаемых акселераторов. Однако только в [29] исследована точность (качество) сегментации снимков с помощью реализованной в акселераторе оптимизированной модели SegNet. Из известных акселераторов на ПЛИС только рассмотренные в [30, 31] ускорители созданы с учетом особенностей решения задач сегментации снимков лесов, полученных с КА и БПЛА. При этом в [30] рассматривается весьма несложная задача бинарной сегментации снимков с КА, решаемая с помощью упрощенной модели U-Net на ПЛИС при обнаружении лесных пожаров и распознавании деревьев после пожара. В работе [31] приводятся результаты комплексных исследований реализованных на ПЛИС, входящей в *SnK Zinq 7000* (Kintex FPGA) компании Xilinx, классической модели U-Net и модели U-Net с дилатационными свертками. Выявлено, что для этих аппаратно-реализованных на ПЛИС полносверточных моделей наблюдается по сравнению с их программной реализацией небольшое уменьшение точности классификации на снимках с БПЛА пораженных деревьев пихты (уменьшение на 0,02–0,04 по метрике *mIoU*). При этом скорость вычисления этих моделей на ПЛИС выше, чем при вычислениях их программных реализаций на персональном компьютере с процессором Intel Core i7-8700, 32 Гб ОЗУ, но значительно ниже, если этот компьютер имеет дополнительно графический ускоритель NVIDIA GeForce GTX 1080 Ti. Однако энергопотребление этой *SnK* с ПЛИС немногим более 5 Вт, что в десятки раз меньше, чем у того же графического ускорителя NVIDIA GeForce GTX 1080 Ti с энергопотреблением 250 Вт.

Можно считать, что результаты исследований в [30, 31] показывают перспективность использования аппаратно-реализованных на ПЛИС полносверточных моделей для классификации снимков лесов с КА и БПЛА и создания на их основе новых технологий. На наш взгляд, эти модели на ПЛИС и технологии будут востребованы, в первую очередь, при значительных объемах снимков, получаемых при дистанционном мониторинге лесов, и при проведении их анализа в условиях малых вычислительных ресурсов.

Проведенный аналитический обзор современных моделей, методов и технологий классификации деревьев на снимках, полученных с КА и БПЛА, позволяет сделать ряд выводов. Во-первых, сегодня продолжает интенсивно формироваться новое научное направление по решению задач автоматической классификации деревьев на снимках СНС. При этом довольно большое число исследований посвящено классификации пораженных вредителями

деревьев, а работ по изучению с помощью моделей СНС породного состава лесов пока немного. Более того, получаемые результаты по точности классификации деревьев на снимках сопоставить иногда сложно из-за использования разных метрик и датасетов. Во-вторых, следует согласиться с мнением авторов работ [9, 15, 17, 20] о том, что модели и методы глубокого обучения при решении задач мультиклассификации деревьев на снимках позволяют получать более точные результаты, чем при использовании традиционных методов классификации, включая известные методы классического машинного обучения. Это касается, в первую очередь, решения сложных задач мультиклассификации пораженных вредителями деревьев. В-третьих, в рамках обозначенного научного направления среди моделей СНС для решения задач мультиклассификации деревьев на снимках по критериям точность–скорость предпочтение следует отдать полносверточным нейронным сетям, хотя они тоже не всегда позволяют распознавать с требуемой точностью пораженные деревья в промежуточных состояниях. Иными словами, перспективно создавать новые модели полносверточных сетей, лишенные такого недостатка. В-четвертых, результаты ряда исследований в [30, 31] показывают перспективность использования аппаратно-реализованных на ПЛИС моделей полносверточных сетей для классификации снимков лесов с КА и БПЛА и создания на их основе новых технологий. Наконец отметим, что только в малом числе работ наряду с исследованиями моделей и методов классификации деревьев на снимках с КА и БПЛА рассматриваются особенности их программной и аппаратной реализации и создания соответствующих технологий анализа таких снимков.

Модели полносверточных сетей для мультиклассификации хвойных деревьев

В рамках указанного выше научного направления нами создаются и исследуются новые модели полносверточных нейронных сетей на основе классической модели U-Net. Ниже приводятся результаты исследований таких моделей при решении крайне актуальных сегодня задач мультиклассификации пораженных вредителями хвойных деревьев пород пихта *A. sibirica* и кедр *P. sibirica*.

Исходные снимки лесов, полученные с БПЛА

Рассмотрим исходные данные, получаемые при мониторинге хвойных лесов с очагами размножения вредителей путем съемки лесных массивов с БПЛА. Эти снимки далее используются нами при подготовке датасетов для решения двух задач мультиклассификации хвойных деревьев, пораженных вредителями. Мониторинг пораженных вредителями лесов проводился на территории Томской области.

Для анализа состояния деревьев пихты *A. sibirica*, пораженных *P. proximus*, использовались пять панорам, сформированных из снимков с пространственным разрешением около 0,1 м. Снимки были получены с помощью БПЛА DJI Phantom 3 Standart с установленной на нем фотокамерой, ведущей съемку в видимом диапазоне электромагнитного спектра (RGB) с высоты 365 и 388 м в период с 7 по 28 августа 2017 г. Проведение съемки сопровождалось наземными обследованиями и подтверждением очага размножения насекомого-вредителя. Размеры полученных панорам (в пикселях): А – 1046×1912, В – 1536×1048, С – 1536×768, D – 768×1792, Е – 1046×1912.

Для проведения оперативного мониторинга поврежденных вредителем *P. proximus* деревьев пихты *A. sibirica* в Институте мониторинга климатических и экологических систем СО РАН разработана оценочная шкала их жизненного состояния и методика применения этой шкалы [4]. В силу того, что при разметке панорам визуально экспертам часто не удавалось отделить некоторые категории деревьев друг от друга, методика была модифицирована путем объединения близких категорий деревьев в один класс. В результате в методике описаны следующие четыре класса деревьев *A. sibirica*: 1 – «Живые», 2 – «Отмирающие» (сильно ослабленные, усыхающие), 3 – «Свежий сухостой» и 4 – «Старый сухостой» (сухостой прошлых лет). На рис. 1 приведен пример фрагмента снимка с деревьями перечисленных классов.

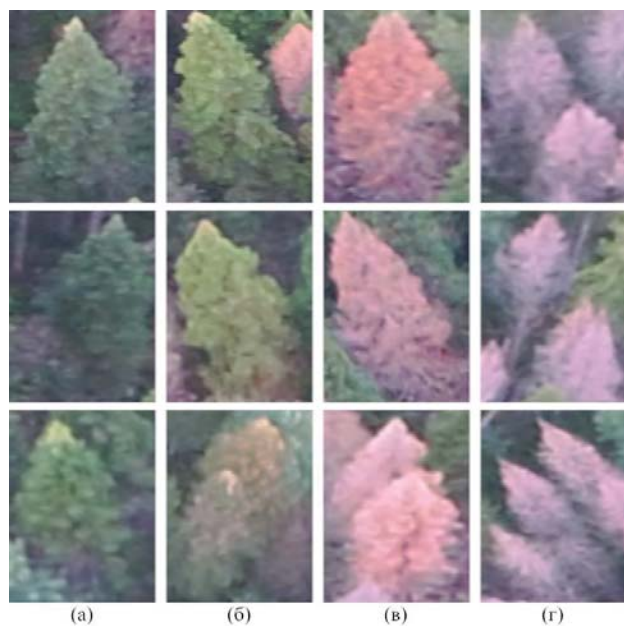


Рис. 1. Примеры деревьев *A. sibirica*: а) живые; б) отмирающие; в) свежий сухостой; г) старый сухостой

Fig. 1. Examples of *A. sibirica* trees: а) healthy; б) dying; в) fresh dead wood; г) old dead wood

Остановимся на особенностях исходных данных для решения второй задачи мультиклассификации пораженных *I. amitinus* деревьев кедр *P. sibirica*. RGB-снимки крон деревьев кедр были получены с помощью фотокамеры, установленной на БПЛА DJI Phantom 4 Pro. Далее снимки были собраны в панорамы, а затем из них получены четыре ортофотоплана. Снимки для первого из них были сделаны с БПЛА 11 июля 2019 г., а для второго, третьего и четвертого ортофотопланов – 23 июля 2019 г. с высоты 350 м, что обеспечило их пространственное разрешение около 0,1 м. Ортофотопланы обозначены, соответственно, А, В, С и D. Их размеры (в пикселях): А – 5849×4515, В – 2454×4249, С – 1863×3500, D – 1684×2951.

При визуальном анализе крон пораженных деревьев кедр на ортофотопланах экспертами по методике из статьи [8] выделяется пять классов их жизненного состояния:

- Класс I – «Жизнеспособное (условно здоровое) дерево»: имеет темно-зеленую крону без признаков дехромации или пожелтения;
- Класс II – «Свежезаселенное»: крона зеленая, но вершинные ветви начинают приобретать бледный зелено-желтый оттенок. На этом этапе летом жуки под корой завершают свое развитие; в весенний период и позднеосенний период жуки находятся в подстилке и частично в ветвях;
- Класс III – «С усохшей вершиной»: верхушка имеет выраженный желто-бурый оттенок, нижняя часть кроны темно- или бледно-зеленая. Ствол этих деревьев может осваиваться сопутствующими видами вредителей, в позднеосенний-ранневесенний периоды в подстилке под проекцией кроны, зимующие имаго;
- Класс IV – «Свежий сухостой»: вся крона бурого цвета, а макушка дерева может нести ветви без хвои; дерево покинуто *I. amitinus*;
- Класс V – «Старый сухостой»: крона не несет хвои или имеются остатки неосыпавшейся серой или рыже-бурой хвои на самых нижних ветках, *I. amitinus* покинул дерево в предыдущем вегетационном сезоне.

Шестым классом на снимках является «Фон» – деревья других пород и иные объекты земной поверхности. Отметим, что число состояний (классов) пораженных вредителями деревьев *A. sibirica* и *P. sibirica* различно, поскольку обе породы деревьев значительно отличаются по форме крон и физиологии. Это в совокупности со специфической специализацией двух вредителей *P. proximus* и *I. amitinus* приводит к различному протеканию в деревьях патофизиологических изменений, дающих разные характерные визуальные признаки крон деревьев. На рис. 2 представлены кроны деревьев кедр *P. sibirica* перечисленных классов.

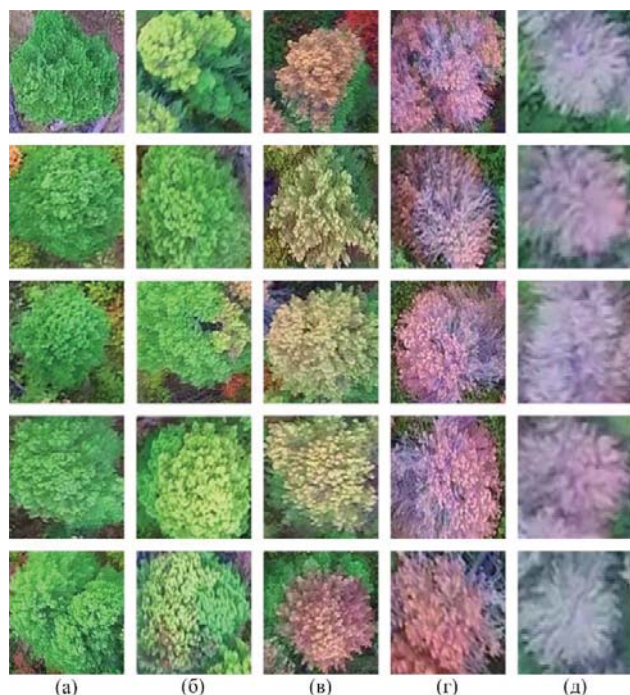


Рис. 2. Примеры крон деревьев *P. sibirica*: а) условно здоровое; б) свежеселенное; в) с усохшей вершиной; г) свежий сухостой; д) старый сухостой

Fig. 2. Examples of *P. sibirica* trees: а) healthy; б) recently colonized; в) dry treetop; г) fresh dead wood; д) old dead wood

Создание датасетов

Рассмотрим формирование датасета для обучения, валидации и тестирования моделей полносверточных сетей, применяемых для решения первой задачи мультиклассификации деревьев пихты. Кроны деревьев пихты на панорамах были размечены экспертами с учетом класса деревьев (различных стадий их повреждения вредителями). Пример такой разметки крон деревьев пихты, в соответствии с методикой [4] деления их по классам на фрагменте одной из панорам, приведен на рис. 3, а, классы отмечены цифрами. Далее, в соответствии с первичной разметкой эксперта, на панорамах другой эксперт проводил оконтуривание крон деревьев. В итоге были выделены эталонные сегменты (полигоны), представляющие кроны деревьев *A. sibirica* четырех классов и «Фон» – деревья других пород и иные объекты земной поверхности. Пример эталонной карты сегментации, соответствующей размеченному по классам деревьев фрагменту на рис. 3, а, приведен на рис. 3, б.

На одной из панорам был выбран тестовый участок. Он не участвовал в обучении и валидации моделей полносверточных сетей, а использовался в исследованиях для оценки их эффективности. По размеченным экспертами панорамам и соответствующим им эталонным картам сегментации были

сформированы обучающая, валидационная и тестовая выборки, составляющие первый датасет для решения первой задачи мультиклассификации. При формировании обучающей и валидационной выборок панорамы были нарезаны на фрагменты размером 256×256 пикселей со сдвигом в 128 пикселей при получении последующего фрагмента. Утечка данных из валидационной выборки устранялась путем наложения булевых масок (двумерных массивов, элементы которых принимают значения «ложь» или «истина») на исходные панорамы и блокирования возможности попадания соответствующих пикселей в обучающую выборку. Именно так гарантировалось, что признаки крон валидационных фрагментов не дублировались среди признаков обучающих фрагментов. Всего было получено 2004 обучающих и 672 валидационных фрагмента. Тестовая выборка, созданная по тестовому участку, составила 96 фрагментов размером 256×256 пикселей.

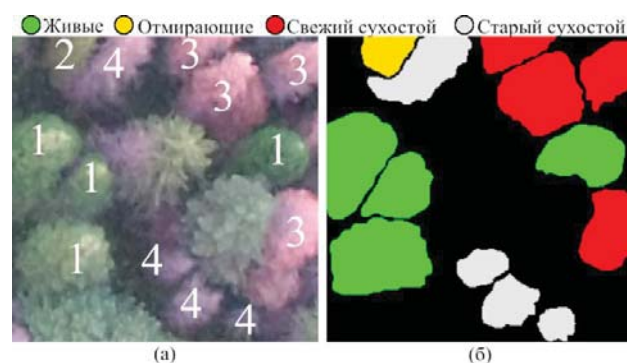


Рис. 3. Фрагмент панорамы деревьев *A. sibirica*, размеченных по классам (а) и соответствующей ему маске сегментации (б)

Fig. 3. Panorama fragment of *A. sibirica* trees labeled by classes (а) and its corresponding segmentation mask (б)

Таблица 1. Количество деревьев пихты *A. sibirica* по классам в выборках первого датасета

Table 1. Number of Siberian fir trees *A. sibirica* by class in the sets of the first dataset

Выборка Set	Живое Healthy	Отмирающее Dying	Свежий сухостой Fresh dead wood	Старый сухостой Old dead wood
Обучающая Training	319	44	147	290
Валидационная Validation	107	14	63	110
Тестовая/Testing	148	22	64	91
Итого/Total	574	80	274	491

Был проведен разведочный анализ этого датасета: определено количество деревьев каждого класса для каждой выборки датасета. В табл. 1 приведены

результаты анализа. Из нее следует, что наблюдается значительная несбалансированность количества деревьев по классам: наименее представленными в выборках оказались деревья промежуточных классов «Отмирающее» и «Свежий сухостой». Такой дисбаланс в количестве деревьев по классам может отрицательно сказаться на точности классификации пораженных деревьев пихты.

Рассмотрим создание второго датасета, применяемого при решении задачи мультиклассификации пораженных деревьев кедра. Сначала перед экспертами, ведущими дешифрирование ортофотопланов, ставилась задача оценки по ним состояния деревьев *P. sibirica*, имеющих разную степень повреждения союзным короедом *I. amitinus*, соответствующую одному из пяти вышеперечисленных классов. Шестым классом являлся «Фон». Каждое из деревьев на ортофотоплане путем визуального дешифрирования относилось к одному из классов экспертом (рис. 4, а), участвовавшим также в наземном обследовании этих участков леса. Затем второй эксперт производил проверку результатов разметки снимков первым экспертом и осуществлял оконтуривание крон деревьев на размеченных ортофотопланах. Итоговым результатом такого дешифрирования стали эталонные карты сегментации (рис. 4, б).

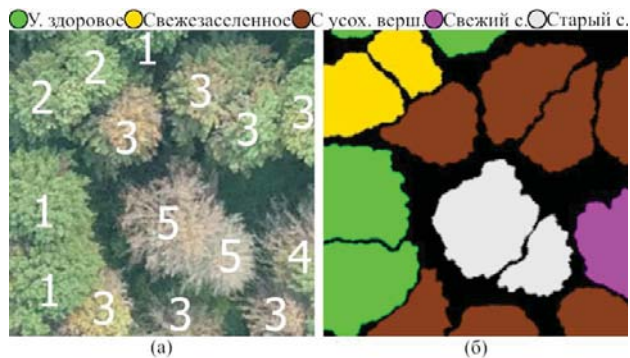


Рис. 4. Фрагмент панорамы деревьев *P. sibirica*, размеченных по классам (а) и соответствующей ему маске сегментации (б)

Fig. 4. Panorama fragment of *P. sibirica* trees labeled by classes (a) and its corresponding segmentation mask (b)

Затем четыре ортофотоплана и соответствующие им эталонные карты сегментации использовались для формирования второго датасета. Нарезка ортофотопланов и карт сегментации, как и в случае панорам деревьев *A. sibirica*, осуществлялась на фрагменты размером 256×256 пикселей со сдвигом в 128 пикселей при получении последующего фрагмента. Для формирования обучающей и валидационной выборок использовались ортофотопланы А, В и С и соответствующие им эталонные кар-

ты сегментации. Четвертый ортофотоплан D и его эталонная карта сегментации применялись для подготовки тестовой выборки датасета путем нарезки их на фрагменты размером 256×256 пикселей. Утечка данных из валидационной выборки устранялась, как и в случае подготовки первого датасета, использованием булевых масок. Всего было получено 10455 обучающих и 2880 валидационных фрагментов. Объем тестовой выборки составил 84 фрагмента.

Также был проведен разведочный анализ второго датасета. В табл. 2 приведены его результаты, показывающие количество деревьев различных классов в каждой выборке датасета. Из табл. 2 следует, что имеет место, как и в случае первого датасета, следующая проблема: слабая представленность промежуточных классов деревьев кедра, в данном случае классов «Свежезаселенное» и «Свежий сухостой». Такой дисбаланс может отрицательно сказаться на точности классификации деревьев кедра этих классов.

Таблица 2. Количество деревьев кедра *P. Sibirica* по классам в выборках второго датасета

Table 2. Number of Siberian pine trees *P. sibirica* by class in the sets of the second dataset

Выборка Set	Условно здоровое Healthy	Свежезаселенное Recently colonized	Сухойшей верхушкой Dry tree top	Свежий сухостой Fresh dead wood	Старый сухостой Old dead wood
Обучающая Training	659	320	424	197	641
Валидационная Validation	283	120	100	60	181
Тестовая Testing	205	48	63	74	123
Итого Total	1147	488	587	331	945

Предложенные полносверточные модели

Как показано выше на основании анализа результатов ряда исследований, сегодня перспективными среди моделей и методов глубокого обучения для классификации деревьев являются модели полносверточных нейронных сетей, позволяющие решать задачи попиксельной классификации пораженных деревьев на снимках с КА и БПЛА. Поэтому в развитие этих работ здесь рассматриваются результаты разработки и исследования двух моделей на основе классической полносверточной модели U-Net.

Модификация модели U-Net. Первая предложенная модель, названная Mo-U-Net, является модификацией известной классической полносверточной сети U-Net для решения задачи семантической сегментации изображений [22]. Отличительной чертой классической модели U-Net является наличие соединений пропуска (англ. *skip-connections*), объединяющих наборы карт признаков кодера с наборами карт признаков декодера с целью повышения детальности результирующей карты сегментации [22]. На рис. 5 приведена архитектура модели Mo-U-Net, предложенной нами на основе классической U-Net. Прямоугольники соответствуют тензорам, или многомерным массивам, представляющим наборы карт признаков, числами указаны размеры соответствующих тензоров, стрелками обозначены следующие операции:

- свертка (Conv3x3, Conv1x1);
- вычисление функции активации exponential linear unit (ELU) [32];
- пакетная нормализация (BN) [33];
- субдискретизация путем выбора максимального значения в окрестности 2 на 2 пикселей (MaxPooling);
- увеличение масштаба методом ближайшего соседа (UpSampling);
- копирование тензора и его конкатенация с другим тензором (Copying+Concatenation);
- метод исключения (англ. *dropping out*) случайным образом выбранных нейронов в сверточных слоях [34] (используется для решения проблемы переобучения модели); здесь метод реализован в виде процедуры Dropout, в которой такие нейроны при исключении приравниваются к нулю и не вносят вклад в процесс обучения модели ни на одном из последующих этапов алгоритма обратного распространения ошибки.

Категориальное распределение на выходе декодера моделируется для каждого пикселя путем

применения обобщения логистической функции для многомерного случая Softmax.

По сравнению с классической моделью U-Net в архитектуру предложенной модели были добавлены следующие изменения:

- входное изображение сети представлено тензором $256 \times 256 \times 3$, соответствующим фрагменту RGB снимка;
- свертки не уменьшают размер карт признаков;
- обрезка карт признаков не используется для соединений пропуска;
- пакетная нормализация BN применяется после каждой нелинейности;
- функция активации ReLU из-за отсутствия корректировки весов нейронов на ее горизонтальной части заменена на хорошо себя зарекомендовавшую нелинейную функцию ELU;
- выходной тензор вычисляется C свертками с фильтрами размером 1 на 1, позволяя классифицировать пиксели сразу C классов (четыре класса деревьев *A. sibirica* и «Фон» или пять классов деревьев *P. sibirica* и «Фон»). Отметим, что архитектура другой предложенной модели включает аналогичные C свертки с фильтрами.

Модель Mo-Res-U-Net. Вторая из предложенных моделей полносверточных сетей – modification-residual-U-Net, сокращенно Mo-Res-U-Net. Она основана на модели Mo-U-Net (рис. 5), но имеет следующие изменения по сравнению с ее архитектурой: процедура Dropout заменена на пространственную процедуру Dropout и дополнительно включены остаточные блоки [35]. Архитектура модели Mo-Res-U-Net приведена на рис. 6. Важно отметить, что операции проецирования (Conv1x1) в главных ветвях остаточных блоков модели Mo-Res-U-Net не включают нелинейностей и смещений. Поэтому можно ожидать, что такие остаточные блоки могут привести к более стабильному процессу обучения модели и позволят упростить обратное распространение градиента.

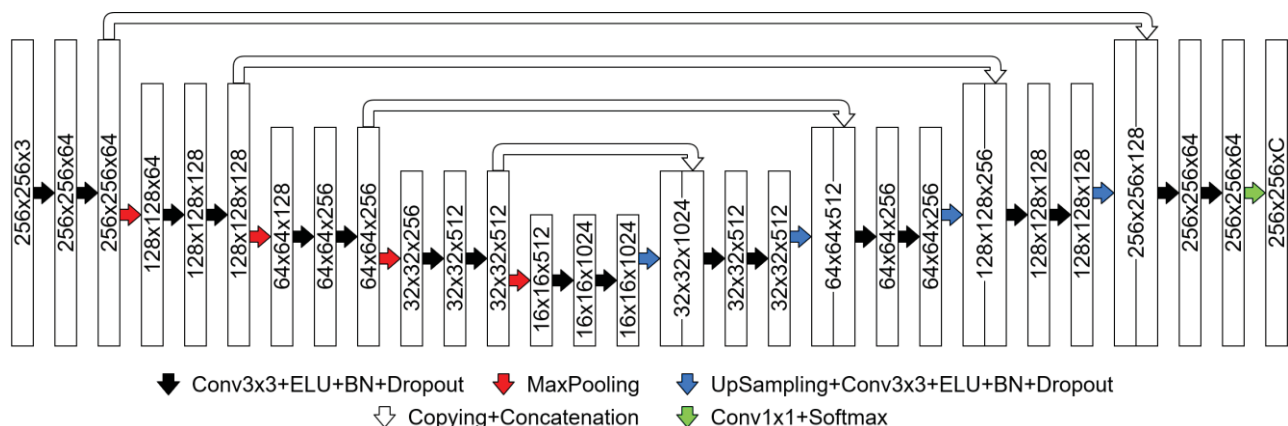


Рис. 5. Архитектура модели Mo-U-Net

Fig. 5. Mo-U-Net model architecture

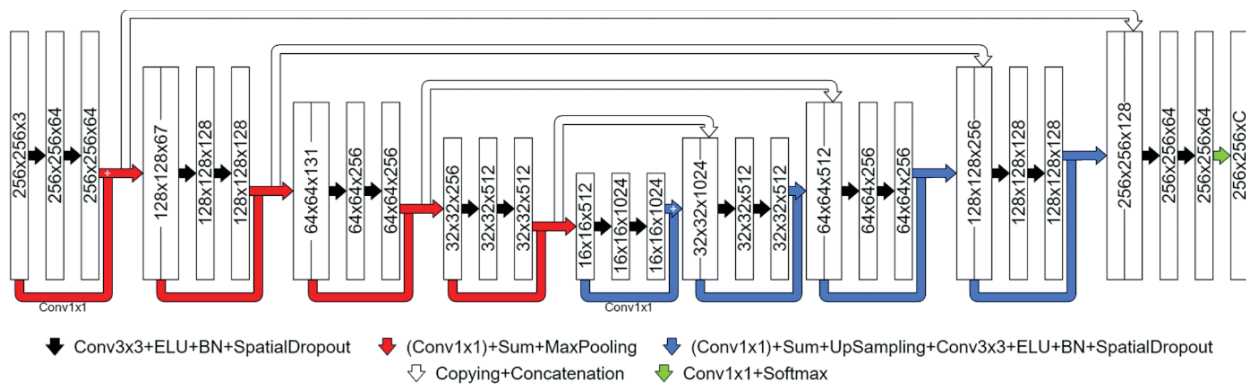


Рис. 6. Архитектура модели Mo-Res-U-Net

Fig. 6. Mo-Res-U-Net model architecture

Предложенные модели полносверточных сетей реализованы на языке Python 3 с использованием фреймворка PyTorch.

Метрики точности классификации деревьев на снимках и обучение разработанных моделей

Для оценки эффективности (качества) предложенных моделей полносверточных сетей, иными словами, для оценки точности классификации деревьев на снимках с БПЛА с помощью таких моделей, использовалась метрика Intersection over Union (*IoU*). Она считается общепринятой метрикой эффективности при решении задачи семантической сегментации цифровых изображений [36]. Метрика *IoUc* для каждого класса *c* деревьев может быть вычислена по формуле [36, 37]:

$$IoU_c = \frac{TP_c}{TP_c + FP_c + FN_c}, \quad (1)$$

где TP_c , FP_c и FN_c – количество, соответственно, истинно-положительных, ложно-положительных и ложно-отрицательных решений для деревьев класса *c*. Использовалась также метрика mean Intersection over Union (*mIoU*), рассчитываемая как среднее значение *IoUc* по всем *C* классам. Значения *IoUc* и *mIoU*, превышающие 0,5, соответствуют высокому качеству сегментации (высокой точности классификации деревьев на снимках) и указывают на то, что модели СНС, обеспечивающие такую точность классификации, найдут практическое применение в лесной отрасли. Для оценки эффективности разработанных моделей также использовались общеизвестные метрики *Precision*, *Recall* и *F-score*, что позволит сравнить результаты наших исследований с результатами других исследователей. Эти метрики определяются для каждого класса *c* деревьев следующим образом [38]:

$$Precision_c = \frac{TP_c}{TP_c + FP_c}, \quad (2)$$

$$Recall_c = \frac{TP_c}{TP_c + FN_c}, \quad (3)$$

$$F - score_c = \frac{2 * Precision_c * Recall_c}{Precision_c + Recall_c}. \quad (4)$$

Обучение каждой разработанной модели полносверточных сетей проводилось дважды. Первый раз эти модели обучались с использованием обучающей и валидационной выборок первого датасета с целью последующего решения первой задачи мультиклассификации на снимках пораженных деревьев пихты *A. Sibirica*. Второй раз они обучались с использованием обучающей и валидационной выборок второго датасета для решения задачи мультиклассификации пораженных деревьев кедра *P. Sibirica*. В целях улучшения обобщающей способности каждой из обучаемых моделей использовалась техника аугментации «на лету» (англ. *online augmentation*), позволяющая расширить обучающую выборку синтезированными примерами непосредственно во время обучения. Аугментация «на лету» включала выполняемые случайным образом следующие преобразования фрагментов: изменения масштаба изображений, их яркости и изменения их контраста, а также отражения по вертикальной оси и эластические преобразования.

Поиск оптимальных весовых коэффициентов каждой из предложенных моделей сетей осуществлялся для известной функции потерь *Focal Loss* [39]. Минимизация функции потерь проводилась с использованием алгоритма оптимизации Adam [40]. Для определения оптимальных гиперпараметров моделей использовался метод случайного поиска. В итоге для каждой из предложенных моделей были определены такие значения весовых коэффициентов, при которых метрики качества модели получили наибольшие значения, рассчитанные с использованием валидационной выборки каждого датасета.

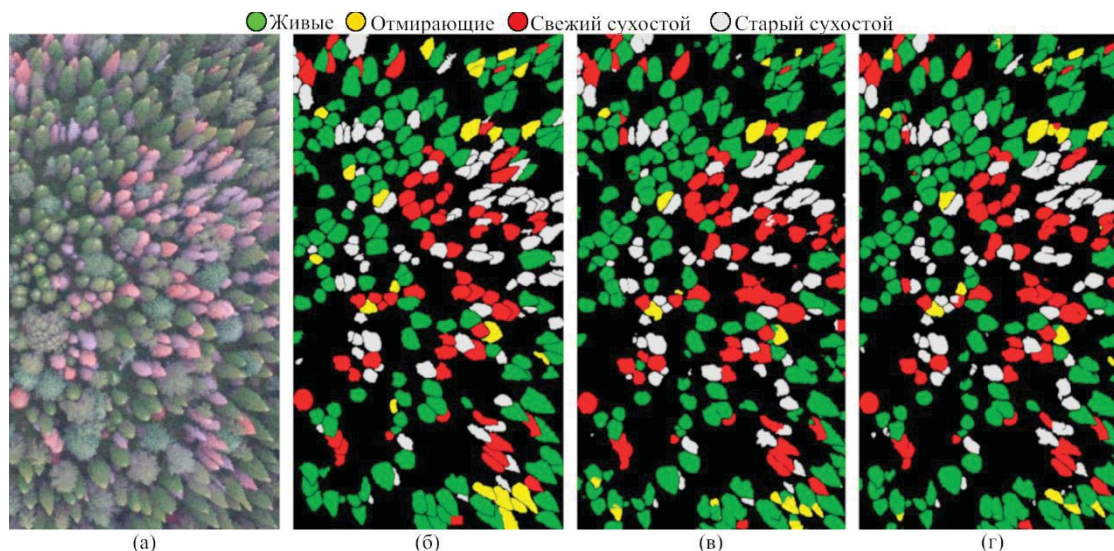


Рис. 7. Результаты сегментации деревьев *A. sibirica* на тестовом участке: а) изображение тестового участка; б) эталонная карта сегментации; в) результат сегментации с применением модели Mo-U-Net; г) результат сегментации с применением модели Mo-Res-U-Net

Fig. 7. Semantic segmentation results for the *A. sibirica* test area: а) test area; б) ground truth; в) Mo-U-Net segmentation result; г) Mo-Res-U-Net segmentation result

Результаты исследования моделей полносверточных сетей

Эффективность обученных для решения задачи мультиклассификации деревьев пихты *A. sibirica* предложенных моделей полносверточных сетей исследовалась с использованием тестовой выборки (снимка тестового участка) из первого датасета. На рис. 7 приведены результаты исследования этих моделей. Совместный визуальный анализ снимка тестового участка (рис. 7, а), его эталонной карты сегментации (рис. 7, б) и результирующих выходных карт сегментации при использовании каждой из моделей (рис. 7, в, г) показал, что эти модели способны воспроизводить границы крон деревьев пихты и правильно классифицировать значительную долю крон деревьев.

В табл. 3, 4 приведены результаты исследований разработанных моделей по всем метрикам, вычисленным по формулам (1)–(4). В табл. 4 приведены значения метрики *mIoU* для валидационной (Val.) и тестовой (Test) выборок. В таблицы дополнительными строками внесены также значения этих же метрик, полученные в работе [10] для классической модели U-Net на этом же датасете.

Обучение и валидация предложенных моделей полносверточных сетей проведены на обучающей и валидационной выборках второго датасета, сформированного для случая деревьев кедр *P. Sibirica*. Исследования этих обученных моделей проводились на тестовой выборке второго датасета, разработанной на основе четвертого (тестового) ортофотоплана. Результаты исследований для различных метрик приведены в табл. 5, 6.

Таблица 3. Точность классификации деревьев *A. sibirica* по метрикам Precision, Recall, F-score

Table 3. Accuracy of classification of *A. sibirica* trees in terms of Precision, Recall, F-score

Модель Model	Метрика Metric	Фон Back-ground	Живые Healthy	Отмирающие Dying	Свежий сухостой Fresh dead wood	Старый сухостой Old dead wood
Mo-U-Net	Recall _c	0,91	0,88	0,71	0,84	0,86
U-Net [10]		0,91	0,84	0,48	0,78	0,81
Mo-Res-U-Net		0,91	0,86	0,77	0,85	0,83
Mo-U-Net	Precision _c	0,94	0,83	0,62	0,87	0,72
U-Net [10]		0,91	0,81	0,50	0,91	0,76
Mo-Res-U-Net		0,94	0,81	0,58	0,90	0,77
Mo-U-Net	F-score _c	0,92	0,85	0,66	0,86	0,78
U-Net [10]		0,91	0,84	0,55	0,84	0,79
Mo-Res-U-Net		0,92	0,84	0,67	0,87	0,80

Таблица 4. Точность классификации деревьев *A. sibirica* по метрикам IoUc и mIoU

Table 4. Accuracy of classification of *A. sibirica* trees in terms of IoUc and mIoU

Модель Model	IoUc					mIoU	
	Фон Back-ground	Живые Healthy	Отмирающие Dying	Свежий сухостой Fresh dead wood	Старый сухостой Old dead wood	Val.	Test
Mo-U-Net	0,86	0,74	0,51	0,75	0,65	0,78	0,70
U-Net [10]	0,84	0,72	0,38	0,72	0,65	–	0,66
Mo-Res-U-Net	0,86	0,72	0,53	0,76	0,67	0,86	0,71

Таблица 5. Точность классификации деревьев *P. sibirica* по метрикам $Precision_c$, $Recall_c$, $F-score_c$

Table 5. Accuracy of classification of *P. sibirica* trees in terms of $Precision_c$, $Recall_c$, $F-score_c$

Модель Model	Метрика Metric	Фон Back-ground	Условно здоровое Healthy	Свежеза-селенное Recently colonized	Сухойшей вершиной Dry treetop	Свежий сухойстой Fresh dead wood	Старый сухойстой Old dead wood
Mo-U-Net	$Recall_c$	0,89	0,85	0,73	0,73	0,72	0,87
Mo-Res-U-Net		0,88	0,87	0,75	0,74	0,71	0,90
Mo-U-Net	$Precision_c$	0,95	0,83	0,59	0,59	0,79	0,82
Mo-Res-U-Net		0,96	0,84	0,60	0,60	0,78	0,79
Mo-U-Net	$F-score_c$	0,92	0,84	0,65	0,65	0,75	0,84
Mo-Res-U-Net		0,92	0,85	0,67	0,66	0,73	0,82

Таблица 6. Точность классификации деревьев *P. sibirica* по метрикам $IoUc$ и $mIoU$

Table 6. Accuracy of classification of *P. sibirica* trees in terms of $IoUc$ and $mIoU$

Модель Model	$IoUc$						$mIoU$	
	Фон Back-ground	Условно здоровое Healthy	Свежеза-селенное Recently colonized	Сухойшей вершиной Dry treetop	Свежий сухойстой Fresh dead wood	Старый сухойстой Old dead wood	Val.	Test
Mo-U-Net	0,85	0,74	0,51	0,52	0,62	0,72	0,82	0,66
Mo-Res-U-Net	0,84	0,75	0,52	0,51	0,61	0,73	0,85	0,66

Обсуждение полученных результатов исследований

Анализ результатов исследований, приведенных в табл. 3, 4, показывает, что наибольшую точность классификации деревьев пихты класса «Живые» по всем метрикам, а также по метрике $Recall$ для деревьев класса «Старый сухойстой» и по метрике $Precision$ для класса «Отмирающие» показывает модель Mo-U-Net, а модель Mo-Res-U-Net находится на втором месте. Для деревьев классов «Отмирающие», «Свежий сухойстой» и «Старый сухойстой» по всем метрикам самой точной является модель Mo-Res-U-Net, а модель Mo-U-Net находится на втором месте. Для класса «Фон» обе эти модели дают одинаковую точность. Классическая модель U-Net уступает предложенным моделям по всем метрикам и всем классам деревьев кроме класса «Свежий сухойстой», для которого она показывает более высокую точность по метрике $Precision_c$. Для класса «Фон» по метрике $Recall_c$ все три модели дают одинаковую точность классификации. Отметим, что модель U-Net по всем метрикам для про-

межуточного класса деревьев «Отмирающие» показывает очень низкую точность, в том числе по метрике $IoUc$ значительно меньшую порогового значения 0,5. В отличие от этого отрицательного результата модели Mo-Res-U-Net и Mo-U-Net дают точность классификации по метрике $IoUc$, соответственно 0,53 и 0,51, что превышает порог 0,5. Более того, модель Mo-Res-U-Net по метрике $mIoU$ дает наилучшее значение 0,71, а модель Mo-U-Net с результатом 0,70 находится на втором месте.

Анализ результатов исследований, приведенных в табл. 5, 6, позволяет считать, что модель Mo-Res-U-Net показывает более высокие результаты, чем модель Mo-U-Net, по большинству метрик и классов деревьев кедра. Исключением являются случаи, когда модель Mo-U-Net дает более высокие результаты, чем модель Mo-Res-U-Net, по всем метрикам для класса «Свежий сухойстой» и по метрикам $Recall_c$ и $IoUc$ для класса «Фон», а также по метрике $IoUc$ для класса «Свежий сухойстой». По метрике $mIoU$ обе модели дают одинаковый результат 0,66. Отметим, что для промежуточных классов деревьев кедра «Свежезаселенное», «С усохшей вершиной» и «Свежий сухойстой» значения метрики $IoUc$ небольшие, но превышают порог 0,5, что имеет практическое значение. Кроме того, эти результаты по точности классификации деревьев значительно лучше результатов из [26], где показано, что классическая модель U-Net дает точность классификации двух промежуточных классов (состояний) деревьев кедра, меньшую порога 0,5.

На основе анализа результатов исследований сформулируем ряд выводов. Во-первых, как было отмечено на этапе разведочного анализа датасетов (табл. 1, 2), основную сложность для сегментации снимков крон хвойных деревьев *A. sibirica* и *P. sibirica* будут представлять классы деревьев в промежуточных состояниях (состояния между здоровым деревом и старым сухостоем). Это подтверждается, в первую очередь, результатами исследований (табл. 3, 4) моделей полносверточных сетей по точности классификации деревьев пихты *A. sibirica* для промежуточного класса «Отмирающие». Такие результаты объясняются небольшим количеством деревьев этого класса в обучающей выборке и наличием пространственных признаков, например, расположение ветвей, подобных признакам крон деревьев класса «Живые» и деревьев ели сибирской *Picea obovata* (Turcz) из класса «Фон». Поэтому малое число отличительных признаков у крон деревьев класса «Отмирающие» не позволяет моделям сформировать детальные карты признаков и в итоге показать высокую точность классификации деревьев этого класса. Из табл. 5, 6 следует, что для промежуточных классов деревьев кедра «Свежезаселенное», «С усохшей вершиной» и

«Свежий сухостой» значения метрик также небольшие. Такие результаты классификации объясняются небольшим количеством деревьев этих классов в обучающей выборке. Более того, модели полносверточных сетей должны извлекать на снимках кроме спектральных признаков большое число пространственных (текстурных и геометрических) признаков крон деревьев кедра, однако кроны деревьев этих трех классов имеют, по видимому, по причине непрерывности процесса ухудшения состояния деревьев при поражении вредителями ряд близких пространственных признаков, например, расположение ветвей. Кроме того, деревья класса «Свежезаселенное» имеют пространственные признаки, подобные признакам крон деревьев класса «Условно здоровое» и деревьев сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. из класса «Фон». Поэтому малое число отличительных признаков у крон деревьев этих классов не позволяет моделям сформировать детальные карты признаков и в итоге показать высокую точность классификации деревьев.

Во-вторых, в отличие от классической модели U-Net, для всех классов хвойных деревьев *A. sibirica* и *P. sibirica*, включая промежуточные классы, модели Mo-U-Net и Mo-Res-U-Net показывают точность мультиклассификации по метрикам *IoUc* и *mIoU* выше порогового значения 0,5. Это указывает на то, что такие модели имеют практическое значение для специалистов лесной отрасли, поскольку позволяют выявлять деревья этих хвойных пород на ранней стадии поражения вредителями.

В-третьих, из табл. 4, 6 следует, что значения метрики *mIoU* для каждой из предложенных моделей на валидационных выборках значительно превышают значения этой метрики, полученные на тестовых выборках сформированных датасетов. Как в случае с пораженными деревьями пихты *A. sibirica*, так и для деревьев кедра *P. sibirica* эти результаты объясняются небольшим размером используемых нами тестовых выборок. Эту проблему можно частично решить путем подготовки тестовых выборок большего объема. При этом, по видимому, удастся добиться повышения точности классификации пораженных хвойных деревьев.

Наконец, при анализе результатов исследований показана возможность практического применения предложенных моделей полносверточных сетей, причем предпочтение в большинстве случаев следует отдать модели Mo-Res-U-Net. Однако ввиду большей алгоритмической сложности этой модели по сравнению с моделью Mo-U-Net при анализе снимков хвойных деревьев *A. sibirica* или *P. sibirica* в производственных объемах или в отсутствии больших вычислительных ресурсов у специалистов лесной отрасли следует применять модель

Mo-U-Net. Это необходимо также учитывать при создании на основе этих моделей Mo-U-Net и Mo-Res-U-Net новых и практически важных для лесного хозяйства технологий распознавания состояния пораженных вредителями хвойных деревьев на снимках с КА и БП

Заключение

Рассмотрена проблема оперативного мониторинга лесных ресурсов. Показано, что при решении лесоустроительных задач необходимы современная методология и инновационный инструментарий для оперативного проведения мониторинга лесов и анализа полученных данных. Сегодня заложены основы такой методологии в виде набора требований и рекомендаций при использовании КА и (или) БПЛА различных классов со специальной аппаратурой для получения многоспектральных снимков лесов высокого и сверхвысокого разрешения. Проведен аналитический обзор инструментов, используемых сегодня при автоматическом анализе снимков, получаемых при мониторинге лесов с помощью КА и (или) БПЛА. Выявлено, что постепенно осуществляется переход от традиционных классификаторов к методам машинного обучения, а в последние годы исследователи указывают на перспективность методов и моделей глубокого обучения. Появилось довольно много работ по применению моделей СНС к анализу снимков деревьев при решении ряда прикладных задач, однако пока такие модели не обеспечивают требуемую точность при решении задач мультиклассификации деревьев на снимках. Тем не менее показано, что среди моделей СНС наиболее перспективным по критериям точность–скорость является класс полносверточных нейронных сетей.

Рассмотрены актуальные задачи мультиклассификации хвойных деревьев пихты *A. sibirica* и кедра *P. sibirica*, пораженных насекомыми-вредителями на снимках с БПЛА. Для их решения созданы два датасета по снимкам с БПЛА и на основе классической модели полносверточной сети U-Net разработаны модели Mo-U-Net и Mo-Res-U-Net. Эти модели были обучены с использованием обучающих и валидационных выборок из датасетов и исследованы с применением тестовых выборок. По результатам исследований показано, что, в отличие от классической модели U-Net, для всех классов деревьев *A. sibirica* и *P. sibirica*, включая промежуточные классы, эти модели дают точность мультиклассификации по метрикам *IoUc* и *mIoU* выше порогового значения 0,5. Это указывает на практическое значение таких моделей для лесной отрасли, поскольку позволяет выявлять деревья этих хвойных пород на ранней стадии поражения вредителями.

Близость полученных результатов исследований по точности классификации пораженных вредителями хвойных деревьев двух разных пород *A. sibirica* и *P. sibirica*, различающихся, в первую очередь, разным числом промежуточных состояний, и идентичность сделанных по этим результатам выводов позволяют нам рекомендовать модели Мо-

Res-U-Net и Мо-U-Net для решения задач мультиклассификации на снимках пораженных вредителями деревьев других хвойных пород. В первую очередь эти модели могут быть применены для мультиклассификации на снимках пораженных деревьев сосны и ели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Economic impacts of forest pests: a case study of spruce budworm outbreaks and control in New Brunswick, Canada / W.Y. Chang, V.A. Lantz, C.R. Hennigar, D.A. MacLean // Canadian Journal of Forest Research. – 2012. – Vol. 42. – P. 490–505. DOI: 10.1139/x11-190.
2. Global forest area disturbance from fire, insect pests, diseases and severe weather events / P. van Lierop, E. Lindquist, S. Sathyapala, G. Franceschini // Forest Ecology and Management. – 2015. – Vol. 352. – P. 78–88. DOI: 10.1016/j.foreco.2015.06.010.
3. Invasive pests of forests and urban trees in Russia: origin pathways, damage, and management / D. Musolin, N. Kirichenko, N. Karpun, M. Mandelshtam, A. Selikhovkin, E. Zhuravleva, E. Aksenenko, V. Golub, I. Kerchev, R. Vasaitis, M. Volkovitsch, E. Zhuravleva, A. Selikhovkin // Forests. – 2022. – Vol. 13. – P. 521. DOI: 10.3390/f13040521.
4. Технология мониторинга пихтовых лесов в зоне инвазии уссурийского полиграфа в Сибири / С.А. Кривец, Э.М. Бисирова, Е.С. Волкова, Н.М. Дебков, И.А. Керчев, М.А. Мельник, А.Н. Никифоров, Н.А. Чернова. – Томск: УМИУМ, 2018. – 74 с.
5. Bystrov S.O., Antonov I.A. First record of the four-eyed fir bark beetle *Polygraphus proximus* Blandford, 1894 (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae) from Irkutsk province Russia // Entomological Review. – 2019. – Vol. 99. – P. 54–55. DOI: 10.1134/S001387381901007X.
6. Dedyukhin S.V., Titova V.V. Finding of the bark beetle *Polygraphus proximus* Blandford, 1894 (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae) in Udmurtia // Russian Journal of Biological Invasions. – 2021. – Vol. 12. – P. 258–263. DOI: 10.1134/S2075111721030048.
7. Small spruce bark beetle *Ips amitinus* (Eichhoff, 1872) (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae): A new alien species in West Siberia / I.A. Kerchev, M.Yu. Mandelshtam, S.A. Krivets, Yu.Yu. Ilinsky // Entomological review. – 2019. – Vol. 99. – P. 639–644. DOI: 10.1134/S0013873819050075.
8. Distribution of the Small Spruce Bark Beetle *Ips amitinus* (Eichhoff, 1872) in Western Siberia / I.A. Kerchev, S.A. Krivets, E.M. Bisirova, N.A. Smirnov // Russian Journal of Biological Invasions. – 2022. – Vol. 13. – P. 58–63. DOI: 10.1134/S2075111722010076.
9. Detection of fir trees (*Abies sibirica*) damaged by the Bark Beetle in unmanned aerial vehicle images with deep learning / A. Safonova, S. Tabik, D. Alcaraz-Segura, A. Rubtsov, Y. Maglinets, F. Herrera // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11. – P. 643–662. DOI: 10.3390/rs11060643.
10. Семантическая сегментация поврежденных деревьев пихты на снимках с беспилотных летательных аппаратов / И.А. Керчев, К.А. Маслов, Н.Г. Марков, О.С. Токарева // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2021. – Т. 18. – № 1. – С. 116–126. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-116-126.
11. Surveillance of pine wilt disease by high resolution satellite / H. Zhou, X. Yuan, H. Zhou, H. Shen, L. Ma, L. Sun // Journal of Forestry Research. – 2022. – Vol. 33. – P. 1401–1408. DOI: 10.1007/s11676-021-01423-8.
12. Woodland mapping at single-tree levels using object-oriented classification of UAV images / A. Chenari, Y. Erfanifard, M. Dehghani, H.R. Pourghasemi // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2017. – Vol. XLII-4/W4. – P. 43–49. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-4-W4-43-2017.
13. Improving tree species classification using UAS multispectral images and texture measures / R. Gini, G. Sona, G. Ronchetti, D. Passoni, L. Pinto // International Journal of Geo-Informatics. – 2018. – Vol. 7. – P. 315. DOI: 10.3390/ijgi7080315.
14. Detection of damaged pine tree by the pine wilt disease using UAV image / S. Lee, S. Park, G. Baek, H. Kim, C. Lee // Korean Journal of Remote Sensing. – 2019. – Vol. 35. – P. 359–373. DOI: 10.7780/kjrs.2019.35.3.2.
15. Onishi M., Ise T. Automatic classification of trees using a UAV onboard camera and deep learning // arXiv preprint arXiv:1804.10390. – 2018.
16. Замятин А.В., Марков Н.Г. Анализ динамики земной поверхности по данным дистанционного зондирования Земли. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 176 с.
17. Марков Н.Г., Маслов К.А. Применение методов машинного и глубокого обучения в задачах семантической сегментации изображений лесного покрова // Молодежь и современные информационные технологии: Труды XVIII Международн. научно-практ. конф. – Томск, 22–26 марта 2021. – Томск: ТПУ, 2021. – С. 55–57.
18. Jintasuttisak T., Edirisinghe E., Elbattay A. Deep neural network based date palm tree detection in drone imagery // Computers and Electronics in Agriculture. – 2022. – Vol. 192. DOI: 10.1016/j.compag.2021.106560.
19. A detection method for individual infected pine trees with pine wilt disease based on deep learning / Y. Zhou, W. Liu, H. Bi, R. Chen, S. Zong, Y. Luo // Forests. – 2022. – Vol. 13. – P. 1880. DOI: 10.3390/f13111880.
20. Early detection of pine wilt disease using deep learning algorithms and UAV-based multispectral imagery / R. Yu, Y. Luo, Q. Zhou, X. Zhang, D. Wu, L. Ren // Forest Ecology and Management. – 2021. – Vol. 497. DOI: 10.1016/j.foreco.2021.119493.
21. Early-stage pine wilt disease detection via multi-feature fusion in UAV imagery / W. Xie, H. Wang, W. Liu, H. Zang // Forests. – 2024. – Vol. 15. – P. 171. DOI: 10.3390/f15010171.

22. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: convolutional networks for biomedical image segmentation // *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*. – 2015. – Vol. 9351. DOI: 10.1007/978-3-319-24574-4_28.
23. Koon K., Krämer M., Würz H.M. Comparison of CNN-based segmentation models for forest type classification // *AGILE: GIScience Series*. – 2022. – Vol. 3. – P. 42. DOI: 10.5194/agile-giss-3-42-2022.
24. Using U-Net-like deep convolutional neural networks for precise tree recognition in very high resolution RGB (Red, Green, Blue) satellite images / K.A. Korznikov, D.E. Kislov, J. Altman, J. Dolezal, A.S. Vozmishcheva, P.V. Krestov // *Forests*. – 2021. – Vol. 12. – P. 66. DOI: 10.3390/f12010066.
25. Wu Z., Jiang X. Extraction of pine wilt disease regions using UAV RGB imagery and improved mask R-CNN models fused with ConvNeXt // *Forests*. – 2023. – Vol. 14. – P. 1672. DOI: 10.3390/f14081672.
26. Модели U-Net для семантической сегментации поврежденных деревьев сосны сибирской кедровой на снимках с БПЛА / Н.Г. Марков, К.А. Маслов, И.А. Керчев, О.С. Токарева // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2022. – Т. 19. – № 1. – С. 65–77. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-65-77.
27. EDSSA: an encoder-decoder semantic segmentation networks accelerator on OpenCL-based FPGA platform / H. Huang, Y. Wu, M. Yu, X. Shi, F. Qiao, L. Luo, Q. Wei, X. Liu // *Sensors*. – 2020. – Vol. 20. – P. 3969. DOI: 10.3390/s20143969.
28. Optimizing CNN-based segmentation with deeply customized convolutional and deconvolutional architectures on FPGA / S. Liu, H. Fan, X. Niu, H-C. Ng, Y. Chu, W. Luk // *ACM Transactions on Reconfigurable Technology and Systems*. – 2018. – Vol. 11. – P. 1–22. DOI: 10.1145/3242900.
29. Optimizing FPGA-based convolutional encoder-decoder architecture for semantic segmentation / M. Yu, H. Huang, H. Liu, S. He, F. Qiao, L. Luo, F. Xie, X. Liu, H. Yang // *IEEE 9th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*. – Suzhou, 2019. – IEEE, 2019. – P. 1436–1440.
30. ATT squeeze U-Net: a lightweight network for forest fire detection and recognition / J. Zhang, H. Zhu, P. Wang, X. Ling // *IEEE Access*. – 2021. – Vol. 9. – P. 10858–10870. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3050628.
31. Analysis of hardware-implemented U-Net-Like convolutional neural networks / I. Zhev, K. Maslov, N. Markov, E. Mytsko // *Communications in Computer and Information Science*. – 2024. – Vol. 1559. – P. 52–63. DOI: 10.1007/978-3-031-50423-5_5.
32. Clevert D.A., Unterthiner T., Hochreiter S. Fast and accurate deep network learning by Exponential Linear Units (ELUs) // *arXiv preprint arXiv:1511.07289*. – 2015.
33. Ioffe S., Szegedy C. Batch normalization: accelerating deep network training by reducing internal covariate shift // *International conference on machine learning*. – Lille, 2015. – JMLR: W&CP, 2015. – Vol. 37. – P. 448–456.
34. A simple way to prevent neural networks from overfitting / N. Srivatsava, J. Hinton, A. Krizhevsky, I. Sutskever, R. Salakhutdinov // *Journal of Machine Learning Research*. – 2014. – Vol. 15. – P. 1929–1958.
35. Deep residual learning for image recognition / K. He, X. Zhang, S. Ren, J. Sun // *IEEE conference on computer vision and pattern recognition (CVPR)*. – Las Vegas, 2016. – IEEE, 2016. – P. 770–778. DOI: 10.1109/CVPR.2016.90.
36. Rahman M.A., Wang Y. Optimizing intersection-over-union in deep neural networks for image segmentation // *Advances in Visual Computing. ISVC 2016. Lecture Notes in Computer Science* / Eds. G. Bebis et al. – 2016. – Vol. 10072. – P. 234–244. DOI: 10.1007/978-3-319-50835-1_22.
37. Optimizing the dice score and jaccard index for medical image segmentation: theory & practice / J. Bertels, T. Eelbode, M. Berman, D. Vandermeulen, F. Maes, R. Bisschops, M. Blaschko // *Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention. MICCAI 2019. Lecture Notes in Computer Science* / Eds. D. Shen et al. – 2019. – Vol. 11765. DOI: 10.1007/978-3-030-32245-8_11.
38. Hossain M., Sulaiman M.N. A review on evaluation metrics for data classification evaluations // *International Journal of Data Mining & Knowledge Management Process*. – 2015. – Vol. 5. DOI: 10.5121/ijdkp.2015.5201.
39. Focal loss for dense object detection / T.-Yi. Lin, P. Goyal, R. Girshick, K. He, P. Dollár // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. – 2020. – Vol. 42. – P. 318–327. DOI: 10.1109/TPAMI.2018.2858826.
40. Kingma D.P., Ba J. Adam: a method for stochastic optimization // *arXiv preprint arXiv:1412.6980*. – 2016. DOI: 10.48550/arXiv.1412.6980.

Информация об авторах

Николай Григорьевич Марков, доктор технических наук, профессор отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. markovng@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4586-2662>

Кристиан Родриго Мачука, аспирант отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, kristianrodrigo1@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7953-7294>

Поступила в редакцию: 29.02.2024

Поступила после рецензирования: 14.03.2024

Принята к публикации: 26.04.2024

REFERENCES

1. Chang WY., Lantz V.A., Hennigar C.R., MacLean D.A. Economic impacts of forest pests: a case study of spruce budworm outbreaks and control in New Brunswick, Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 2012, vol. 42, pp. 490–505. DOI: 10.1139/x11-190.
2. Van Lierop P., Lindquist E., Sathyapala S., Franceschini G. Global forest area disturbance from fire, insect pests, diseases and severe weather events. *Forest Ecology and Management*, 2015, vol. 352, pp. 78–88. DOI: 10.1016/j.foreco.2015.06.010.
3. Musolin D., Kirichenko N., Karpun N., Mandelshtam M., Selikhovkin A., Zhuravleva E., Aksenenko E., Golub V., Kerchev I., Vasaitis R., Volkovits M., Zhuravleva E., Selikhovkin A. Invasive pests of forests and urban trees in Russia: origin pathways, damage, and management. *Forests*, 2022, vol. 13, pp. 521. DOI: 10.3390/f13040521.
4. Krivets S.A., Bisirova E.M., Volkova E.S., Debkov N.M., Kerchev I.A., Melnik M.A., Nikiforov A.N., Chernova N.A. *Technology for monitoring fir forests in the Ussuri polygraph invasion zone in Siberia*. Tomsk UMIUM Publ., 2018. 74 p. (In Russ.)
5. Bystrov S.O., Antonov I.A. First record of the four-eyed fir bark beetle *Polygraphus proximus* Blandford, 1894 (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae) from Irkutsk province Russia. *Entomological Review*, 2019, vol. 99, pp. 54–55. DOI: 10.1134/S001387381901007X.
6. Dedyukhin S.V., Titova V.V. Finding of the bark beetle *Polygraphus proximus* Blandford, 1894 (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae) in Udmurtia. *Russian Journal of Biological Invasions*, 2021, vol. 12, pp. 258–263. DOI: 10.1134/S2075111721030048.
7. Kerchev I.A., Mandelshtam M.Yu., Krivets S.A., Ilinsky Yu.Yu. Small spruce bark beetle *Ips amitinus* (Eichhoff, 1872) (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae): a new alien species in West Siberia. *Entomological review*, 2019, vol. 99, pp. 639–644. DOI: 10.1134/S0013873819050075.
8. Kerchev I.A., Krivets S.A., Bisirova E.M., Smirnov N.A. Distribution of the Small Spruce Bark Beetle *Ips amitinus* (Eichhoff, 1872) in Western Siberia. *Russian Journal of Biological Invasions*, 2022, vol. 13, pp. 58–63. DOI: 10.1134/S2075111722010076.
9. Safonova A., Tabik S., Alcaraz-Segura D., Rubtsov A., Maglinets Y., Herrera F. Detection of Fir Trees (*Abies sibirica*) damaged by the bark beetle in unmanned aerial vehicle images with deep learning. *Remote Sensing*, 2019, vol. 11, pp. 643–662. DOI: 10.3390/rs11060643.
10. Kerchev I.A., Maslov K.A., Markov N.G., Tokareva O.S. Semantic segmentation of damaged fir trees in images from unmanned aerial vehicles. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*, 2021, vol. 18, no. 1, pp. 116–126. (In Russ.) DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-116-126.
11. Zhou H., Yuan X., Zhou H., Shen H., Ma L., Sun L. Surveillance of pine wilt disease by high resolution satellite. *Journal of Forestry Research*, 2022, vol. 33, pp. 1401–1408. DOI: 10.1007/s11676-021-01423-8.
12. Chenari A., Erfanifard Y., Dehghani M., Pourghasemi H.R. Woodland mapping at single-tree levels using object-oriented classification of UAV images. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2017, vol. XLII-4/W4, pp. 43–49. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-4-W4-43-2017.
13. Gini R., Sona G., Ronchetti G., Passoni D., Pinto L. Improving tree species classification using UAS multispectral images and texture measures. *International Journal of Geo-Informatics*, 2018, vol. 7, pp. 315. DOI: 10.3390/ijgi7080315.
14. Lee S., Park S., Baek G., Kim H., Lee C. Detection of damaged pine tree by the pine wilt disease using UAV image. *Korean Journal of Remote Sensing*, 2019, vol. 35, pp. 359–737. DOI: 10.7780/kjrs.2019.35.3.2.
15. Onishi M., Ise T. Automatic classification of trees using a UAV onboard camera and deep learning. *arXiv preprint arXiv:1804.10390*, 2018.
16. Zamyatin A.B., Markov N.G. *Analysis of the dynamics of the Earth's surface based on remote sensing data*. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2007. 176 p. (In Russ.)
17. Markov N.G., Maslov K.A. Application of machine and deep learning methods in problems of semantic segmentation of forest cover images. *Youth and modern information technologies. Proceedings of the XVIII International practical conference*. Tomsk, March 22–26, 2021. Tomsk, TPU Publ. House, 2021. pp. 55–57. (In Russ.)
18. Jintasuttisak T., Edirisinghe E., Elbattay A. Deep neural network based date palm tree detection in drone imagery. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, vol. 192. DOI: 10.1016/j.compag.2021.106560.
19. Zhou Y., Liu W., Bi H., Chen R., Zong S., Luo Y. A detection method for individual infected pine trees with pine wilt disease based on deep learning. *Forests*, 2022, vol. 13, pp. 1880. DOI: 10.3390/f13111880.
20. Yu R., Luo Y., Zhou Q., Zhang X., Wu D., Ren L. Early detection of pine wilt disease using deep learning algorithms and UAV-based multispectral imagery. *Forest Ecology and Management*, 2021, vol. 497. DOI: 10.1016/j.foreco.2021.119493.
21. Xie W., Wang H., Liu W., Zang H. Early-Stage Pine Wilt Disease Detection via Multi-Feature Fusion in UAV Imagery. *Forests*, 2024, vol. 15, pp. 171. DOI: 10.3390/f15010171.
22. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-net: convolutional networks for biomedical image segmentation. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*, 2015, vol. 9351. DOI: 10.1007/978-3-319-24574-4_28.
23. Kocou K., Krämer M., Würz H.M. Comparison of CNN-based segmentation models for forest type classification. *AGILE: GIScience Series*, 2022, vol. 3, pp. 42. DOI: 10.5194/agile-giss-3-42-2022.
24. Korznikov K.A., Kislov D.E., Altman J., Dolezal J., Vozmishcheva A.S., Krestov P.V. Using U-net-like deep convolutional neural networks for precise tree recognition in very high resolution RGB (Red, Green, Blue) satellite images. *Forests*, 2021, vol. 12, pp. 66. DOI: 10.3390/f12010066.
25. Wu Z., Jiang X. Extraction of pine wilt disease regions using UAV RGB imagery and improved mask R-CNN models fused with ConvNeXt. *Forests*, 2023, vol. 14, pp. 1672. DOI: 10.3390/f14081672.
26. Markov N.G., Maslov K.A., Kerchev I.A., Tokareva O.S. U-Net models for semantic segmentation of damaged Siberian pine trees in UAV images. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*, 2022, vol. 19, no. 1, pp. 65–77. (In Russ.) DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-65-77.

27. Huang H., Wu Y., Yu M., Shi X., Qiao F., Luo L., Wei Q., Liu X. EDSSA: an encoder-decoder semantic segmentation networks accelerator on OpenCL-Based FPGA platform. *Sensors*, 2020, vol. 20, pp. 3969. DOI: 10.3390/s20143969.
28. Liu S., Fan H., Niu X., Ng H-C., Chu Y., Luk W. Optimizing CNN-based segmentation with deeply customized convolutional and deconvolutional architectures on FPGA. *ACM Transactions on Reconfigurable Technology and Systems*, 2018, vol. 11, pp. 1–22. DOI: 10.1145/3242900.
29. Yu M., Huang H., Liu H., He S., Qiao F., Luo L., Xie F., Liu X., Yang H. Optimizing FPGA-based convolutional encoder-decoder architecture for semantic segmentation. *IEEE 9th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*. Suzhou, 2019. pp. 1436–1440.
30. Zhang J., Zhu H., Wang P., Ling X. ATT squeeze U-net: a lightweight network for forest fire detection and recognition. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 10858–10870. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3050628.
31. Zoev I., Maslov K., Markov N., Mytsko E. Analysis of hardware-implemented U-net-like convolutional neural networks. *Communications in Computer and Information Science*, 2024, vol. 1559, pp. 52–63. DOI: 10.1007/978-3-031-50423-5_5.
32. Clevert D.A., Unterthiner T., Hochreiter S. Fast and accurate deep network learning by Exponential Linear Units (ELUs). *arXiv preprint arXiv:1511.07289*, 2015.
33. Ioffe S., Szegedy C. Batch normalization: accelerating deep network training by reducing internal covariate shift. *International conference on machine learning*. Lille, 2015. JMLR, W&CP, 2015. Vol. 37, pp. 448–456.
34. Srivatsava N., Hinton J., Krizhevsky A., Sutskever I., Salakhutdinov R. A simple way to prevent neural networks from overfitting. *Journal of Machine Learning Research*, 2014, vol. 15, pp. 1929–1958.
35. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep residual learning for image recognition. *IEEE conference on computer vision and pattern recognition (CVPR)*. Las Vegas, 2016. pp. 770–778. DOI: 10.1109/CVPR.2016.90.
36. Rahman M.A., Wang Y. Optimizing intersection-over-union in deep neural networks for image segmentation. *Advances in Visual Computing, ISVC 2016, Lecture Notes in Computer Science*. Ed. by G. Bebis. 2016, vol. 10072, pp. 234–244. DOI: 10.1007/978-3-319-50835-1_22.
37. Bertels J., Eelbode T., Berman M., Vandermeulen D., Maes F., Bisschops R., Blaschko M. Optimizing the dice score and jaccard index for medical image segmentation: theory & practice. *Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention, MICCAI 2019, Lecture Notes in Computer Science*. Ed. by D. Shen. 2019, vol. 11765. DOI: 10.1007/978-3-030-32245-8_11.
38. 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. DOI: 10.5121/ijdkp.2015.5201.
39. Lin T-Yi., Goval P., Girshick R., He K., Dollar P. Focal loss for dense object detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2020, vol. 42, pp. 318–237. DOI: 10.1109/TPAMI.2018.2858826.
40. Kingma D.P., Ba J. Adam: a method for stochastic optimization. *arXiv preprint arXiv:1412.6980*, 2016. DOI: 10.48550/arXiv.1412.6980.

Information about the authors

Nikolai G. Markov, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; markovng@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4586-2662>

Cristian R. Machuca, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; kristianrodrigo1@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7953-7294>

Received: 29.02.2024

Revised: 14.03.2024

Accepted: 26.04.2024

УДК 674.047.3, 510.644.4
DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4500
Шифр специальности ВАК: 2.3.2, 2.3.3

Синтез алгоритма автоматизированной подстройки параметров процесса сушки пиломатериалов

В.В. Гречушников[✉], А.А. Шилин, С.В. Прохоров

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

[✉] grechvv@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. Процесс сушки пиломатериалов связан с большими рисками получения некачественного продукта. Зачастую проблема может скрываться в нарушении технологического процесса и в неправильной настройке параметров режимов сушки на разных ее этапах. Решением может являться контроль работы и подстройка оптимальных параметров работы сушки для минимизации брака. Процедура автоматизированной подстройки параметров обычно связана с оценкой специалистом качества продукта, по которой следует принять решение по определению параметров с учетом признаков нарушения технологического процесса. В технических и научных изданиях присутствует обобщенная информация о методах подбора параметров для различных ситуаций, которую можно формализовать и включить в алгоритмы подстройки параметров программируемого логического контроллера. В статье освещен алгоритм подбора оптимальных параметров работы сушки с использованием Fuzzy-контроллера. **Цель:** создать алгоритм с использованием Fuzzy-контроллера, который позволяет настроить параметры техпроцесса и адаптировать параметры режима к сушильной камере в заданных условиях эксплуатации. **Методы:** анализ базы данных о техпроцессах, полученных в течение полутора лет работы системы диспетчеризации основных параметров для 28 полных циклов сушки пиломатериала. **Результаты.** Сформирован алгоритм автоматизированной подстройки параметров для трех этапов сушки на основании результатов опроса заказчика и технолога (оператора сушильной камеры) о качестве продукта, позволяющий снизить вероятность получения некачественного продукта, а также стимулировать обслуживающий персонал к корректному формированию паспорта технологического процесса. **Выводы.** Включение в цепь управления автоматизированного контура подстройки параметров позволяет минимизировать количество некачественных процессов при начале эксплуатации новой камеры сушки и исключить брак в ходе дальнейших технологических процессов.

Ключевые слова: сушка пиломатериалов, нечеткая логика, дефекты сушки, ступенчатая сушка, подстройки технологических параметров

Для цитирования: Гречушников В.В., Шилин А.А., Прохоров С.В. Синтез алгоритма автоматизированной подстройки параметров процесса сушки пиломатериалов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 6. – С. 75–88. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4500

UDC 674.047.3, 510.644.4
DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4500

Synthesis of an algorithm for automated adjustment of lumber drying based on linguistic information

V.V. Grechushnikov[✉], A.A. Shilin, S.V. Prokhorov

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

[✉] grechvv@tpu.ru

Abstract. Relevance. Lumber drying is associated with high risks of obtaining a low-quality or even unusable product. The problem under consideration has a number of reasons, both in violation of the technological process and in incorrect settings

of drying mode parameters at different stages. The procedure for automated adjustment of parameters is usually associated with a linguistic assessment of the quality of the product, according to which a decision on adjusting the parameters should be made, taking into account signs of a violation of the technological process. Technical and scientific publications contain generalized information about methods for selecting parameters for various situations, which can be formalized and included in algorithms for adjusting the parameters of a programmable logic controller. **Aim.** To create an algorithm using a Fuzzy controller that allows you to configure process parameters and adapt the drying chamber to the optimal parameters for drying lumber under given operating conditions. **Methods.** Analysis of the technical process database obtained during one and a half years of operation of the main parameters dispatch system for 28 full lumber drying cycles, with the aim of forming an automated adjustment algorithm that takes into account the lumber drying conditions. **Results.** The authors have created an algorithm for automated adjustment of parameters for three stages of drying based on linguistic ideas about the quality of the product. The algorithm eliminates the possibility of obtaining a low-quality product, as well as encourages service personnel to correctly generate a technological process passport. **Conclusions.** The inclusion of an automated parameter adjustment loop in the control circuit allows us to minimize the number of poor-quality processes when starting to operate a new drying chamber and eliminate defects in further technical processes.

Keywords: Drying lumber, fuzzy logic, drying defects, step drying, adjusting technological parameters

For citation: Grechushnikov V.V., Shilin A.A., Prokhorov S.V. Synthesis of an algorithm for automated adjustment of lumber drying based on linguistic information. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 6, pp. 75–88. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4500

Введение

В синтезе системы управления процессом сушки пиломатериалов основной задачей является правильный выбор параметров камеры сушки. К таким параметрам относятся: величина температуры (T , °C) и значение психрометрической разности (ΔT , °C) в камере на каждом этапе. При первом пуске сушильной камеры параметры необходимо выбрать таким образом, чтобы минимизировать порчу пиломатериалов. Для этих целей существует множество рекомендаций [1–8], основанных на математических моделях и расчетах [9–18].

На результат сушки влияет огромное количество параметров, которые практически невозможно учесть, поскольку влияние может оказывать как характерный климат местности, влажность воздуха и

его температура и т. п., так и место произрастания леса и многое другое [9]. Производители автоматизированных сушильных камер [6, 19–21] рекомендуют проводить процедуру подбора параметров T и ΔT на стартовых пробных сушках, т. к. пробная сушка может дать неудачный результат вплоть до частичной порчи материала. Это связано с тем, что контроллер сушильной камеры настроен на заданное количество ступеней с определенными величинами времени сушки, температуры и психрометрической разности. Например, для сушки березы толщиной 53 мм, шириной 150 мм начальной влажностью 60 % при мягком режиме сушки на вторую категорию предлагается использовать технологическую карту, представленную в табл. 1 [6].

Таблица 1. Режим сушки пиломатериалов в сушильной камере периодического действия

Table 1. Lumber drying mode in a batch drying chamber

Технологическая операция Technological operation	T , °C	Относительная влажность, % Relative humidity, %	ΔT , °C	Время, ч Time, h	Влажность древесины, % Wood moisture content, %
Нагрев пиломатериалов Lumber heating	60	100	0	4	естественная natural
Сушка – 1 ступень Drying – 1 st stage	52	80	4	60–75	от естественной до 30 from natural to 30
Сушка – 2 ступень Drying – 2 nd stage	55	68	7	60–75	от 30 до 20 from 30 to 20
Промежуточная влаготеплообработка Intermediate moisture-heat treatment	70	100	0	6	при 20/at 20
Сушка – 3 ступень Drying – 3 rd stage	70	31	22	60–96	до заданной 10 up to the specified 10
Конечная влаготеплообработка Final moisture-heat treatment	78	96	1	12	10
Кондиционирование Conditioning	70	74	5	12	заданная/specified
Охлаждение пиломатериалов Lumber cooling	<30–40	20–40	≥ 20	6	заданная/specified

На основании большого опыта сушки пиломатериалов в сушильных камерах известно, что процесс сушки протекает неравномерно и его можно условно разделить на следующие фазы (технологические операции).

Первой фазой является *прогрев древесины*. В зависимости от времени года длительность данного этапа составляет от часа до полутора часов летом и полтора–два зимой (для мягких хвойных пород) на каждый сантиметр толщины материала. Данный этап протекает при высокой относительной влажности, вплоть до 100 %. Это связано с необходимостью замедления влагоотдачи с поверхности материала. Переход от прогрева к непосредственной сушке рекомендуется проводить равномерно и постепенно.

Следующими технологическими операциями являются три или более ступени сушки. Рассмотрим трехступенчатый процесс.

На *первой ступени* скорость сушки постоянна и определяется интенсивностью испарения влаги с поверхности материала. Отклонения температуры допускаются в пределах $\pm 2^\circ\text{C}$ от заданной режимом, а если требования к качеству материала низки – вплоть до $\pm 5^\circ\text{C}$ [5]. При этом пересыхание верхних слоев древесины обусловлено, в первую очередь, величиной психрометрической разности, а не температурой. В зависимости от пиломатериала, трудносохнущий или среднесохнущий, допускается отклонение ΔT не более чем на $\pm 0,1$ и $\pm 0,2^\circ\text{C}$ от ее величины, соответственно [5]. На этом этапе влажность древесины снижается от естественной до 35 %. Данный этап является самым важным, при несоблюдении или неправильно подобранных параметрах режима на материале могут возникнуть различные дефекты.

На *второй ступени* сушки также существует вероятность порчи пиломатериалов, но она ниже. На этом этапе удаляется как свободная влага внутренних слоев, так и связанная влага стенок клеток наружных слоев пиломатериала, в результате чего процесс сушки протекает наиболее интенсивно. В свою очередь, влажность древесины снижается с 35 до 25 %.

Чтобы удалить связанную влагу и снизить влажность материалов с 25 % до заданной, например, до 10 %, переходят к *третьей ступени*. Она характеризуется высоким значением психрометрической разности (16°C и выше). Процесс протекает значительно медленнее, чем на втором этапе. Возникновение трещин на этом этапе обусловлено слишком большими значениями температуры (свыше сотни градусов), в то время как величина психрометрической разности оказывает малое влия-

ние на появление дефектов и может достигать величины 20°C и более.

К финальным стадиям сушки относятся процессы: *конечная влаготеплообработка, кондиционирование, охлаждение пиломатериалов*. На данных этапах дефекты в виде трещин могут возникнуть из-за перепада температуры, возникающего при преждевременной выгрузке еще не остывших пиломатериалов из сушильной камеры (эксплуатационная ошибка).

В работах [5, 6, 22–26] рассматриваются дефекты, которые могут произойти с древесиной при сушке, и причины их возникновения. В табл. 2 представлены общие рекомендации по направлению изменения параметров T и ΔT относительно текущего значения, которое не указывается в самой таблице и зависит от типа древесины, толщины пиломатериала и других параметров. При начале эксплуатации новой сушильной камеры рекомендуются относительно «безопасные» величины T и ΔT , при которых появление дефектов минимально, а скорость сушки не оптимальна. Установленные значения параметров указаны в табл. 1 для конкретных условий определенной камеры производителя. Данные параметры могут не соответствовать корректному функционированию новой камеры и их необходимо изменять. В данной работе высокой считается величина температуры или относительной влажности, значение которых превышает указанные в технологической карте, малой – меньше величин технологической карты.

В табл. 2 также указаны дефекты, связанные с появлением трещин или плесени. Всего выделяют пять основных причин возникновения дефектов:

- 1) высокая скорость сушки, низкая относительная влажность (большая величина T и ΔT);
- 2) низкая скорость сушки, высокая относительная влажность (малая величина T и ΔT);
- 3) неправильно выполненное штабелирование;
- 4) ошибки эксплуатации сушильной камеры;
- 5) другие причины, зависящие от свойств древесины.

В табл. 2 булевы величины представлены знаками: «✓» – да; «–» – нет.

На основании табл. 2 и технологических карт процесса камерной сушки древесины [1–8] можно сделать предположение, что существует определенная «Безопасная область» (рис. 1), в которой при любых сочетаниях величин температуры и психрометрической разности на пиломатериале не возникают дефекты, но при этом скорость сушки может не быть оптимальной. Также внутри данной области может быть определена «Оптимальная область» (рис. 1), в которой не возникают дефекты и скорость сушки максимальна.

Таблица 2. Причины возникновения дефектов при сушке

Table 2. Causes of drying defects

Дефект Defect	Большая величина T и ΔT Large value of T and ΔT	Малая величина T и ΔT Small value of T and ΔT	Неправильно выполненное штабелирование Incorrect stacking	Ошибки эксплуатации Operation errors	Причины, зависящие от свойств древесины Reasons depending on wood properties
Растрескавшиеся сучки, торцевые трещины Cracked knots, end check	✓	–	–	–	–
Сколы и расщепы Chips and splinters	✓	–	–	–	Напряжение в древесине, сжатие древесины, молодая древесина Tension in wood, compression of wood, young wood
Внутренние трещины Internal cracks	✓	–	–	Слишком высокая температура при влажности древесины более 30 % Temperature is too high when the wood moisture content is more than 30%	Бактериальное заражение древесины Bacterial contamination of wood
Поверхностные трещины Surface cracks	✓	✓	–	Слишком высокая начальная температура Initial temperature is too high	
Синие грибковые пятна, плесень, мучнистая роса, гниль Blue fungal stains, mold, powdery mildew, rot	–	✓	✓	–	–
Кофейные или бурые грибковые пятна Coffee-colored or brown fungal stains	–	✓	✓	✓	Реакция ферментативного окисления под влиянием температуры, атмосферной влажности и влагосодержания древесины. Бактериальное заражение древесины Enzymatic oxidation reaction under the influence of temperature, atmospheric humidity and moisture content of wood. Bacterial contamination of wood
Пятна от прокладочных реек Stains from spacer strips	–	–	✓	Влажные или слишком широкие прокладочные рейки Wet or too wide spacer bars	–
Растрескавшаяся сердцевина, ромбовидность, овальность Cracked core, diamond shape, ovality	–	–	–	–	Разница между радиальной и тангенциальной (боковой) усушкой Difference between radial and tangential (lateral) shrinkage
Торцевые расщепы после сушки End splits after drying	–	–	–	Разница между радиальной и тангенциальной (боковой) усушкой Difference between radial and tangential (lateral) shrinkage	–

Высокая скорость сушки пиломатериалов также достигается благодаря алгоритмам, реализованным в контроллерах сушильных камер. Данные контроллеры с высокой точностью выполняют все технологические операции и поддерживают заданные параметры режима, но не имеют подстройки, основанной на результатах сушки. Как было сказано ранее, даже правильно выбранные величины T и ΔT не гарантируют, что в результате на пиломатериале будет отсутствовать плесень или он будет

равномерно просушен. Это связано с тем, что данные дефекты зависят не только от величин T и ΔT , но и от того, какие прокладочные рейки использовались и на сколько качественно было произведено штабелирование.

В данной работе рассматривается алгоритм, который автоматически может принимать решения по выбору параметров температуры и психрометрической влажности на основании оценки качества укладки пиломатериала и результатов сушки.



Рис. 1. Визуализация оптимальной области на основании табл. 1

Fig. 1. Visualization of the optimal area based on the Table 1

Эти параметры можно оценить, задавая ответственным лицам (оператору сушильной камеры и заказчику) соответствующие вопросы, например, «Присутствуют ли треснувшие доски?», «Оцените, насколько равномерно уложен штабель» и другие. Рассматриваемый алгоритм должен быть автоматизированным и предусматривать возможность фото документирования, на случай возникновения спорных ситуаций. Для того чтобы полученные ответы оценки результата преобразовать в направление изменения параметров режима предлагается использовать нечеткую логику.

В отечественных и зарубежных изданиях [9, 27–39] рассматривается возможность применения нечеткой логики в задачах моделирования процессов сушки пиломатериалов и создания систем управления сушильной камеры. Однако поиск научной литературы по формированию алгоритма автоматизированной подстройки параметров процесса сушки пиломатериалов на основании опросов о качестве полученного материала не дал результатов.

Задачей данного исследования является составление алгоритма автоматизированной подстройки технологических параметров процесса сушки на основании опросов заказчика и технолога о фактическом качестве пиломатериала и выполненного штабелирования. Данный алгоритм позволит подстроить параметры режимов сушки под конструктивные и климатические особенности месторасположения сушильной камеры, время года, тип древесины и другие условия эксплуатации, т. е. приспособить камеру к условиям, которые затруднительно учесть при помощи расчетов. В результате снижается время адаптации сушильной камеры и количество брака.

Методы и подходы

Для подстройки технологических параметров сушильной камеры по результатам опросов необходимо провести сбор информации о полученной

продукции. Это предлагается осуществлять при помощи веб интерфейса, содержащего опросный лист. Рассматриваемые вопросы являются предварительными и могут быть изменены в связи с эксплуатационной или другой необходимостью по согласованию с разработчиком.

Первым данный опросный лист заполняет оператор сушильной камеры, при этом возможность запуска сушильной камеры блокируется до тех пор, пока не будут даны ответы на все необходимые вопросы и не будет приложено фото штабеля. Если штабель уложен неравномерно, или равномерность не превышает 80 %, то должно выводиться сообщение «Штабель уложен неравномерно. Проведите повторную укладку».

На этом этапе необходимо ответить на следующие вопросы:

- материал, из которого изготовлены доски (клен, бук, береза и др.);
- геометрические размеры пиломатериала (Ш*В*Г);
- планируемый сорт пиломатериала (1–4);
- равномерно ли уложен пиломатериал (да/нет);
- оцените, на сколько равномерно уложен пиломатериал (шкала);
- загрузите фото штабеля;
- ФИО оператора;
- время пуска, дата, сезон, погода вводятся автоматически.

Фото штабеля перед сушкой необходимо как для разрешения спорных моментов между заказчиком и исполнителем, так и для формирования четкой границы безопасной зоны. Не стоит исключать того факта, что оператор может каждый раз загружать одно и то же фото, этот момент стоит учесть и ввести верификацию загруженных материалов, например, по цифровой подписи фотографии. Дальнейшее расширение программного обеспечения может заключаться в использовании нейросети для дополнительной проверки и оценки равномер-

ности укладки пиломатериала. Данный вопрос является отдельной задачей и не рассматривается в данной статье.

После окончания процесса сушки оператору необходимо оценить результат и заполнить вторую часть опросного листа, который содержит следующие вопросы:

- Присутствуют ли доски, пораженные плесенью (да/нет).
- Оцените количество досок, пораженных плесенью (шкала).
- Присутствуют ли доски с трещинами/сколами (да/нет).
- Присутствуют ли деформированные доски (да/нет).
- Оцените количество треснувших досок (шкала).
- Оцените продолжительность сушки.
- Укажите другие дефекты (при наличии).
- Загрузите фото досок с дефектами (при наличии).
- ФИО оператора.
- Время остановки, дата и сезон вводятся автоматически.
- Продолжительность сушки вычисляется автоматически.

Для дополнительного подтверждения достоверности и адекватности оценки результатов сушки оператором аналогичный опросный лист необходимо пройти заказчику. Только на основании двух результатов опроса следует принимать решение о выборе режима следующей сушки. В среднем время дискретизации данного алгоритма составляет промежуток от сушки к сушке (около 10–12 дней). Для оценки результатов необходимо доставить материал заказчику и получить его оценку, что увеличивает время дискретизации работы алгоритма. Только при наличии хорошей корреляции оценок между оператором и заказчиком можно будет

быстро формировать новую итерацию подстройки параметров режима сушки.

На рис. 2 представлена структурная схема работы предлагаемого алгоритма. Рассмотрим назначение основных блоков, входящих в состав алгоритма. После проведенной сушки оператор и заказчик заполняют опросный лист о результатах сушки. Их ответы да/нет, много/мало, фото и пр. записываются в базу знаний, также в нее сохраняются величины температур, значения психрометрической разности предыдущего режима. Информация из опросного листа о том, как выполнено штабелирование, какое количество треснувших и пораженных плесенью досок было получено в результате сушки, поступает на блоки нечеткой логики. В блоках FLT_T и FLT_ΔT и FLT_Штабель происходит фаззификация данных опросного листа. Необходимым условием правильной работы алгоритма является запрет обработки и расчета параметров нового режима при неправильно выполненном штабелировании. Это осуществляется перемножением сигналов блоков FLT_T и FLT_ΔT с FLT_Штабель. Далее сигнал усиливается, проходит через интегратор, и полученные величины изменения режима (dT, dΔT) суммируются с исходными, в результате чего создаются параметры нового режима (T', ΔT'). Структура данного алгоритма одинакова для всех трех этапов сушки. Другими словами, для каждого из этапов будут рассчитываться индивидуальные, новые параметры режима при использовании различных коэффициентов усиления. Пример работы алгоритма рассматривается далее в статье.

На основе результатов диссертации [40] был создан контроллер, осуществляющий диспетчеризацию и автоматизацию процесса работы сушильной камеры в г. Томске. Основным недостатком данного контроллера является отсутствие автоматизированной подстройки технологических параметров сушильной камеры на основе результатов сушки.

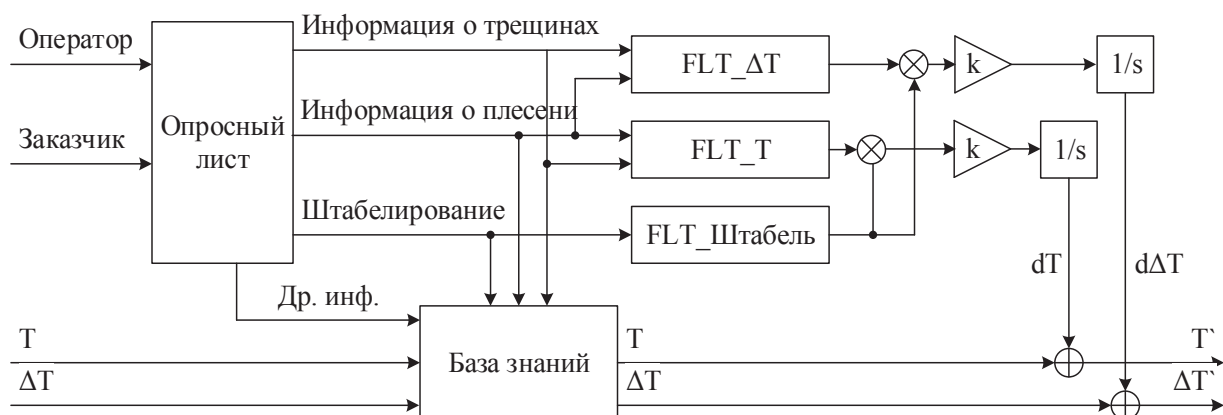


Рис. 2. Структурная схема работы алгоритма

Fig. 2. Block diagram of the algorithm operation

За полтора года работы сушильной камеры была сформирована «База данных» с 28 переходными процессами, включающая в себя данные о продолжительности сушки, величинах температуры и психрометрической разности. Также сформирована «База знаний», отличающаяся от «Базы данных» наличием оценки результатов сушки и включающая в себя только неудачные сушки. Это связано с тем, что при успешной сушке заказчик не обращался к разработчику контроллера, и оценка результата и качества штабелирования не давалась. В связи с этим считаем, что 23 сушки были успешными, а пять с браком, а именно, в трех случаях доски покрылись плесенью, в остальных присутствовали треснувшие доски.

Результаты исследования и их обсуждение

Исходя из переходных процессов и базы знаний о сушках, были рассчитаны величины параметров T и ΔT и сформирована зависимость появления дефектов пиломатериала от параметров режима (рис. 3). Проанализировав полученный результат, можно подтвердить ранее выдвинутое предположение о существовании определенной безопасной зоны, при работе в которой дефекты не проявляются. Для первой ступени (рис. 3, А) данная область довольно узкая, в результате чего небольшое изменение психрометрической разности критически влияет на результат сушки, и режим переходит из области с деформированными или треснувшими досками (зона «Трещины») в область с досками, пораженными плесенью (зона «Плесень»). Для второй ступени (рис. 3, Б) площадь безопасной зоны значительно больше.

Стоит отметить, что на рис. 3, А, Б явно выделяется одна точка, которая находится в безопасной зоне, но в результате были получены доски с пле-

сенью. Поскольку рядом с данной точкой существует множество успешных сушек, можно с большой долей вероятности утверждать, что причина возникновения плесени связана не с технологическими параметрами сушки, а с тем, как было выполнено штабелирование. Данное предположение было добавлено в базу знаний.

Поскольку контроль качества укладки пиломатериалов не учитывался при формировании базы знаний, существует вероятность, что появление плесени в двух других режимах может быть связано как с технологическими параметрами, так и с неправильным штабелированием. Следовательно, полученные зоны имеют только приблизительные очертания. Еще одной причиной размытости полученных зон является тот факт, что невозможно однозначно определить, режим какой из ступеней сушки повлек за собой порчу древесины. Для уточнения размеров и форм зон необходим контроль установки штабеля и большее количество сушек.

На величину психрометрической разности небольшое влияние оказывают погодные условия. При низких величинах влажности воздуха внешней среды можно получить большую ΔT в камере и наоборот. На третьей ступени сушки (рис. 3, В) основное количество точек сконцентрировано в диапазоне ΔT равной 16–18 °С. В данном режиме величина температуры не превышала 90 °С в связи с техническими ограничениями котла.

Также стоит отметить, что рассматриваемые зоны получены и справедливы для конкретной сушильной камеры. В зависимости от конструкции, климатических особенностей территории, на которой расположена сушильная камера, времени года, типа леса и других условий зона может перемещаться и изменять свою форму и площадь.

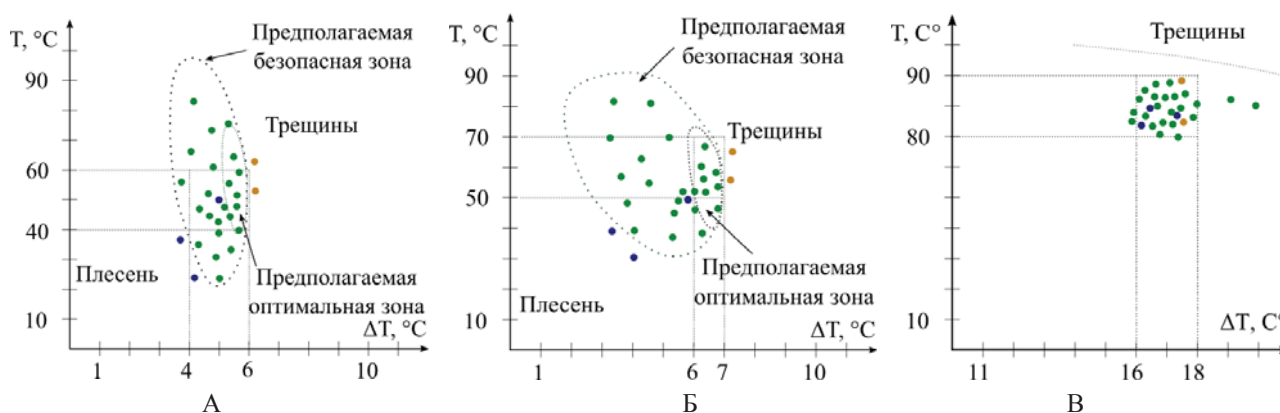


Рис. 3. Зависимость появления дефектов при сушке сибирского кедра от параметров режима: А) первая ступень сушки; Б) вторая ступень сушки; В) третья ступень сушки. Зеленые точки – успешные сушки, оранжевые – сушки с треснувшими досками, синие – пораженные плесенью

Fig. 3. Dependence of appearance of defects when drying Siberian cedar on the drying mode parameters: А) first stage of drying; Б) second stage of drying; В) third stage of drying. Green dots indicate successful drying, orange dots indicate drying with cracked boards, and blue dots indicate mold

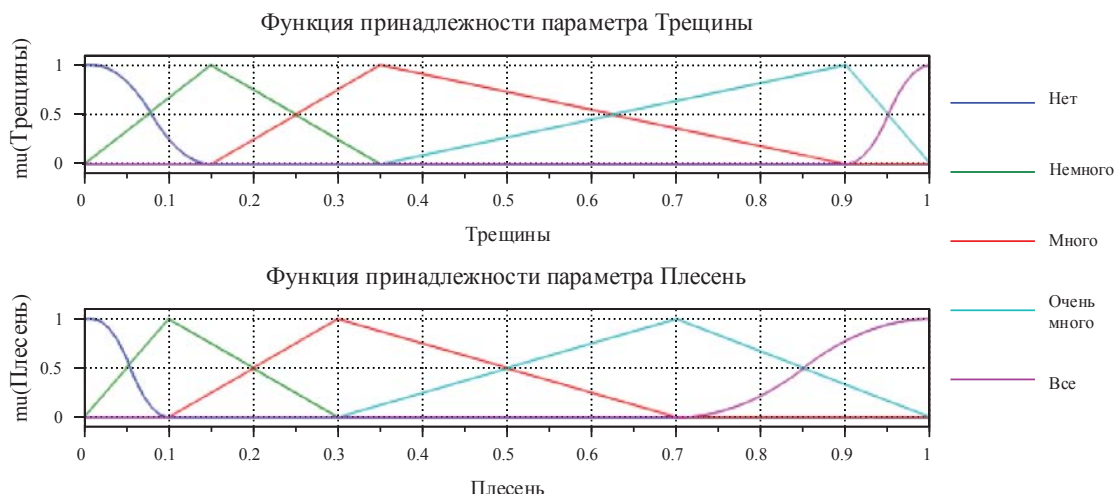


Рис. 4. Функции принадлежности параметров «плесень» и «трещины». «Нет», «немного», «много», «очень много», «все» – являются названиями функций

Fig. 4. Membership functions of parameters «mold» and «cracks». «No», «some», «much», «very much», «all» are the names of the functions

На основании экспертной оценки технолога, работающего с рассматриваемой в данной статье сушильной камерой, были сформированы функции принадлежности параметра оценки относительного количества поврежденного материала плесенью и трещинами (рис. 4), а также правила изменения величины психрометрической разности (табл. 3) первой и второй ступеней сушки. При этом были учтены различные соотношения количества треснувших и пораженных плесенью досок для первого и второго этапов сушки.

Для полного и корректного заполнения всех правил табл. 3 содержит некоторые маловероятные соотношения, такие как случай, при котором все доски одновременно и треснули, и покрылись плесенью.

Величина $k_{\Delta T}$ – коэффициент, показывающий, на сколько необходимо изменить величину параметра психрометрической разности от максимально заданного значения шага. Величина шага для каждой сушильной камеры может быть отличной и должна вычисляться на основании обширной базы знаний о результатах сушки конкретной рассматриваемой камеры. В данной работе шаг был принят равным 2,5 и 1 °C для первой и второй ступени сушки соответственно и определялся исходя из ширины безопасной зоны, что соответствует коэффициенту $k_{\Delta T}$ равному единице.

Таким образом, табл. 3 сформирована на основании экспертной оценки технолога, производящего сушку пиломатериалов. Регулятор Fuzzy-контроллера формирует аппроксимацию решения эксперта (производит дефазификацию) в виде трехмерных поверхностей (рис. 5).

Табл. 3. Правила изменения величины психрометрической разности первой и второй ступеней сушки для различных соотношений количества трещин и плесени

Table 3. Rules for changing the value of the psychrometric difference between the first and second stages of drying for different ratios of the number of cracks and mold

Правило № Rule no.	Трещины Cracks	Плесень Mold	$k_{\Delta T1}$	$k_{\Delta T2}$	Весовой коэффициент Weight coefficient
1	Нет No	Нет/No	0,1	0,1	1
2		Немного/Some	0,2	0,2	
3		Много/Much	0,4	0,3	
4		Очень много/Very much	1	0,5	
5		Все/All	1	0,5	
6	Немного Some	Нет/No	-0,1	-0,2	
7		Немного/Some	0,15	-0,1	
8		Много/Much	0,35	0,05	
9		Очень много/Very much	0,7	0,1	
10		Все/All	0,7	0,1	
11	Много Much	Нет/No	-0,2	-0,3	
12		Немного/Some	0,1	-0,2	
13		Много/Much	0,3	-0,15	
14		Очень много/Very much	0,6	-0,1	
15		Все/All	0,6	-0,1	
16	Очень много Very much	Нет/No	-0,5	-0,9	
17		Немного/Some	0,05	-0,7	
18		Много/Much	0,25	-0,6	
19		Очень много/Very much	0,5	-0,5	
20		Все/All	0,5	-0,5	
21	Все All	Нет/No	-0,5	-0,9	
22		Немного/Some	0,05	-0,7	
23		Много/Much	0,25	-0,6	
24		Очень много/Very much	0,5	-0,5	
25		Все/All	0,5	-0,5	

Они позволяют распространить решения эксперта на всю область изменения параметров режима. На основании криволинейных функций можно определить, как необходимо изменить величину психрометрической разности следующей сушки для увеличения ее быстродействия при любом соотношении количества деформированных и пораженных плесенью досок. Аналогичным образом получаются поверхности изменения параметра температуры. Поверхности являются функциями, определяющими направление и амплитуду изменения основных параметров T и ΔT .

Рассмотрим работу алгоритма на примере первой ступени сушки, при котором образовалась плесень на высушенных досках. Исходными данными для работы алгоритма является информация о предшествующем режиме ($\Delta T=4,1$ °C и $T=23,7$ °C) и результат экспертной оценки технолога, который оце-

нил, что порядка 15 % досок были поражены плесенью при правильно выполненном штабелировании (табл. 4). Информация о количестве брака поступает на вход FLT_T и FLT_DT блоков нечеткой логики (рис. 2). В данных блоках после выполненной фазификации на основании функций принадлежности (рис. 4) с последующей дефазификацией на основании поверхностей (рис. 5) определяется доля шага $k_{\Delta T1}=0,26$. Затем $k_{\Delta T1}$ умножается на значение принятого шага (2,5 °C), в результате чего получается величина $d\Delta T$, °C, на которую необходимо изменить параметр режима ΔT для данной конкретной точки. Далее вычисленная величина суммируется с исходными параметрами режима, и определяются параметры следующего режима первой ступени сушки T' и $\Delta T'$. Процесс перерасчета величин T и ΔT для 1 и 2 ступеней аналогичен и различается лишь только поверхностями (рис. 5) и величиной шага.

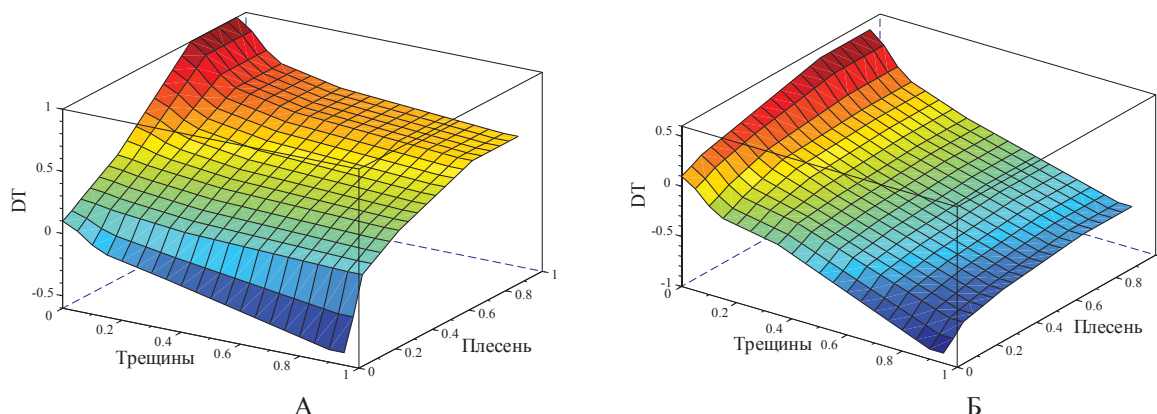


Рис. 5. Полученные в результате дефазификации поверхности изменения параметра ΔT : А) первая ступень сушки; Б) вторая ступень сушки

Fig. 5. Changes of the parameter ΔT obtained as a result of surface dephasification: A) first stage of drying; B) second stage of drying

Таблица 4. Результаты работы алгоритма для первой ступени сушки

Table 4. Results of the algorithm operation for the first stage of drying

Параметры Parameters	Обозначение Designation	Точка/Dot mark						
		1	2	3	4	5	6	7
Параметры режима первой ступени сушки Parameters of the first stage drying mode, °C	ΔT	4,18	3,71	3,75	4,30	5,06	6,22	6,20
	T	23,79	36,51	55,87	63,66	58,44	52,83	62,72
Оценка количества брака Estimation of the quantity of defects, %	Трещины/Cracks	0	0	0	0	0	65	95
	Плесень/Mold	15	27	0	0	0	0	0
Функции принадлежности параметра Трещины Membership functions of parameter Cracks	Нет/No	1	1	1	1	1	0	0
	Немного/Some	0	0	0	0	0	0	0
	Много/Much	0	0	0	0	0	0,25	0
	Очень много/Very much	0	0	0	0	0	0,75	0,47
	Все/All	0	0	0	0	0	0	0,52
Функции принадлежности параметра Плесень Membership functions of parameter Mold	Нет/No	0	0	1	1	1	1	1
	Немного/Some	0,75	0,03	0	0	0	0	0
	Много/Much	0,25	0,97	0	0	0	0	0
	Очень много/Very much	0	0	0	0	0	0	0
	Все/All	0	0	0	0	0	0	0
Шаг/Step	$k_{\Delta T1}$	0,27	0,40	0,10	0,10	0,10	-0,45	-0,49
Величина изменения параметра Parameter change amount	$d\Delta T$, C	0,67	0,99	0,25	0,25	0,25	-1,12	-1,23
Параметры нового режима первой ступени сушки Parameters of the new mode of the first drying stage, °C	$\Delta T'$	4,86	4,70	4,00	4,55	5,31	5,11	4,96
	T'	42,48	48,70	55,68	63,43	58,31	46,85	56,25

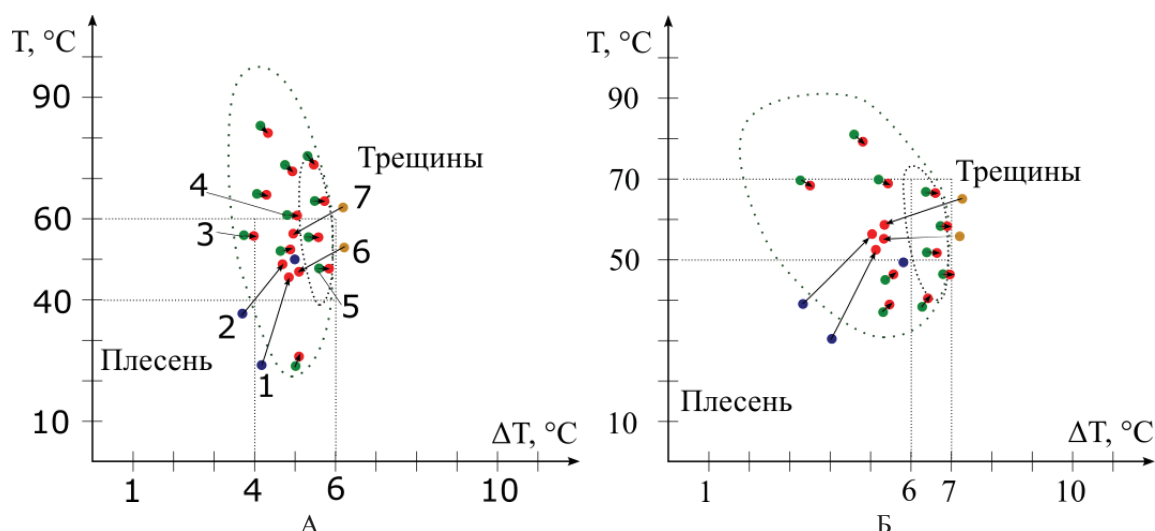


Рис. 6. Результаты работы алгоритма: А) первая ступень сушки; Б) вторая ступень сушки. Зеленые точки – успешные сушки, оранжевые – сушки с треснувшими досками, синие – пораженные плесенью, красные – точки, предложенные алгоритмом

Fig. 6. Algorithm output: А) first stage of drying; Б) second stage of drying. Green dots are successful dryings, orange are dryings with cracked boards, blue are mold, red are dots suggested by the algorithm

Рассматриваемый в статье алгоритм по пересчету T и ΔT , согласно криволинейным функциям, был применен к базе уже имеющихся знаний о результатах предыдущих сушек (рис. 3, А, Б), в результате чего были получены величины T' и $\Delta T'$ (рис. 6) следующих режимов сушки.

Для повышения визуальной наглядности результатов работы алгоритма на рис. 6 представлены только некоторые группы характерных точек режимов:

- 1) неудачные сушки;
- 2) принадлежащие безопасной, но не оптимальной области;
- 3) входящие как в безопасную, так и в оптимальную зоны.

В результате работы алгоритм предлагает параметры следующего режима такими (рис. 6, красные точки), чтобы точки 1, 2 и 6, 7 (табл. 4, рис. 6) из зон, в которых появляются пораженные плесенью и деформированные доски соответственно, гарантированно переместились в безопасную зону. Все точки, находящиеся в безопасной зоне (например, точки 3–5, табл. 4, рис. 6) по результатам работы алгоритма флуктуируют в сторону правой границы зоны, где скорость сушки выше, до появления первых признаков деформации доски. Стоит отметить, что для точки режима с неправильно выполненным штабелированием алгоритм не предлагает нового режима, т. к. вычисления блокируются по признаку укладки пиломатериалов.

Результат работы алгоритма на третьей ступени не приводится в связи с тем, что появление дефектов для данной конкретной сушильной камеры практически невозможно. В случае возникновения дефек-

тов на третьей ступени достаточным воздействием будет ограничение температуры режима работы.

Исходя из полученных результатов, можно сделать предположение, что безопасная зона имеет небольшие размеры. В данном исследовании коэффициент передачи выбирался исходя из ширины безопасной зоны таким, чтобы сильно не влиять на параметры и не выйти за границы рассматриваемой зоны. При наличии большой базы знаний коэффициент передачи можно будет вычислить точнее, т. к. очертания зоны будут более конкретными.

Обязательным условием корректной работы алгоритма является контроль укладки пиломатериалов с выполнением фотофиксации. Это необходимо как для разрешения спорных ситуаций, так и для качественного анализа режимов.

Другим важным условием является корректное и своевременное заполнение опросного листа через веб-интерфейс как оператором сушки, так и заказчиком. Следует учесть тот факт, что заказчик может не оценивать результат сушки, в связи с чем время итераций данного алгоритма сильно увеличивается вплоть до потери информации о сушке. Поэтому вопрос оценки качества полученных пиломатериалов является крайне важным, данный вопрос необходимо учитывать при заключении договоров.

Стоит обратить внимание на правило № 1 (табл. 3). В процессе исследования камеры сушки с целью определения границ оптимальной зоны и наибольшего быстрогодействия коэффициент $k_{\Delta T}$ отличен от нуля, что приводит к медленному приближению к краю оптимальной зоны, а в последующем к появлению незначительных трещин в ре-

зультате сушки. При использовании алгоритма, рассматриваемого в данной статье, в процессе адаптации камеры возможна необходимость уменьшения коэффициента $k_{\Delta T}$, а в дальнейшем и обнуление при достижении результатов, удовлетворяющих производителя.

Заключение

В результате работы был создан алгоритм, который позволяет определить направление изменения параметров сушки и собрать базу знаний на основании опроса заказчика и технолога о результатах сушки, по которой можно определить безопасную и оптимальную области сушки пиломатериала заданных параметров. Полученные данные справедливы для автоматизированной сушильной камеры, установленной на одной из площадок г. Томска, и могут отличаться в случае применения других сушильных камер и других климатических условий. Чем больше будет проведено сушек с последующей их оценкой, тем более точно будет определена граница безопасной зоны. Данная информация расширяет понимание о том, какие режимы являются наиболее опасными с точки зрения потери сырья. Во всех режимах учтены условия, которые затруднительно предусмотреть при помощи расчетов. К таким условиям относятся конструктивные особенности сушильной камеры, характерный климат местности, где расположено предприятие, время года, тип древесины и другие условия эксплуатации.

Формирование паспорта технологического процесса на основании заполненных опросных листов

от оператора сушильной камеры и заказчика, данных о предшествующем режиме сушки, позволит при помощи алгоритма, реализованного на Fuzzy-контроллере, настроить параметры техпроцесса и приспособить сушильную камеру к оптимальным параметрам сушки пиломатериалов в заданных условиях эксплуатации.

Предложенный алгоритм можно реализовать с помощью контроллера, который формирует базу знаний, изменяя параметры режима. При накоплении достаточной базы станет более очевидной безопасная зона, и таким образом можно будет вычислить коэффициенты передачи и ввести обратную связь. При наличии данной связи в зависимости от того, в какой точке зоны находится исходный режим, будут применяться различные коэффициенты усиления, и чем дальше режим находится от правой границы безопасной зоны, тем с большей скоростью точки передвигаются в её сторону. В результате чего станет возможным уточнить границы не только безопасной, но и оптимальной области, в которой, предположительно, достигается наибольшее быстроедействие при отсутствии дефектов на пиломатериалах.

Дальнейшее усовершенствование программного обеспечения может заключаться в использовании нейросети для дополнительной проверки и оценки равномерности укладки пиломатериала по фотографиям штабеля, загруженным в опросный лист, на этапе пуска сушильной камеры. Данная мера сделает необходимым выполнять этап корректно, предотвращая одну из причин возникновения плесени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 18867-84. Пиломатериалы хвойных пород. Режимы сушки в противоточных камерах непрерывного действия. – М.: Стандартинформ, 2005. – 8 с.
2. ГОСТ 19773-84. Пиломатериалы хвойных и лиственных пород. Режимы сушки в камерах периодического действия. – М.: Стандартинформ, 2009. – 14 с.
3. Руководящие технические материалы по технологии камерной сушки пиломатериалов. – Архангельск: ОАО «Научдревпром – ЦНИИМОД», 2000. – 125 с.
4. Шишкина Е.Е. Сушка пиломатериалов. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2020. – 49 с.
5. Артеменков А.М. Технология сушки и защиты древесины. – СПб: СПбГЛТУ, 2023. – 52 с.
6. Сушильные камеры для сушки древесины // «СКРОН». URL: <http://www.scron.ru/> (дата обращения 17.01.2024).
7. Кречетов И.В. Сушка и защита древесины. – М.: Лесная промышленность, 1987. – 328 с.
8. Чемоданов А.Н., Царев Е.М., Анисимов С.Е. Сушка древесины. Справочные материалы. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 220 с.
9. Моделирование процесса сушки пиломатериалов / А.Г. Гороховский, В.В. Побединский, Е.Е. Шишкина, Е.В. Побединский // ИВУЗ. Лесной журнал. – 2020. – № 1. – С. 154–166. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-154-166
10. Baronas R., Ivanauskas F., Sapagovas M. Modelling of wood drying and an influence of lumber geometry on drying dynamics // Nonlinear Analysis: Modelling and Control. – 1999. – Vol. 4. – P. 11–22. DOI: 10.15388/NA.1999.4.0.15247.
11. The moisture transfer mechanism and influencing factors in wood during radio-frequency/vacuum drying / X. Jia, K. Hayashi, J. Zhan, Y. Cai // European Journal of Wood and Wood Products. – 2016. – Vol. 74. – P. 203–210. DOI: 10.1007/s00107-015-0985-y.
12. Sychevskii V.A. Heat and mass transfer in convective wood-drying plants // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2018. – Vol. 91. – P. 705–771. DOI: 10.1007/s10891-018-1793-0.
13. Mass diffusivity of different species of wood in convective drying / S. Azzouz, K.B. Dhib, R. Bahar, S. Ouertani, M.T. Elaieb, A. Elcafsi // European Journal of Wood and Wood Products. – 2018. – Vol. 76. – P. 573–582. DOI: 10.1007/s00107-017-1212-9.

14. One-dimensional numerical solution of the diffusion equation to describe wood drying: comparison with two- and three-dimensional solutions / W.P. da Silva, C.M.D.P.S. e Silva, A.F. Rodrigues, R.M.F. de Figueirêdo // *Journal of Wood Science*. – 2015. – Vol. 61. – P. 364–371. DOI: 10.1007/s10086-015-1479-6.
15. Меркушев И.М. Психрометрическая диаграмма равновесной влажности древесины // ИВУЗ. Лесной журнал. – 2010. – № 2. – С. 83–86.
16. Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е., Гороховский А.А. Оптимизация режимов сушки пиломатериалов // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2011. – № 1. – С. 52–58.
17. Optimization and simulation of drying processes using diffusion models: application to wood drying using forced air at low temperature / W.P. da Silva, L.D. da Silva, C.M.D.P.S. e Silva, P.L. Nascimento // *Wood Science and Technology*. – 2011. – Vol. 45. – P. 787–800. DOI: 10.1007/s00226-010-0391-x.
18. The schedule of optimal fuzzy controller gain with multi model concept for a solar energy wood drying process kiln / Z. Situmorang, R. Wardoyo, S. Hartati, J.E. Istiyanto // *International Journal of Operations and Quantitative Management*. – 2009. – Vol. 15. – P. 137–151.
19. Автоматизация управления сушкой древесины: автоматика для сушильных камер // Учебно-научная лаборатория измерительной техники и автоматизации. URL: <https://esd70.ru/> (дата обращения 17.01.2024).
20. Оборудование для лесозаготовки и деревообработки // Производственная Компания «Ижора». URL: <https://pk-izhora.ru/> (дата обращения 17.01.2024).
21. Сушильные камеры для пиломатериалов // «МАКИЛ ПЛЮС». URL: <https://www.makilplus.ru/> (дата обращения 17.01.2024).
22. Obataya E., Higashihara T. Reversible and irreversible dimensional changes of heat-treated wood during alternate wetting and drying // *Wood Science and Technology*. – 2017. – Vol. 51. – P. 739–749. DOI: 10.1007/s00226-017-0918-5.
23. Меркушев И.М. Динамика бездефектной сушки пиломатериалов // ИВУЗ. Лесной журнал. – 2011. – № 3. – С. 84–87.
24. Меркушев И.М. Факторы, предопределяющие бездефектную сушку пиломатериалов // ИВУЗ. Лесной журнал. – 2010. – № 3. – С. 90–93.
25. Зарипов Ш.Г. Систематизация факторов, влияющих на образование трещин в лиственных пиломатериалах при сушке // ИВУЗ. Лесной журнал. – 2018. – № 3 (363). – С. 127–136.
26. Коваль В.С. Торцеве оздріскування пиломатеріалів та його запобігання // Лісове і садово-паркове господарство. – 2012. – № 1. – С. 10–17.
27. Situmorang Z., Situmorang J.A. Intelligent fuzzy controller for a solar energy wood dry kiln process // 2015 International Conference on Technology, Informatics, Management, Engineering & Environment (TIME-E). – Samosir, Indonesia, 2015. – P. 152–157. DOI: 10.1109/TIME-E.2015.7389765.
28. Дивеев А.И., Полтавский А.В., Алхатем А. Нейронечеткое управление процессом сушки пиломатериалов // Надежность и качество сложных систем. – 2021. – № 3 (35). – С. 93–97. DOI: 10.21685/2307-4205-2021-3-12.
29. Турбал Е.Ю., Шифрин Б.М. Сушка пиломатериалов на основе нечеткого регулятора // Состояние и перспективы развития лесного комплекса в странах СНГ: сборник статей II Международной научно-технической конференции. – Минск, 6–9 декабря 2022. – Минск: БГТУ, 2022. – С. 160–163.
30. Турбал Е.Ю., Шифрин Б.М., Попова Д.А. Подход к разработке модели сушки пиломатериалов на основе нечеткой логики // Международный научно-исследовательский журнал. – 2022. – № 7-1 (121). – С. 111–114.
31. Савченко Д.В., Резникова К.М., Смышляева А.А. Нечеткая логика и нечеткие информационные технологии // Интернет-журнал «Отходы и ресурсы». – 2021. – № 1. – Т. 8. – С. 12. URL: <https://resources.today/PDF/10ECOR121.pdf> (дата обращения 17.01.2024).
32. Санаев В.Г., Полещук О.М., Комаров Е.Г. О применении методов нечеткого анализа для прогноза поведения древесины, прошедшей гидротермическую обработку // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. – 2011. – № 3. – С. 148–156.
33. Zakarias Situmorang. Fuzzy rule suram for wood drying // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017. – Vol. 930. – P. 9. DOI: 10.1088/1742-6596/930/1/012043.
34. Development of an intelligent control system for wood drying processes / X.G. Wang, W. Liu, L. Gu, C.J. Sun, C.E. Gu, C.W. de Silva // 2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Proceedings (Cat. No.01TH8556). Como, Italy, July 08–12, 2001. – P. 371–376. DOI: 10.1109/AIM.2001.936483.
35. Zakarias Situmorang, Husein A.E. Comparison of intelligent fuzzy controller and fuzzy rule suram algorithms in the drying process // *An International Journal Information Sciences Letters*. – 2023. – Vol. 12. – № 6. – P. 2603–2621. DOI: 10.18576/isl/120656.
36. System identification of wood drying process based on ARMAX model / Z. Zhou, P. Zhang, B. Huai, L. Huang // *Agricultural Sciences*. – 2019. – Vol. 10. – № 3. – P. 241–248. DOI: 10.4236/as.2019.103020.
37. Neuro-fuzzy hybrid system for monitoring wood moisture content during drying / A.J. Vinha Zanuncio, A. Guimarães Carvalho, C.A. Araújo Júnior, M.R. de Assis, L.F. da Silva // *Floresta Ambient*. – 2019. – Vol. 26. – № 2. – P. 5. DOI: 10.1590/2179-8087.050417
38. Li J., Sun L. Forecasting of wood moisture content based on modified ant colony algorithm to optimize LSSVM parameters // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 8. – P. 85116–85127. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2991889.
39. Simpson W.T. Dry kiln operators manual. – Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, 1991. – 273 p.
40. Нгуен В.В. Метод синтеза регуляторов и алгоритмы контроллера двухканальной системы управления камерой сушки пиломатериала: дис. ...канд. тех. наук. – Томск, 2021. – 159 с.

Информация об авторах

Владислав Викторович Гречушников, старший преподаватель отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. grechvv@tpu.ru; <http://orcid.org/0000-0002-4827-5906>

Александр Анатольевич Шилин, доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. shilin@tpu.ru; <http://orcid.org/0000-0002-4761-7249>

Сергей Валерьевич Прохоров, аспирант Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. sergei_prohorov@inbox.ru; <http://orcid.org/0000-0001-9308-4474>

Поступила в редакцию: 18.01.2024

Поступила после рецензирования: 22.04.2024

Принята к публикации: 26.04.2024

REFERENCES

1. SS 18867-84. *Softwood lumber. Drying modes in continuous counterflow chambers*. Moscow, Standartinform Publ., 2005. 8 p. (In Russ.)
2. SS 19773-84. *Coniferous and hardwood lumber. Drying modes in batch chambers*. Moscow, Standartinform Publ., 2009. 14 p. (In Russ.)
3. *Guiding technical materials on the technology of chamber drying of lumber*. Arkhangelsk, JSC «Nauchdrevprom – TsNIIMOD» Publ., 2000. 125 p. (In Russ.)
4. Shishkina E.E. *Drying lumber: educational manual*. Ekaterinburg, UGFLTU, 2020. 49 p. (In Russ.)
5. Artemenkov A.M. *Technology of drying and protecting wood*. St. Petersburg, SPbGLTU Publ., 2023. 52 p. (In Russ.)
6. Drying chambers for drying wood. «SKRON». (In Russ.) Available at: <http://www.scron.ru/> (accessed 17 January 2024).
7. Krechetov I.V. *Drying and protection of wood*. Moscow, Forestry Industry Publ., 1987. 328 p. (In Russ.)
8. Chemodanov A.N., Tsarev E.M., Anisimov S.E. *Drying wood. Reference materials*. Vologda, Infra-Engineering Publ., 2022. 220 p. (In Russ.)
9. Gorokhovskiy A.G., Pobedinsky V.V., Shishkina E.E., Pobedinsky E.V. Modeling the process of drying lumber. *IVUZ. Forest magazine*, 2020, no. 1, pp. 154–166. (In Russ.) DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-154-166
10. Baronas R., Ivanauskas F., Sapagovas M. Modelling of wood drying and an influence of lumber geometry on drying dynamics. *Nonlinear Analysis: Modelling and Control*, 1999, vol. 4, pp. 11–22. DOI: 10.15388/NA.1999.4.0.15247.
11. Jia X., Hayashi K., Zhan J., Cai Y. The moisture transfer mechanism and influencing factors in wood during radio-frequency/vacuum drying. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2016, vol. 74, pp. 203–210. DOI: 10.1007/s00107-015-0985-y.
12. Sychevskii V.A. Heat and mass transfer in convective wood-drying plants. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2018, vol. 91, pp. 705–771. DOI: 10.1007/s10891-018-1793-0.
13. Azzouz S., Dhib K.B., Bahar R., Ouertani S., Elaieb M.T., Elcafsi A. Mass diffusivity of different species of wood in convective drying. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2018, vol. 76, pp. 573–582. DOI: 10.1007/s00107-017-1212-9.
14. da Silva W.P., e Silva C.M.D.P.S., Rodrigues A.F., de Figueirêdo R.M.F. One-dimensional numerical solution of the diffusion equation to describe wood drying: comparison with two- and three-dimensional solutions. *Journal of Wood Science*, 2015, vol. 61, pp. 364–371. DOI: 10.1007/s10086-015-1479-6.
15. Merkushev I.M. Psychrometric diagram of the equilibrium moisture content of wood. *IVUZ. Forest magazine*, 2010, no. 2, pp. 83–86. (In Russ.)
16. Gorokhovskiy A.G., Shishkina E.E., Gorokhovskiy A.A. Optimization of lumber drying modes. *Bulletin of the Mari State Technical University. Series: Radio engineering and infocommunication systems*, 2011, no. 1, pp. 52–58. (In Russ.)
17. da Silva W.P., da Silva L.D., e Silva C.M.D.P.S., Nascimento P.L. Optimization and simulation of drying processes using diffusion models: application to wood drying using forced air at low temperature. *Wood Science and Technology*, 2011, vol. 45, pp. 787–800. DOI: 10.1007/s00226-010-0391-x.
18. Situmorang Z., Wardoyo R., Hartati S., Istiyanto J.E. The schedule of optimal fuzzy controller gain with multi model concept for a solar energy wood drying process kiln. *International Journal of Operations and Quantitative Management*, 2009, vol. 15, pp. 137–151.
19. Automation of wood drying control: automation for drying chambers. *Educational and Scientific Laboratory of Measuring Equipment and Automation*. (In Russ.) Available at: <https://esd70.ru/> (accessed 17 January 2024).
20. Equipment for logging and woodworking. *Production Company «Izhora»*. (In Russ.) Available at: <https://pk-izhora.ru/> (accessed 17 January 2024).
21. Drying chambers for lumber. «MAKIL PLUS». (In Russ.) Available at: <https://www.makilplus.ru/> (accessed 17 January 2024).
22. Obataya E., Higashihara T. Reversible and irreversible dimensional changes of heat-treated wood during alternate wetting and drying. *Wood Science and Technology*, 2017, vol. 51, pp. 739–749. DOI: 10.1007/s00226-017-0918-5.
23. Merkushev I.M. Dynamics of defect-free drying of lumber. *IVUZ. Forest magazine*, 2011, no. 3, pp. 84–87. (In Russ.)
24. Merkushev I.M. Factors predetermining defect-free drying of lumber. *IVUZ. Forest magazine*, 2010, no. 3, pp. 90–93. (In Russ.)

25. Zaripov Sh.G. Systematization of factors influencing the formation of cracks in larch lumber during drying *IVUZ. Forest magazine*, 2018, no. 3 (363), pp. 127–136. (In Russ.)
26. Koval V.S. Tortsever chipping of lumber and its prevention. *Forestry and horticultural management*, 2012, no. 1, pp. 10–17. (In Ukr.)
27. Situmorang Z., Situmorang J.A. Intelligent fuzzy controller for a solar energy wood dry kiln process. *2015 International Conference on Technology, Informatics, Management, Engineering & Environment (TIME-E)*. Samosir, Indonesia, 2015. pp. 152–157. DOI: 10.1109/TIME-E.2015.7389765.
28. Diveev A.I., Poltavsky A.V., Alkhatem A. Neuro-fuzzy control of the lumber drying process. *Reliability and quality of complex systems*, 2021, no. 3 (35), pp. 93–97. (In Russ.) DOI: 10.21685/2307-4205-2021-3-12.
29. Turbal E.Yu., Shifrin B.M. Drying lumber based on a fuzzy controller. *State and prospects for the development of the forestry complex in the CIS countries: collection of articles of the II International Scientific and Technical Conference*. Minsk, December 6–9, 2022. Minsk, BSTU Publ., 2022. pp. 160–163. (In Russ.)
30. Turbal E.Yu., Shifrin B.M., Popova D.A. An approach to developing a model for drying lumber based on fuzzy logic. *International Scientific Research Journal*, 2022, no. 7-1 (121), pp. 111–114. (In Russ.)
31. Savchenko D.V., Reznikova K.M., Smyshlyaeva A.A. Fuzzy logic and fuzzy information technologies. *Internet magazine «Waste and Resources»*, 2021, no. 1. (In Russ.) Available at: <https://resources.today/PDF/10ECOR121.pdf> (accessed 17 January 2024).
32. Sanaev V.G., Poleshchuk O.M., Komarov E.G. On the application of fuzzy analysis methods to predict the behavior of wood that has undergone hydrothermal treatment. *Bulletin of the Moscow State Forest University – Forest Bulletin*, 2011, no. 3, pp. 148–156. (In Russ.)
33. Zakarias Situmorang. Fuzzy rule suram for wood drying. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 930, p. 9. DOI: 10.1088/1742-6596/930/1/012043.
34. Wang X.G., Liu W., Gu L., Sun C.J., Gu C.E., de Silva C.W. Development of an intelligent control system for wood drying processes. *2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Proceedings (Cat. No.01TH8556)*. Como, Italy, July 08–12, 2001. pp. 371–376. DOI: 10.1109/AIM.2001.936483.
35. Zakarias Situmorang, Husein A.E. Comparison of intelligent fuzzy controller and fuzzy rule suram algorithms in the drying process. *An International Journal Information Sciences Letters*, 2023, vol. 12, no. 6, pp. 2603–2621. DOI: 10.18576/isl/120656.
36. Zhou Z., Zhang P., Huai B., Huang L. System identification of wood drying process based on ARMAX model. *Agricultural Sciences*, 2019, vol. 10, no. 3, pp. 241–248. DOI: 10.4236/as.2019.103020.
37. Vinha Zanuncio A.J., Guimarães Carvalho A., Araújo Júnior C.A., de Assis M.R., da Silva L.F. Neuro-fuzzy hybrid system for monitoring wood moisture content during drying. *Floresta Ambient*, 2019, vol. 26, no. 2, pp. 5. DOI: 10.1590/2179-8087.050417.
38. Li J., Sun L. Forecasting of wood moisture content based on modified ant colony algorithm to optimize LSSVM parameters. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 85116–85127. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2991889.
39. Simpson W.T. *Dry kiln operators manual*. WI, U.S. Department of Agriculture, 1991. 273 p.
40. Nguyen V.V. *Method of synthesis of regulators and controller algorithms for a two-channel control system for a lumber drying chamber*. Cand. Dis. Tomsk, 2021. 159 p. (In Russ.)

Information about the authors

Vladislav V. Grechushnikov, Senior Lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. grechvv@tpu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4827-5906>

Alexander A. Shilin, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. shilin@tpu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4761-7249>

Sergey V. Prokhorov, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. sergei_prohorov@inbox.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9308-4474>

Received: 18.01.2024

Revised: 22.04.2024

Accepted: 26.04.2024

УДК 550.36:620.91

DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4579

Шифр специальности ВАК: 2.4.6

Численный анализ теплопритоков к геотермальному теплообменнику с учетом испарения влаги в его конструкции

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

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

[✉]polovnikov@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. Положения о необходимости перехода на альтернативные источники энергии и энергетической безопасности, снижении выбросов в окружающую среду и энергосбережении в различных отраслях во многом могут опираться на использование геотермальной энергии. Отдельной областью в сфере моделирования геотермальных технологий является исследование тепловых режимов геотермальных теплообменников. Необходимость обеспечения надежного теплового контакта между геотермальным теплообменником и окружающей его средой приводит к использованию разнообразных засыпок, в том числе и предварительно увлажненных. **Цель.** Исследование влияния интенсификации теплоподвода к геотермальным теплообменникам за счет изменения теплопроводности в результате увлажнения засыпки в элементах его конструкции и наличия фазовых переходов. **Методы.** Решение задачи получено методом конечных разностей. Использовалась неявная разностная схема и алгоритм прогонки. Шаг по координате составлял от 1 до 10 мм. **Результаты и выводы.** Исследования выполнены для шести месяцев непрерывной работы геотермального теплообменника. При анализе тепловых режимов рассматриваемой системы основное внимание уделялось исследованию интенсификации теплоподвода к геотермальному теплообменнику с учетом влияния испарения влаги в его засыпке, ее характеристик и условий эксплуатации рассматриваемых систем. Установлено, что увеличение влажности песчаной засыпки геотермального теплообменника приводит к росту теплопритоков на 3,2...7,8 %. Выявлено существенное влияние нестационарности процессов переноса на интенсификацию теплообмена в рассматриваемой системе. Показано, что вклад эффекта испарения в теплопритоки к геотермальному теплообменнику составляет около 22 %. Обоснован вывод о том, что при выборе варианта регулирования тепловых режимов геотермальных теплообменников следует преимущественно изменять объемную влажность песчаной засыпки.

Ключевые слова: геотермальная энергия, геотермальный теплообменник, математическое моделирование, теплопритоки, испарение

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

Для цитирования: Половников В.Ю., Шелемехова С.Д., Любивый Е.В. Численный анализ теплопритоков к геотермальному теплообменнику с учетом испарения влаги в его конструкции // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 6. – С. 89–97. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4579

UDC 550.36:620.91

DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4579

Numerical analysis of heat gain to geothermal heat exchangers with moisture evaporation in the structure

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

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

[✉]polovnikov@tpu.ru

Abstract. Relevance. Provisions on the need to transition to alternative energy sources and energy security, reduction of environmental emissions and energy conservation in various industries can largely rely on the use of geothermal energy. A separate area in the field of modeling geothermal technologies is the study of thermal regimes of geothermal heat exchangers. The need to ensure reliable thermal contact between the geothermal heat exchanger and its environment leads to the use of a variety of backfills, including pre-moistened ones. **Aim.** Study of the intensification of heat supply to geothermal heat exchangers, taking into account the effect of moisture evaporation in its backfill, its characteristics and operating conditions of the systems under consideration. **Methods.** The solution to the problem was obtained by the finite difference method. An implicit difference scheme and sweep algorithm were used. The coordinate step ranged from 1 to 10 mm. **Results and conclusions.** Study was carried out for six months of continuous operation of a geothermal heat exchanger. When analyzing the thermal conditions of the system under consideration, the main attention was paid to the study of the intensification of heat supply to the geothermal heat exchanger, taking into account the effect of moisture evaporation in its backfill, its characteristics and operating conditions of the systems under consideration. It was established that an increase in the sand backfill humidity of a geothermal heat exchanger leads to a growth in heat inflows by 3.2–7.8%. A significant effect of the unsteadiness of transfer processes on heat transfer intensification in the system under consideration was revealed. It was shown that the increase in heat flow to the geothermal heat exchanger due to the presence of evaporation is about 22%. The conclusion is substantiated that when choosing an option for regulating the thermal conditions of geothermal heat exchangers, the volumetric humidity of the sand backfill should be primarily changed.

Keywords: geothermal energy, geothermal heat exchanger, mathematical modeling, heat gain, evaporation

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

For citation: Polovnikov V.Yu., Shelemekhova S.D., Lyubivy E.V. Numerical analysis of heat gain to geothermal heat exchangers with moisture evaporation in the structure. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 6, pp. 89–97. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4579

Введение

Известные положения о необходимости перехода на альтернативные источники энергии и энергетической безопасности, снижении выбросов в окружающую среду и энергосбережении в различных отраслях [1–3] являются подтверждением актуальности использования геотермальной энергии в различных приложениях.

Например, Исландия [4, 5], где отопление домохозяйств за счет геотермальных ресурсов приближается к 100 %, является в рассматриваемой области признанным лидером. Российская Федерация также обладает достаточными запасами геотермальной энергии и по оценкам, приведенным в [6], они в 8–12 раз превышают потенциал всех углеводородных ресурсов.

Теоретический анализ теплопритоков к геотермальным теплообменникам базируется на двух основных подходах к моделированию теплопереноса в конструкциях и зонах размещения геотермальных систем: аналитическом и численном.

Основным недостатком аналитического описания процессов переноса в рассматриваемых системах является наличие достаточно большого количества допущений, без введения некоторых из них получить аналитическое решение невозможно. Можно выделить следующие главные ограничивающие допущения, при которых решаются задачи: однонаправленность теплового потока [7], использование

граничных условий первого рода [8] или линейного источника тепла [9] на границах области расчета, возможность сегментирования конечного линейного источника тепла [10] и его стратификации [11].

Численное моделирование базируется чаще всего на использовании коммерческих программных комплексов: Feflow [12, 13], OpenGeoSys [14], Ansys Fluent [15, 16] и Comsol Multiphysics [17], в основу которых заложен метод конечных элементов. Основная трудность в случае использования такого программного обеспечения состоит в необходимости использования большого количества элементов пространственной сетки, а это обстоятельство неизбежно приводит к увеличению длительности вычислений. В исследовании [18] показано, что время расчета одного отопительного периода при эксплуатации геотермальной скважины на персональном компьютере с процессором 2,2 ГГц и 64 ГБ оперативной памяти составляет 143 часа.

Использование оригинальных программных кодов и, в частности, метода конечных разностей позволяет существенно сократить продолжительность расчетов до адекватных значений (несколько минут). В [19, 20] показано, что скорость расчетов рассматриваемых систем можно увеличить на порядки по сравнению с коммерческим программным обеспечением.

Отдельной областью в сфере моделирования геотермальных технологий [1–3] является исследо-

вание тепловых режимов геотермальных теплообменников (ГТ). Конструктивно наиболее типичный ГТ представляет собой теплообменник типа «труба в трубе», установленный в скважине (рис. 1). Необходимость обеспечения надежного теплового контакта между ГТ и окружающей его средой приводит к использованию разнообразных засыпок. В качестве засыпок используются различные материалы: от обычного цемента [21] до материалов с фазовыми переходами [22]. Однако использование этих материалов заметно повышает и без того существенные капитальные затраты при строительстве скважин с ГТ. В [23] было предложено использовать в качестве засыпки распространенный и недорогой материал – увлажненный песок. Использование увлажненного песка в качестве засыпки для ГТ неизбежно будет связано с наличием фазовых переходов и изменением механизмов теплопереноса в конструкции геотермального теплообменника.

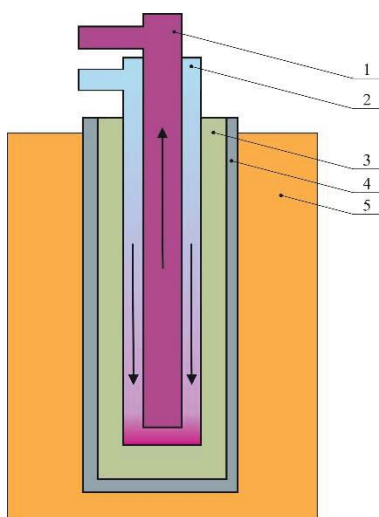


Рис. 1. Схема скважины с ГТ: 1 – внутренняя труба; 2 – кольцевой канал; 3 – засыпка; 4 – обсадная колонна; 5 – горячие породы

Fig. 1. Diagram of a well with a geothermal heat exchanger: 1 – inner pipe; 2 – ring channel; 3 – backfill; 4 – casing; 5 – hot rock

Анализ научной литературы по исследуемой проблематике [1–23] показал, что исследование теплопереноса в конструкциях и зонах размещения ГТ с учетом взаимосвязи характеристик засыпок, режимных параметров и фазовых переходов до настоящего времени не выполнено. Целью данной работы является исследование влияния интенсификации теплоподвода к ГТ за счет изменения теплопроводности в результате увлажнения засыпки в элементах его конструкции и наличия фазовых переходов.

Постановка задачи

Прототипом рассматриваемой конструкции ГТ является реальный объект, геометрические и физические параметры которого описаны в [22]. Обсадная колонна, выполняющая в [22] роль несущей конструкции, выполнена из высокопрочного бетона, а кольцевой канал ГТ – из стали. На рис. 2 приведена схема области решения рассматриваемой задачи.

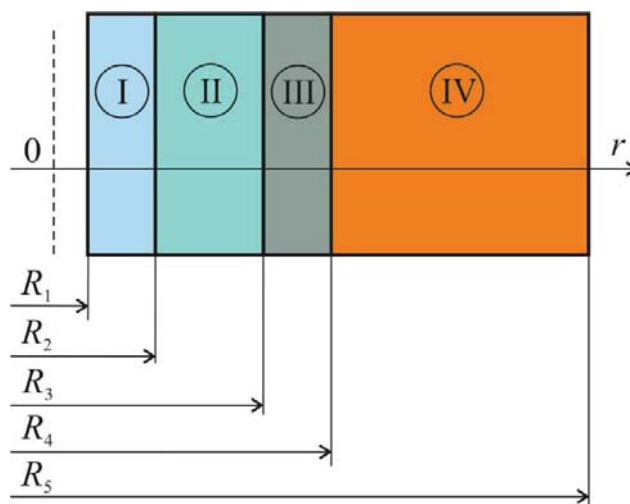


Рис. 2. Схема области решения: I – внешняя труба кольцевого канала ГТ; II – засыпка; III – обсадная колонна; IV – горячие породы

Fig. 2. Diagram of the solution area: I – outer ring channel pipe; II – backfill; III – casing; IV – hot rock

Предполагается, что до начала эксплуатации ГТ в рассматриваемой области решения (рис. 2) поддерживается постоянная температура, равная температуре горячих пород. В момент времени отличный от нуля через ГТ начинает прокачиваться энергоноситель, температура которого ниже, чем начальная температура в области решения. На границе R_1 вводятся граничные условия третьего рода, а на границе R_5 выставляются граничные условия первого рода.

Влага, наполняющая поры песчаной засыпки II, на границе контакта (R_3) с разогретой конструкцией обсадной колонны III испаряется. Образовавшийся пар диффундирует в зону меньших концентраций. На поверхности R_2 происходит конденсация пара с выделением тепла (рис. 2).

Решение задач массопереноса с учетом всего многообразия фазовых переходов в рассматриваемой конструкции геотермального теплообменника существенно усложнит поиск ответа на поставленный вопрос. В соответствии с заявленной целью исследуется исключительно интенсификация теплопереноса в конструкции ГТ за счет изменения

эффективной теплопроводности элементов его конструкции и наличия фазовых переходов в них. По этой причине при оценке влияния описанных факторов, но не ограничиваясь ей, при постановке задачи приняты следующие основные допущения:

1. Теплофизические характеристики материалов, веществ и их компонентов являются постоянными и известными величинами.
2. Теплота в области диффузии паров и жидкости передается только теплопроводностью, а учет фазовых переходов осуществляется только на поверхностях испарения и конденсации.
3. В местах соприкосновения слоев (рис. 2) выполняются условия идеального теплового контакта.
4. Не рассматривается перенос тепла в энергоносителе, циркулирующем в ГТ, а также процессы массопереноса в засыпке и горячей породе (рис. 2).
5. Считается, что вдали от скважины поддерживается неизменная температура пород.

Математическая модель

Уравнения теплопроводности и соответствующие им краевые условия для рассматриваемой области решения (рис. 2) имеют следующий вид:

$$\tau \geq 0, R_1 \leq r \leq R_5;$$

$$c_i \rho_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \lambda_i \left(\frac{\partial^2 T_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_i}{\partial r} \right); \quad i = \text{I} - \text{IV}; \quad (1)$$

$$\tau = 0, R_1 \leq r \leq R_5; T_i = T_0 = \text{const}; \quad i = \text{I} - \text{IV}; \quad (2)$$

$$\tau > 0, r = R_1; \alpha (T_{r=R_1} - T_{\text{in}}) = -\lambda_{\text{I}} \frac{\partial T_1}{\partial r}; \quad (3)$$

$$\tau > 0, r = R_2; \lambda_{\text{I}} \frac{\partial T_1}{\partial r} = \lambda_{\text{II}} \frac{\partial T_2}{\partial r} + Jq; T_1 = T_2; \quad (4)$$

$$\tau > 0, r = R_3; \lambda_{\text{II}} \frac{\partial T_2}{\partial r} = \lambda_{\text{III}} \frac{\partial T_3}{\partial r}; T_2 = T_3; \quad (5)$$

$$\tau > 0, r = R_4; \lambda_{\text{III}} \frac{\partial T_3}{\partial r} = \lambda_{\text{IV}} \frac{\partial T_4}{\partial r}; T_3 = T_4; \quad (6)$$

$$\tau > 0, r = R_5; T_5 = T_{\text{ex}} = \text{const}. \quad (7)$$

Теплофизические свойства песчаной засыпки при известных плотности ρ и объемной влажности W вычислялись из следующих соотношений [23]:

$$\lambda_{\text{II}} = -1,337 + 0,00125\rho + 0,01W; \quad (8)$$

$$c_{\text{II}} = -0,018 + 0,0009\rho + 0,031W. \quad (9)$$

Для расчета коэффициентов теплоотдачи в канале кольцевого поперечного сечения использовалось широко известное уравнение [24]:

$$\text{Nu} = 0,017 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}_e^{0,4} \left(\frac{\text{Pr}_e}{\text{Pr}_w} \right)^{0,25} \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^{0,18},$$

$$\text{Nu} = \frac{\alpha d}{\lambda_e}; \quad \text{Re} = \frac{Vd}{\nu_e}; \quad d = d_2 - d_1.$$

Коэффициент аккомодации, скорость и теплота фазового перехода вычислялись из соотношений [25]:

$$a = \frac{0,059}{P_s^{0,5}};$$

$$J = \frac{a(P_s - P_p)}{\left(\frac{2\pi R_g}{M} T|_{r=R_2} \right)^{0,5}};$$

$$q = 2500,64 - 2,369 T|_{r=R_2}.$$

Теплопритоки Q без учета термического сопротивления металлической стенки трубы ГТ находились из выражения:

$$Q = -\lambda_{\text{II}} \frac{\partial T_2|_{r=R_2}}{\partial r} \frac{F}{l} + \frac{JqF}{l}.$$

Второе слагаемое в последнем выражении является дополнительной частью теплопритока к теплообменнику за счет фазового перехода.

Обозначения: λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); ρ – плотность, кг/м³; ν – кинематическая вязкость, м²/с; τ – время, с; R – граница области расчета, м; T – температура, К; c – теплоемкость, Дж/(кг·К); r – координата, м; V – скорость, м²/с; W – объемная влажность, %; d – эквивалентный диаметр, м; d_2, d_1 – внешний и внутренний диаметры кольцевого канала, м; $\text{Nu}, \text{Re}, \text{Pr}$ – числа Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля; $\pi=3,14$; a – коэффициент аккомодации; J – скорость испарения, кг/(м²·с); M – молекулярная масса паров, кг/моль; P – давление, Па; q – теплота фазового перехода, Дж/кг; R_g – газовая постоянная, Дж/(кмоль·К), Q – теплопритоки, Вт/м; l – единичная длина, м; $F=2\pi Rl$ – площадь поверхности, м².

Индексы: 0 – начальный момент времени; 1, 2, 3, 4, 5 – номера границ областей расчета (рис. 2); in – внутренний; ex – наружный; e – жидкость (энергоноситель); w – стенка; p – парциальный; s – насыщение; I, II, III, IV – номера областей расчета (рис. 2).

Метод решения и исходные данные

Решение задачи (1)–(7) получено методом конечных разностей. Использовалась неявная разностная схема и алгоритм прогонки. Шаг по координате составлял от 1 до 10 мм. Геометрические параметры ($R_1=0,05$ м; $R_2=0,055$ м; $R_3=0,14$ м;

$R_4=0,25$ м) соответствовали конструкции скважины, описанной в [22], а $R_5=10$ м. Внешний и внутренний диаметры кольцевого канала составляли: $d_1=2\cdot R_1$; $d_2=0,06$ м.

Начальная температура T_0 в рассматриваемой области решения принималась равной температуре разогретых пород $T_{ex}=373,15$ К. Температура прокачиваемого энергоносителя составляла $T_{in}=278,15$ К. Объемная влажность песчаной засыпки W варьировалась от 5 до 25 % и была ограничена открытой пористостью. Расход энергоносителя задавался от 0,004 до 0,04 м³/с, что соответствует скоростям движения по кольцевому каналу $V=0,1$ –1 м/с.

Теплофизические характеристики, использовавшиеся при проведении моделирования, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Теплофизические характеристики

Table 1. Thermophysical characteristics

Характеристика Characteristic	λ , Вт/(м·К) W/(m·K)	c , Дж/(кг·К) J/(kg·K)	ρ , кг/м ³ kg/m ³
Кольцевой канал Ring channel	57,5	466	7860
Засыпка/Backfill	Расчет по (8) Calculation by (8)	Расчет по (9) Calculation by (9)	1900
Цемент/Cement [22]	1,78	800	2490
Горячие породы Hot rocks [22]	1,3	775	1990

Результаты численного моделирования

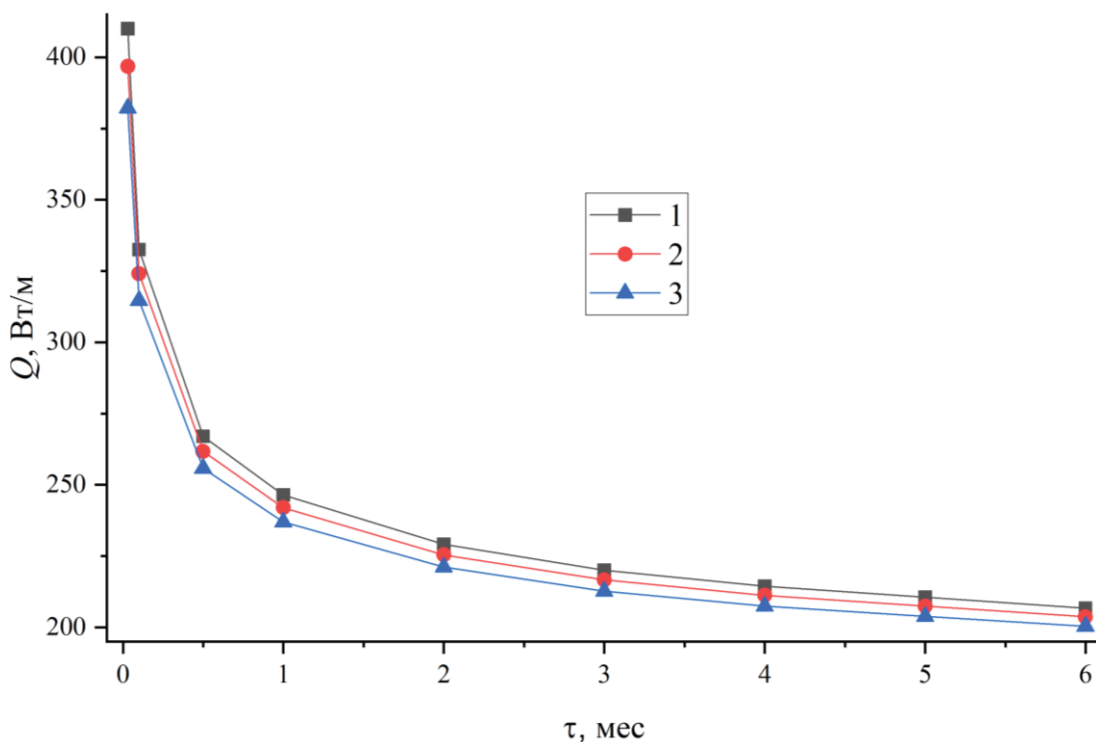


Рис. 3. Снижение теплопритоков к ГТ: 1 – $W=25\%$; 2 – $W=15\%$; 3 – $W=5\%$

Fig. 3. Reducing heat gain to geothermal heat exchanger: 1 – $W=25\%$; 2 – $W=15\%$; 3 – $W=5\%$

Результаты исследования тепловых режимов ГТ приведены в табл. 2–4 и на рис. 3. Исследования выполнены для шести месяцев непрерывной работы ГТ. При анализе тепловых режимов рассматриваемой системы основное внимание уделялось исследованию интенсификации теплоподвода к ГТ с учетом влияния испарения влаги в его засыпке, ее характеристик и условий эксплуатации рассматриваемых систем.

Рис. 3 в качестве примера иллюстрирует типичную картину снижения теплопритоков Q к ГТ во время эксплуатации при фиксированной скорости движения энергоносителя по кольцевому каналу ($V=1,0$ м/с), различных значениях объемной влажности песчаной засыпки W и учете испарения влаги в засыпке.

Изменение величин теплопритоков к ГТ свидетельствует об их ожидаемом снижении с увеличением длительности эксплуатации из-за охлаждения горячих пород в непосредственной близости от скважины (рис. 1) и закономерном увеличении при росте W , сопровождающемся изменением теплофизических характеристик засыпки в соответствии с формулами (8) и (9). Время эксплуатации ГТ (6 месяцев) выбрано исходя из соответствия типичной для РФ продолжительности отопительного периода.

Анализ нестационарности процессов теплопереноса в рассматриваемой системе в период установления стационарного температурного поля в горячих породах свидетельствует о её существенном влиянии на уровень теплопритоков к ГТ. За рассматриваемый период эксплуатации (6 месяцев) теплопритоки к ГТ снижаются практически в 2 раза по сравнению с первоначальным уровнем. Здесь следует отметить, что результаты моделирования указывают на резкое снижение тепловых потоков в первые дни работы ГТ (аналогичные выводы сделаны в [22] при исследовании материалов с фазовыми переходами). Это объясняется интенсивным охлаждением металлического корпуса ГТ (рис. 1) из-за его сравнительно высокой теплопроводности (табл. 1). Этот результат имеет конкретное практическое применение, поскольку позволяет обоснованно выбирать пути регулировки расхода энергоносителя для выравнивания теплосъема от ГТ во времени.

В табл. 2, 3 приведены результаты численного исследования интенсификации теплоподвода к ГТ с учетом испарения влаги и взаимосвязи характеристик засыпок и режимов работы рассматриваемых систем.

Таблица 2. Изменение теплопритоков к ГТ с учетом испарения при увеличении W от 5 до 25 %, %

Table 2. Change of heat gain to the geothermal heat exchanger taking into account evaporation with increasing W from 5 to 25%, %

τ, мес. month	V, м/с/м/с			
	0,10	0,25	0,50	1,00
0,03	7,12	7,21	7,49	7,79
0,1	5,58	5,64	5,67	5,69
0,5	4,32	4,36	4,38	4,39
1	3,93	3,97	4,00	4,09
2	3,59	3,60	3,61	3,64
3	3,42	3,44	3,46	3,49
4	3,31	3,33	3,35	3,37
5	3,23	3,25	3,26	3,27
6	3,16	3,18	3,19	3,20

Исследование влияния влажности песчаной засыпки ($W=5-25\%$) на теплопритоки в конструкции ГТ позволило сделать вывод об увеличении теплопритоков до 7,8 % в начальный период эксплуатации ГТ и до 3,2 % к концу этого периода (табл. 2). Более высокий рост теплопритоков в начальный промежуток времени объясняется теми же обстоятельствами, что и при анализе нестационарности процессов переноса в рассматриваемой системе. Несмотря на достаточно скромное увеличение тепловых потоков в системе геотермальной скважины с ГТ из-за изменения объемной влажности засыпки, суммарный рост теплопритоков в рассматриваемой

системе при глубине скважины 25 м за весь период эксплуатации (6 месяцев) может приводить к дополнительной аккумуляции в 15 Гкал и более.

Таблица 3. Изменение теплопритоков к ГТ с учетом испарения при увеличении V от 0,1 до 1,0 м/с

Table 3. Change of heat gain to the geothermal heat exchanger taking into account evaporation with increasing V from 0,1 to 1,0 m/s

τ, мес. month	W, %		
	25	15	5
0,03	2,47	2,40	2,31
0,1	1,65	1,61	1,57
0,5	1,47	1,43	1,40
1	1,34	1,31	1,27
2	1,22	1,19	1,17
3	1,05	1,03	1,01
4	1,12	1,11	1,08
5	1,14	1,13	1,10
6	0,96	0,94	0,93

Анализ влияние интенсивности теплоотдачи в кольцевом канале на изменение теплопритоков к ГТ (табл. 3) позволяет сделать вывод о незначительном росте тепловых потоков в рассматриваемой системе (около 1–2,5 %). Это объясняется достаточно быстрым установлением постоянной температуры на внешней трубе кольцевого канала ГТ (рис. 2). Следовательно, при решении задач, подобных задаче (1)–(7), для исследования тепловых режимов ГТ можно обоснованно вместо выражения (3) использовать граничные условия первого рода.

Таким образом, при выборе варианта регулирования тепловых режимов ГТ следует преимущественно изменять объемную влажность песчаной засыпки W .

В табл. обобщены результаты численного анализа влияния наличия испарения влаги в конструкции ГТ на рост теплопритоков к нему в зависимости от W и V в конце срока эксплуатации (6 мес.). Анализ содержания табл. 4 свидетельствует о существенном вкладе процесса испарения влаги в засыпке ГТ на интенсификацию теплопритоков к нему. Рост теплопритоков к ГТ с учетом наличия испарения составляет около 22 % по сравнению с аналогичным исследованием без учета этого эффекта.

Таблица 4. Рост теплопритоков к ГТ за счет испарения, %

Table 4. Increase of heat gain to the geothermal heat exchanger due to evaporation, %

W, %	V, м/с/м/с			
	0,10	0,25	0,50	1,00
5	22,02	21,89	21,91	21,84
15	21,69	21,57	21,58	21,52
25	21,41	21,29	21,30	21,24

Адекватность результатов численного моделирования следует из проверок используемых методов решения задачи (1)–(7) на сходимость и устойчивость, а также подтверждается численным сопоставлением с известными данными о работе геотермальных скважин с ГТ [21, 22]. В [21, 22] линейные плотности теплового потока составляют 60–300 Вт/м, что хорошо согласуется с результатами данной работы (рис. 3).

Заключение

Установлено, что увеличение влажности песчаной засыпки ГТ приводит к росту теплопритоков на 3,2–7,8 %.

Выявлено существенное влияние нестационарности процессов переноса на интенсификацию теплообмена в рассматриваемой системе в начальном периоде формирования стационарного температурного поля горячих пород.

Показано, что вклад эффекта испарения в теплопритоки к геотермальному теплообменнику составляет около 22 %.

Сделан вывод о том, что при выборе варианта регулирования тепловых режимов ГТ следует преимущественно изменять объемную влажность песчаной засыпки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dincer I., Acar C. A review on clean energy solutions for better sustainability // *International Journal of Energy Research*. – 2015. – Vol. 39 (5). – P. 585–606. DOI: 10.1002/er.3329.
2. Ellabban O., Abu-Rub H., Blaabjerg F. Renewable energy resources: current status, future prospects and their enabling technology // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014. – Vol. 39. – P. 748–764. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.113.
3. Thorsteinsson H.H., Tester J.W. Barriers and enablers to geothermal district heating system development in the United States // *Energy Policy*. – 2010. – Vol. 38 (2). – P. 803–813. DOI: 10.1016/j.enpol.2009.10.025.
4. Stober I., Bucher K. Geothermal energy. – Cham: Springer International Publ., 2021. – 390 p.
5. A comprehensive study of geothermal heating and cooling systems / M. Soltani, M.F. Kashkooli, A. Dehghani-Sani, A. Kazemi, N. Bordbar, M. Farshchi, M. Elmi, K. Gharali, B.M. Dusseault // *Sustainable Cities and Society*. – 2019. – Vol. 44. – P. 793–818. DOI: S2210670718306838.
6. Hutter G.W. Geothermal power generation in the world 2015–2020 update report, review // *Proceedings of the World Geothermal Congress 2020+1*. – 2021. – Article 01017.
7. Transient heat transfer in a coaxial borehole heat exchanger / R.A. Beier, J. Acuña, P. Mogensen, B. Palm // *Geothermics*. – 2014. – Vol. 51. – P. 470–482. DOI: 10.1016/j.geothermics.2014.02.006.
8. Fang L., Diao N.R., Shao Z.K. Thermal analysis models of deep borehole heat exchangers // *International Ground Source Heat Pump Association*. – 2018. – P. 18–20. DOI: 10.22488/okstate.18.000018.
9. Beier R.A., Fossa M., Morchio S. Models of thermal response tests on deep coaxial borehole heat exchangers through multiple ground layers // *Applied Thermal Engineering*. – 2021. – Vol. 184. – Article 116241. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116241.
10. Deep coaxial borehole heat exchanger: analytical modeling and thermal analysis / Y. Luo, H. Guo, F. Meggers, L. Zhang // *Energy*. – 2019. – Vol. 185. – P. 1298–1313. DOI: 10.1016/j.energy.2019.05.228.
11. Luo Y.Q., Xu G.Z., Cheng N. Proposing stratified segmented finite line source (SS-FLS) method for dynamic simulation of medium-deep coaxial borehole heat exchanger in multiple ground layers // *Renewable Energy*. – 2021. – Vol. 179. – P. 604–624. DOI: 10.1016/j.renene.2021.07.086.
12. Bär K., Rühaak W., Welsch B. Seasonal high temperature heat storage with medium deep borehole heat exchangers // *Energy Procedia*. – 2015. – Vol. 76. – P. 351–360. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.841.
13. Welsch B., Rühaak W., Schulte D. Characteristics of medium deep borehole thermal energy storage // *International Journal of Energy Research*. – 2016. – Vol. 40 (13). – P. 1855–1868. DOI: 10.1002/er.3570.
14. Huang Y.B., Zhang Y.J., Xie Y.Y. Thermal performance analysis on the composition attributes of deep coaxial borehole heat exchanger for building heating // *Energy and Buildings*. – 2020. – Vol. 221. – Article 110019. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110019.
15. Li C., Guan Y.L., Jiang C. Numerical study on the heat transfer, extraction, and storage in a deep-buried pipe // *Renewable Energy*. – 2020. – Vol. 152. – P. 1055–1066. DOI: 10.1016/j.renene.2020.01.124.
16. Renaud T., Verdin P., Falcone G. Numerical simulation of a deep borehole heat exchanger in the Krafla geothermal system // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2019. – Vol. 143. – Article 118496. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118496.
17. Zhang H.Z., Han Z.W., Li X.M. Study on the influence of borehole spacing considering groundwater flow and freezing factors on the annual performance of the ground source heat pump // *Applied Thermal Engineering*. – 2021. – Vol. 182. – Article 116042. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116042.
18. Cai W.L., Wang F.H., Chen S. Analysis of heat extraction performance and long-term sustainability for multiple deep borehole heat exchanger array: a project-based study // *Applied Energy*. – 2021. – Vol. 289. – Article 116590. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.116590.
19. Zhang F.F., Yu M.Z., Sorensen B.R. Heat extraction capacity and its attenuation of deep borehole heat exchanger array // *Energy*. – 2022. – Vol. 254. – Article 124430. DOI: 10.1016/j.energy.2022.124430.
20. Zhang F.F., Fang L., Jia L.R. A dimension reduction algorithm for numerical simulation of multi-borehole heat exchangers // *Renewable Energy*. – 2021. – Vol. 179. – P. 2235–2245. DOI: 10.1016/j.renene.2021.08.028.
21. Evaluation of thermal response and performance of PHC energy pile: field experiments and numerical simulation / H. Park, S.-R. Lee, S. Yoon, J.-C. Choi // *Applied Energy*. – 2013. – Vol. 103. – P. 12–24. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.10.012.

22. Influence of backfilling phase change material on thermal performance of precast high-strength concrete energy pile / Z. Cao, G. Zhang, Y. Liu, X. Zhao, C. Li // *Renewable Energy*. – 2022. – Vol. 184. – P. 374–390. DOI: 10.1016/j.renene.2021.11.100.
23. Журмилова И.А., Штым А.С. Теплофизические свойства увлажненного песка – наполнителя для скважин с грунтовыми теплообменниками // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. – 2017. – Т. 2. – С. 100–109. DOI: org/10.5281/zenodo.808872.
24. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: АРИС, 2014. – 417 с.
25. Половников В.Ю., Губина Е.В. Тепломассоперенос в увлажненной тепловой изоляции теплопроводов, работающих в условиях затопления // *Инженерно-физический журнал*. – 2014. – Т. 87. – № 5. – С. 1106–1112.

Информация об авторах

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

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

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

Поступила в редакцию: 15.02.2024

Поступила после рецензирования: 04.03.2024

Принята к публикации: 26.04.2024

REFERENCES

1. Dincer I., Acar C. A review on clean energy solutions for better sustainability. *International Journal of Energy Research*, 2015, vol. 39 (5), pp. 585–606. DOI: 10.1002/er.3329.
2. Ellabban O., Abu-Rub H., Blaabjerg F. Renewable energy resources: current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 39, pp. 748–764. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.113.
3. Thorsteinsson H.H., Tester J.W. Barriers and enablers to geothermal district heating system development in the United States. *Energy Policy*, 2010, vol. 38 (2), pp. 803–813. DOI: 10.1016/j.enpol.2009.10.025.
4. Stober I., Bucher K. *Geothermal energy*. Cham, Springer International Publ., 2021. 390 p.
5. Soltani M., Kashkooli M.F., Dehghani-Sanij A., Kazemi A., Bordbar N., Farshchi M., Elmi M., Gharali K., Dusseault B.M. A comprehensive study of geothermal heating and cooling systems. *Sustainable Cities and Society*, 2019, vol. 44, pp. 793–818. DOI: S2210670718306838.
6. Hutter G.W. Geothermal power generation in the world 2015–2020 update report, review. *Proceedings of the World Geothermal Congress 2020+1*, 2021, Article 01017.
7. Beier R.A., Acuña J., Mogensen P., Palm B. Transient heat transfer in a coaxial borehole heat exchanger. *Geothermics*, 2014, vol. 51, pp. 470–482. DOI: 10.1016/j.geothermics.2014.02.006.
8. Fang L., Diao N.R., Shao Z.K. Thermal analysis models of deep borehole heat exchangers. *International Ground Source Heat Pump Association*, 2018, pp. 18–20. DOI: 10.22488/okstate.18.000018.
9. Beier R.A., Fossa M., Morchio S. Models of thermal response tests on deep coaxial borehole heat exchangers through multiple ground layers. *Applied Thermal Engineering*, 2021, vol. 184, Article 116241. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2020.116241.
10. Luo Y., Guo H., Meggers F., Zhang L. Deep coaxial borehole heat exchanger: analytical modeling and thermal analysis. *Energy*, 2019, vol. 185, pp. 1298–1313. DOI: 10.1016/j.energy.2019.05.228.
11. Luo Y.Q., Xu G.Z., Cheng N. Proposing stratified segmented finite line source (SS-FLS) method for dynamic simulation of medium-deep coaxial borehole heat exchanger in multiple ground layers. *Renewable Energy*, 2021, vol. 179, pp. 604–624. DOI: 10.1016/j.renene.2021.07.086.
12. Bär K., Rühaak W., Welsch B. Seasonal high temperature heat storage with medium deep borehole heat exchangers. *Energy Procedia*, 2015, vol. 76, pp. 351–360. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.841.
13. Welsch B., Rühaak W., Schulte D. Characteristics of medium deep borehole thermal energy storage. *International Journal of Energy Research*, 2016, vol. 40 (13), pp. 1855–1868. DOI: 10.1002/er.3570.
14. Huang Y.B., Zhang Y.J., Xie Y.Y. Thermal performance analysis on the composition attributes of deep coaxial borehole heat exchanger for building heating. *Energy and Buildings*, 2020, vol. 221, Article 110019. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110019.
15. Li C., Guan Y.L., Jiang C. Numerical study on the heat transfer, extraction, and storage in a deep-buried pipe. *Renewable Energy*, 2020, vol. 152, pp. 1055–1066. DOI: 10.1016/j.renene.2020.01.124.
16. Renaud T., Verdin P., Falcone G. Numerical simulation of a deep borehole heat exchanger in the Krafla geothermal system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, vol. 143, Article 118496. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118496.
17. Zhang H.Z., Han Z.W., Li X.M. Study on the influence of borehole spacing considering groundwater flow and freezing factors on the annual performance of the ground source heat pump. *Applied Thermal Engineering*, 2021, vol. 182, Article 116042. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116042.

18. Cai W.L., Wang F.H., Chen S. Analysis of heat extraction performance and long-term sustainability for multiple deep borehole heat exchanger array: a project-based study. *Applied Energy*, 2021, vol. 289, Article 116590. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.116590.
19. Zhang F.F., Yu M.Z., Sorensen B.R. Heat extraction capacity and its attenuation of deep borehole heat exchanger array. *Energy*, 2022, vol. 254, Article 124430. DOI: 10.1016/j.energy.2022.124430.
20. Zhang F.F., Fang L., Jia L.R. A dimension reduction algorithm for numerical simulation of multi-borehole heat exchangers. *Renewable Energy*, 2021, vol. 179, pp. 2235–2245. DOI: 10.1016/j.renene.2021.08.028.
21. Park H., Lee S-R., Yoon S., Choi J-C. Evaluation of thermal response and performance of PHC energy pile: Field experiments and numerical simulation. *Applied Energy*, 2013, vol. 103, pp. 12–24. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.10.012.
22. Cao Z., Zhang G., Liu Y., Zhao X., Li C. Influence of backfilling phase change material on thermal performance of precast high-strength concrete energy pile. *Renewable Energy*, 2022, vol. 184, pp. 374–390. DOI: 10.1016/j.renene.2021.11.100.
23. Zhurmilova I.A., Shtym A.S. Thermophysical properties of the moistened sand used as filler for boreholes with ground heat exchangers. *Vestnik Inzhenernoi shkoly DVFU, FEFU*, 2017, vol. 2, pp. 100–109. (In Russ.) DOI: org/10.5281/zenodo.808872.
24. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. *Heat transfer*. Moscow, ARIS Publ., 2014. 417 p. (In Russ.)
25. Polovnikov V.Y., Gubina E.V. Heat and mass transfer in a wetted thermal insulation of hot water pipes operating under flooding conditions. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2014, vol. 87 (5), pp. 1106–1112. (In Russ.)

Information about the authors

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

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

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

Received: 15.02.2024

Revised: 04.03.2024

Accepted: 26.04.2024

УДК 574.24:591.53:550.4(571.151)
DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4562
Шифр специальности ВАК: 1.6.21

Элементный состав организма диких и домашних животных в районе с проявлениями активной геофагии в Горном Алтае

Н.В. Барановская¹, А.М. Паничев², Д.А. Стрепетов¹✉, И.В. Серёдкин², Б.Р. Соктоев¹,
С.С. Ильенок¹, Р.А. Макаревич², В.В. Куровская¹, М.А. Рулик¹

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

² Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Россия, г. Владивосток

✉ das57@tpu.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования заключается в необходимости изучения элементного состава организма диких и домашних животных в природных средах с разным уровнем содержания химических элементов. **Цель:** выявить особенности элементного состава организма алтайского марала (*Cervus elaphus sibiricus* Severtzov, 1873), дикого кабана (*Sus scrofa scrofa* Linnaeus, 1758) и домашней свиньи (*Sus scrofa domesticus* Erxleben, 1777) на территории Онгудайского района Республики Алтай, в том числе в районе с проявлениями активной геофагии. **Объекты:** органы и ткани диких и домашних животных. **Методы:** масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой; атомно-эмиссионная спектрометрия; ионная хроматография, аналитический электронный микроскоп с энергодисперсионным спектрометром. **Результаты.** Определены медианные значения концентраций химических элементов в организмах алтайского марала, дикого кабана и домашней свиньи. Наибольшие значения в составе макроэлементов у всех животных показали Cl, S и K, среди редкоземельных элементов – La, Ce, Nd, Pr, Sc и Y. Среди особенностей элементного состава изученных животных выявлены повышенная аккумуляция Ba, I, Hg и Pb в организме алтайского марала; редких щелочей, а также редкоземельных элементов легкой подгруппы – в организме кабана; Sn, Au, Ir и редкоземельных элементов тяжелой подгруппы – в организме свиньи домашней. Относительно результатов зарубежных авторов, зафиксированы существенно повышенные концентрации Hg в почках марала и W в бронхах алтайского кабана, в сравнении с аналогичными животными в странах Европы, а также аномальные содержания Pb в головном мозге домашней свиньи. Сделаны предположения о факторах, влияющих на формирование элементного состава организма животных. Для марала и кабана это факторы питания (в том числе геофагия) и особенности накопления элементов в костной ткани; для домашней свиньи – фактор кормов и особенности местной металлотории, включая состав природных вод.

Ключевые слова: химические элементы, органы и ткани млекопитающих, геофагия, элемент-содержащие частицы, Республика Алтай

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РНФ № 20-67-47005 и № 20-64-47021.

Для цитирования: Элементный состав организма диких и домашних животных в районе с проявлениями активной геофагии в Горном Алтае / Н.В. Барановская, А.М. Паничев, Д.А. Стрепетов, И.В. Серёдкин, Б.Р. Соктоев, С.С. Ильенок, Р.А. Макаревич, В.В. Куровская, М.А. Рулик // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 6. – С. 98–109. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4562

UDC 574.24:591.53:550.4(571.151)
DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4562

Chemical composition of wild and domestic animals' organism in areas of geophagy distribution in Altai Republic

N.V. Baranovskaya¹, A.M. Panichev², D.A. Strepetov^{1✉}, I.V. Seryodkin², B.R. Soktoev¹,
S.S. Ilenok¹, R.A. Makarevich², V.V. Kurovskaya¹, M.A. Rulik¹

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

² Pacific Geographical Institute FEB RAS, Vladivostok, Russian Federation

✉ das57@tpu.ru

Abstract. Relevance. The need to study the elemental composition of the organism of wild and domestic animals in natural environments with different levels of chemical elements. **Aim.** To reveal features of the elemental composition of the organism of the Altai red deer (*Cervus elaphus sibiricus* Severtzov, 1873), wild boar (*Sus scrofa scrofa* Linnaeus, 1758) and domestic pig (*Sus scrofa domesticus* Erxleben, 1777) in Ongudai district, Altai Republic, including the area with signs of active geophagy. **Objects.** Organs and tissues of wild and domestic animals. **Methods.** Mass spectrometry with inductively coupled plasma; atomic-emission spectrometry; ion chromatography, analytical electron microscope with energy dispersion spectrometer. **Results.** The median values of chemical elements concentrations in the organisms of the Altai red deer, the wild boar and the domestic pig have been determined. S, Cl and K showed the highest values in the composition of macroelements and La, Ce, Nd and Th among rare-earth and radioactive elements. Among the elemental composition features of the studied animals, an increased accumulation of Hg and Pb in the Altai red deer; metals of the Fe-group, W, as well as rare-earth and radioactive elements – in the boar; platinoids – in the domestic pig. In comparison with the results of previous studies, increased concentrations of Hg in red deer kidneys, W in boar bronchi and Pb in the brain of domestic pigs were recorded. Assumptions were made about the factors influencing the formation of the elemental composition of the body of animals. For red deer and wild boar these are the factors of nutrition (including geophagy) and features of accumulation of elements in bone tissue; for domestic pigs – features of forage and local metallogeny, including composition of natural waters.

Keywords: chemical elements, mammalian organs and tissues, geophagy, element-containing particles, Altai Republic

Acknowledgements: The research was carried out within the framework of a grant from the Russian Science Foundation (Projects no. 20-67-47005, 20-64-47021).

For citation: Baranovskaya N.V., Panichev A.M., Strepetov D.A., Seryodkin I.V., Soktoev B.R., Ilenok S.S., Makarevich R.A., Kurovskaya V.V., Rulik M.A. Chemical composition of wild and domestic animals' organism in areas of geophagy distribution in Altai Republic. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 6, pp. 98–109. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4562

Введение

Тема концентрирования химических элементов в органах и тканях млекопитающих животных и у человека в зависимости от геохимических особенностей природных ландшафтов пока остается слабо разработанной. В России этой темой традиционно занимались и продолжают заниматься в институте геохимии и аналитической химии имени В.И. Вернадского РАН. Последняя крупная работа по данной тематике была опубликована специалистами этого учреждения в 2008 г. [1]. Как в России, так и за рубежом подобные работы продолжают ограничиваться сравнительно небольшим набором определяемых химических элементов, среди которых либо элементы из группы эссенциальных, либо из группы токсичных.

Наш интерес к данной теме связан с исследованием феномена геофагии – явления внутреннего потребления землистых веществ, которое присуще животным (преимущественно растительноядным) во многих регионах мира [2]. Это явление было характерно и для людей, причем в массовом виде с древних времен и до середины XX в. [3].

Регулярно-периодическое посещение животными одних и тех же мест с целью поедания минеральных веществ приводит к формированию особых ландшафтных комплексов, которые в зарубежной литературе принято называть «salt licks» [4], «natural licks» [5] или «mineral licks» [6], что по-русски дословно означает: «солевые, естественные или минеральные лизунцы» соответственно. В 2013 г. мы предложили и с тех пор используем термин

«кудуры», который заимствован нами из лексикона тюркских пастухов [7]. Термин «лизунцы» мы также употребляем для обозначения конкретных мест выедания и вылизывания горных пород на кудурах, как ландшафтных комплексах, иногда весьма обширных, сформированных при участии животных.

Несмотря на широкую распространенность геофагии и давнюю историю изучения этого феномена, причины стремления животных поедать грунты остаются до конца не известными. Существует несколько гипотез, объясняющих этот феномен, среди которых наиболее популярны «натриевая» [8], «детоксикационная» [9] и сравнительно недавно разрабатываемая нами «редкоземельная» [10, 11]. «Редкоземельная» гипотеза представляется нам наиболее актуальной. Основана она на участии редкоземельных элементов (РЗЭ) в нервной, эндокринной и иммунной системах организмов, при этом стабильная работа таких систем определяется сохранением в них необходимого уровня концентрации элементов из подгруппы легких лантаноидов при содержании представителей из подгруппы тяжелых лантаноидов ниже предела обнаружения, которые в норме не входят в эти важнейшие системы организма (или входят в крайне незначительном количестве).

Цель данной статьи – оценить самые общие особенности содержания как можно более широкого набора химических элементов с акцентом на РЗЭ в организмах диких и домашних животных на территории Горного Алтая (Онгудайский район Республики Алтай, бассейн р. Малой Сумульты). В качестве модельных объектов выбраны алтайский марал (*Cervus elaphus sibiricus* Severtzov, 1873) и дикий кабан (*Sus scrofa scrofa* Linnaeus, 1758), которые были добыты по охотничьим лицензиям в одном из районов активной геофагии в бассейне р. Малой Сумульты (рис. 1), а также домашняя свинья (*Sus scrofa domesticus* Erxleben, 1777), выкупленная у частного владельца в селе Купчегень, которое находится приблизительно в 40 км от места добычи диких животных (рис. 1).

Краткая ландшафтная и геологическая характеристика районов исследования

Рельеф в бассейне р. М. Сумульты сильно расчлененный с колебанием абсолютных высот от 500 до 2620 м. Большая часть территории покрыта густыми елово-кедровыми и лиственничными лесами с участками елово-березовых и осиновых лесов на месте старых гарей. На безлесных участках к середине лета отрастает густой и высокий травяной покров.

Для данной территории характерны суровая и снежная зима и сравнительно жаркое короткое ле-

то. Средние температуры января около -16°C , июля – $+18^{\circ}\text{C}$. Среднегодовое количество осадков составляет около 450 мм. Продолжительность периода со снежным покровом в долинах основных рек до 150 дней и до 200 дней на высокогорных склонах.

В нижней и средней частях речной долины, там, где сосредоточены практически все кудуры, на одном из которых были добыты марал и дикий кабан, развиты метаморфизованные мелководно-морские (песчано-илистые) отложения верхнекембрийско-нижнеордовикского возраста. В верхней части речного бассейна значительные площади занимают выходы щелочных гранитов пермского возраста с высокими содержаниями минералов РЗЭ (преимущественно монацит). Монацитсодержащие пески, согласно материалам государственной геологической съемки (масштаб 1:200000, карта М-45-IX, В.М. Сенников, 1958), отмечены геологами в песчаном аллювии во многих местах речной поймы в среднем и нижнем течении Малой Сумульты. Таким образом, большинство кудуров по р. М. Сумульте сосредоточено в относительной близости от гранитного массива, на расстоянии от края гранитов не далее 6 км. Места их расположения приурочены к крутым склонам и вершинам гор южных и юго-западных экспозиций по левому борту р. М. Сумульты там, где на поверхность выходят сильно выветрелые сланцы гидрослюдисто-хлоритового или кварц-гидрослюдисто-хлоритового состава.

Животные, среди которых преобладают маралы, поедают тонкодисперсные продукты выветривания сланцев с размерностью частиц от глинистой до песчаной фракции, причем отыскивая их как на коренных обнажениях, так и среди склоновых делювиально-пролювиальных отложений. Внешне местные кудуры выражены сравнительно слабо (если сравнивать их с кудурами в береговой зоне Телецкого озера). Отличительными их признаками являются наличие характерных осветленных в результате выедания и вылизывания мелкозема обнажений горных пород, а также ведущие к ним торные звериные тропы.

Село Купчегень, где была выращена опробованная нами домашняя свинья, расположено в речной пойме на слиянии рек Большой Ильгумень и Купчегень, недалеко от впадения р. Большой Ильгумень в Катунь (рис. 1). Основная часть села отстроена на аллювиальных террасах четвертичного возраста, меньшая часть – на склонах речных долин, сложенных гранитами и гранодиоритами девонского возраста (данные государственной геологической съемки, масштаб 1:200000, лист М-45-XV, В.И. Зиновьев, 2001).

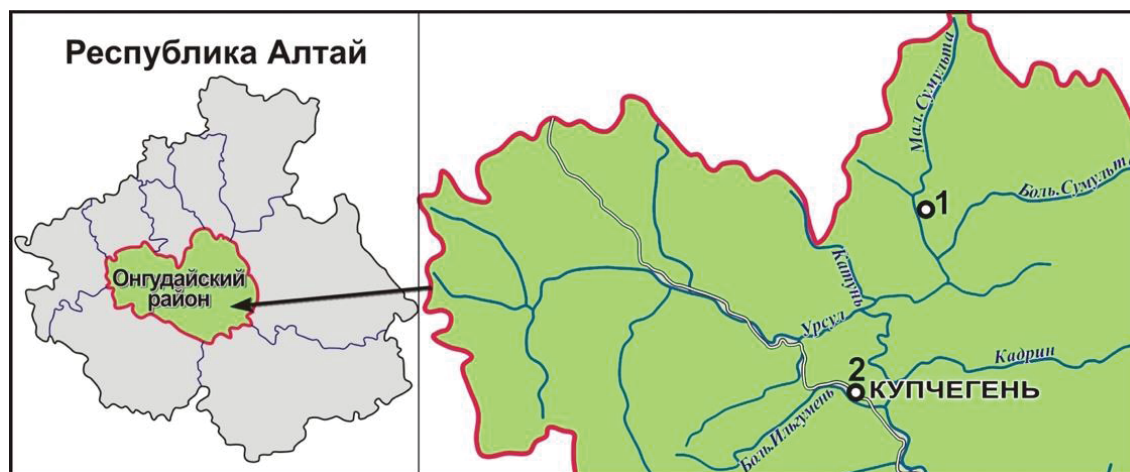


Рис. 1. Места добычи диких и домашних животных на территории Онгудайского района Республики Алтай с целью отбора проб органов и тканей: 1 – место добычи марала и дикого кабана; 2 – место отбора проб от домашней свиньи

Fig. 1. Sites of capture of wild and domestic animals on the territory of Ongudai district of the Altai Republic for sampling organs and tissues: 1 – capture place of red deer and wild boar; 2 – sampling place of domestic pig

Материалы и методы исследования

Отбор биогеохимических проб от животных на территории Онгудайского района проводился нами дважды. Первый раз в ноябре 2020 г. проведен отбор проб от домашней свиньи (взрослая самка) в селе Купчегень (рис. 1). Отбор выполнен сотрудниками отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета Н.В. Барановской и А.И. Беляновской. Второй отбор проведен сотрудником Тихоокеанского института географии ДВО РАН (г. Владивосток) И.В. Серёдкиным в конце апреля 2021 г. в бассейне р. М. Сумульта (рис. 1). На Малой Сумульте недалеко от одного из кудуров были добыты и опробованы алтайский марал (самец годовалый) и дикий кабан (самец взрослый). Следует заметить, что в пищеварительном тракте и марала, и кабана было обнаружено значительное количество (килограммы) минерального вещества хлорит-гидрослюдистого состава, потребленного на кудуре.

Отобранные пробы органов и тканей животных замораживались в автомобильном холодильнике при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и транспортировались в лабораторию Томского политехнического университета. Подготовка проб к анализу предусматривала предварительное их просушивание в сушильном шкафу при температуре $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, затем от просушенных проб отбирались фрагменты массой 200 мг, которые измельчались в агатовой ступке до фракции пудры. Измельченная проба помещалась в закрывающийся фторопластовый цилиндр с добавлением 0,2–1,0 мл концентрированной азотной кислоты, после чего цилиндр помещался в термощкаф, разогретый до температуры $115\text{ }^{\circ}\text{C}$, где выдержи-

вался от 0,5 до 1,0 ч. После полного растворения проба перемещалась в мерную полипропиленовую пробирку, где ее объем доводится деионизованной водой до 10 мл, после чего раствор отправлялся на анализ методом ИСП-МС (масс-спектрометр NexION 300D). Контроль точности анализа ИСП-МС проводился с применением мульти элементных калибровочных стандартных растворов № 1–5 (Multi-Element Calibration Standart) (PerkinElmer, США). Все анализы биологических материалов, кроме хвостовых желез маралов, выполнялись в проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии НИ ТПУ (заведующая лабораторией канд. геол.-минерал. наук А.А. Хвощевская).

Всего было проанализировано 33 пробы органов и тканей алтайского марала, 28 проб дикого кабана и 38 проб свиньи домашней.

Из части высушенных проб были сделаны препараты для исследования на аналитическом электронном микроскопе (SEM-Tescan Lyra 3 XMN) с энергодисперсионным спектрометром (AZtec X-Max 80 Standart). Этот вид работ выполнен в Аналитическом центре Дальневосточного геологического института ДВО РАН (г. Владивосток).

По полученным аналитическим данным по 28 пробам от каждого животного были рассчитаны медианные значения содержаний химических элементов для организма в целом. Перечень органов от каждого животного, на основе которых рассчитывались медианные содержания, приведен в табл. 2. Также был выполнен многофакторный анализ, позволивший выделить основные факторы, влияющие на формирование элементного состава организма опробованных животных.

Результаты исследования и их обсуждение

Медианные содержания химических элементов в организмах исследуемых животных представлены в табл. 1 (в порядке уменьшения значений). В графической форме они приведены на рис. 2, 3.

Таблица 1. Медианные содержания химических элементов в организмах опробованных животных в порядке уменьшения значений (мг/кг, сухое вещество)

Table 1. Median concentrations of chemical elements in the bodies of sampled animals in order of decreasing values (mg/kg, dry matter)

Элемент (Element)	Марал (deer)	Кабан (boar)	Свинья (pig)	Элемент (Element)	Марал (deer)	Кабан (boar)	Свинья (pig)
Cl	23675	11678	12652	Ce	0,02	0,06	0,07
S	21701	18371	19774	Zr	0,02	0,04	0,01
K	12231	9026	11641	La	0,01	0,05	0,02
P	8351	6887	8316	Cs	0,01	0,04	0,02
Na	4966	4911	5890	Cd	0,02	0,03	0,01
Mg	550	719	1072	Ga	0,005	0,01	0,01
Ca	852	417	579	Nb	0,004	0,01	0,002
Fe	193	176	87,7	Nd	0,004	0,01	0,01
Si	111	107	133	Ta	0,004	0,01	0,01
Br	96,4	42,2	20,4	Th	0,004	0,01	0,01
Zn	58,4	64	62,6	Y	0,003	0,01	0,004
Al	6,16	6,77	39,1	Sn	0,003	0,003	0,01
Mn	5,81	8,15	1,67	Sb	0,003	0,001	0,01
Ti	6,42	5,6	4,62	Hf	0,003	0,005	0,002
Rb	4,93	5,3	12,6	Pr	0,001	0,003	0,002
Cu	3,7	6,16	4,35	Ag	0,002	0,002	0,001
Ba	2,81	0,19	0,15	W	0,0002	0,003	0,002
Sr	1,71	1,03	0,48	Gd	0,0001	0,002	0,001
B	1,26	0,93	0,44	Rb	0,0002	0,0002	0,0001
I	1,11	0,54	0,39	Bi	0,0001	0,0002	0,001
Se	0,57	0,71	0,5	U	0,00005	0,001	0,001
Cr	0,29	0,35	0,31	Au	0,00005	0,00005	0,01
Ni	0,1	0,28	0,12	Dy	0,00005	0,0005	0,001
Li	0,14	0,24	0,02	Sm	0,00005	0,0004	0,001
Pb	0,22	0,05	0,05	Tl	0,00005	0,0002	0,001
Sc	0,07	0,11	0,07	Ir	0,00005	0,00005	0,001
Mo	0,07	0,07	0,12	Tb	0,00005	0,00005	0,0002
V	0,09	0,09	0,04	Er	0,00005	0,00005	0,0002
As	0,06	0,03	0,02	Eu	0,00005	0,00005	0,0001
Co	0,05	0,05	0,01	Ho	0,00005	0,00005	0,0001
Hg	0,06	0,004	0,01	Lu	0,00005	0,00005	0,0001

Примечание. Красным выделены значения ниже предела обнаружения. В таблице не приведены данные по Be, Ge, Re, Pd, In, Te, Re, Os, Pt, Tm и Yb – результаты по ним во всех организмах были ниже предела обнаружения.

Note. Values below the detection limit are highlighted in red. The table does not include data for Be, Ge, Re, Pd, In, Te, Re, Os, Pt, Tm and Yb, as the results for these were below the detection limit in all organisms.

Как очевидно из табл. 1 и рис. 2, к макроэлементам в составе организма (к элементам, содержание которых свыше 1 г/кг) относятся все первые элементы в таблице от хлора до магния. При этом в

организме марала, по сравнению с организмами свиней, существенно (почти вдвое) выше содержание Cl, заметно выше содержание S. Содержание остальных макроэлементов сопоставимо у всех животных. У свиньи домашней заметно выше, по сравнению с другими животными, содержание Mg.

В табл. 2 приведены содержания хлора в пробах по 28 органам от каждого животного. Каждый орган представлен единичной пробой. По полученным данным проводился расчет медианного содержания хлора (подобным образом рассчитывались и медианные содержания остальных химических элементов) во всем организме.

Таблица 2. Содержания хлора в органах опробованных животных (мг/кг, сухое вещество)

Table 2. Chlorine concentrations in the organs of sampled animals (mg/kg, dry matter)

Орган/ткань Organ/tissue	Cl		
	Марал (deer)	Кабан (boar)	Свинья (pig)
Сердце (Heart)	20481	8688	10385
Костный мозг (Bone marrow)	1221	515	160
Селезенка (Spleen)	23912	19719	7292
Головной мозг (Brain)	13491	5369	13487
Спинальный мозг (Spinal cord)	11997	1670	8621
Трахея (Trachea)	10424	16378	14385
Бронх (Bronchi)	12214	19739	20251
Легкое (Lung)	37449	27031	28602
Зуб (Tooth)	5263	1674	4903
Бедренная мышца (Femur muscle)	10440	5968	6646
Диафрагма (Diaphragm)	14399	6114	2680
Глаз (Eye)	23570	29112	18263
Ухо (Ear)	26804	6505	17009
Кожа (Skin)	22280	13742	2163
Язык (Tongue)	34316	11445	11355
Пищевод (Esophagus)	39588	11911	12673
Желудок (Stomach)	20701	12602	20848
Тонкая кишка начало (Small bowel beginning)	54093	15286	24049
Тонкая кишка середина (Small bowel middle)	36535	18411	16761
Тонкая кишка конец (Small bowel end)	34861	22549	19973
Слепая кишка (Blind gut)	23779	5424	7393
Ободочная кишка начало (Large bowel beginning)	24729	5206	9829
Ободочная кишка середина (Large bowel middle)	17453	5721	8694
Ободочная кишка конец (Large bowel end)	10492	7165	12631
Прямая кишка (Straight bowel)	27189	6885	11597
Почка (Kidney)	40301	18990	49686
Мочевой пузырь (Urinary bladder)	32802	16886	33832
Семенник/яичник (Testicle/ovarium)	30386	33499	32564
МЕДИАНА (MEDIAN)	23675	11678	12652

Далее вернемся к рассмотрению данных по микроэлементам в табл. 1. Из этих данных следует, что в организме диких животных (у марала и кабана) явно выше, чем у свиньи домашней, содержание Ca, Fe, Br, Mn, B, и Li. У марала, в отличие от

свиней, наиболее высоки концентрации Br, Ba, Sr, B, I, Pb, As и Hg и заметно ниже содержание Ga, Nb, Nd, Ta, Th, Sb, W, U, Tl. В организме свиной домашней, в свою очередь, заметно выше, чем у диких животных, содержание Al, Rb, Mo, Sn, Sb, Bi, Ir и Au.

Концентрация РЗЭ в организме свиней (как у дикого кабана, так и у свиной домашней) оказалась

заметно выше, чем в организме молодого оленя. Это относится к Sc, Y и легким лантаноидам (рис. 2), а также к тяжелым лантаноидам. При этом наибольшее содержание ТРЗЭ выявлено у свиной домашней (табл. 1).

РЗЭ с наибольшими медианными концентрациями в организме изучаемых животных приведены (в порядке уменьшения) на рис. 3.

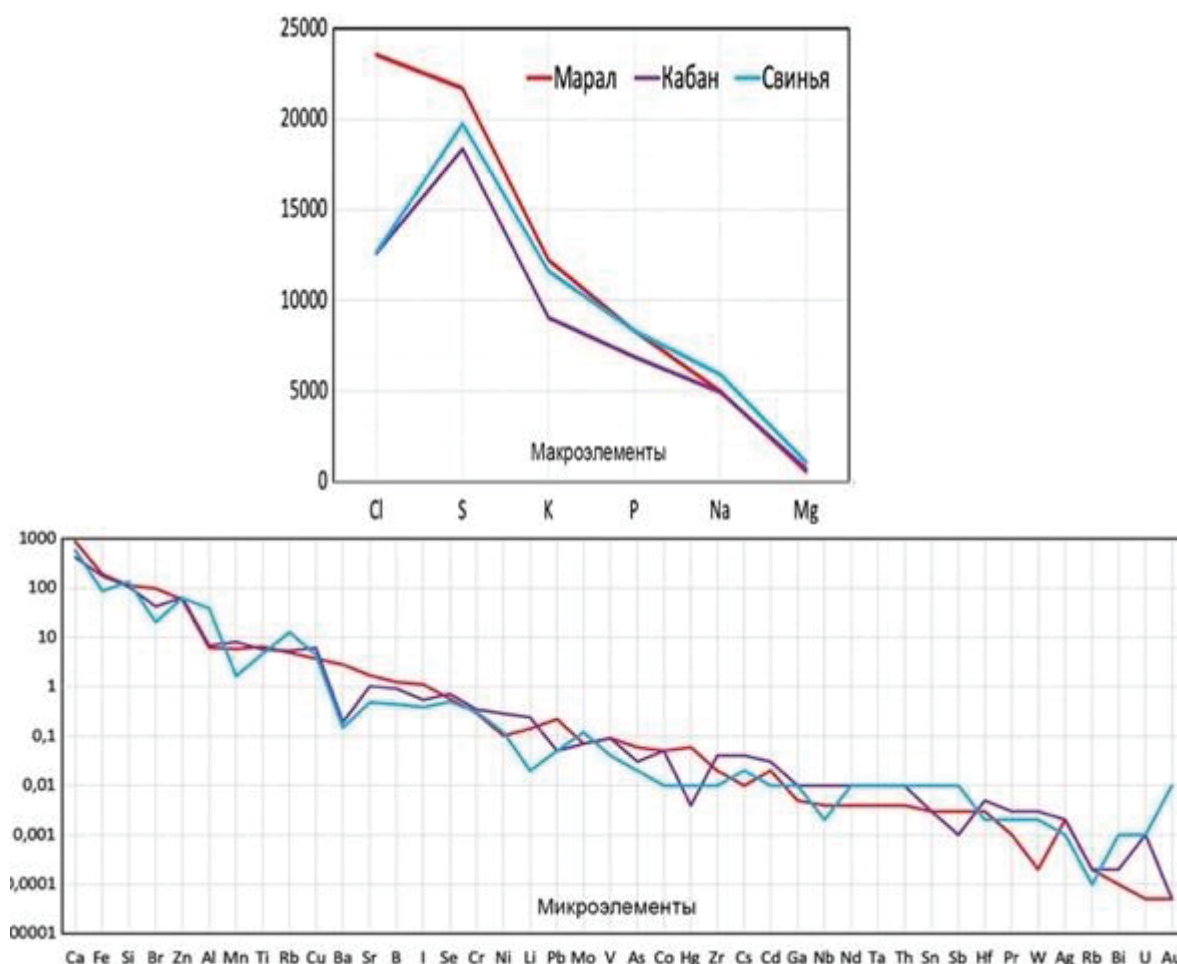


Рис. 2. Медианные содержания макро- и микроэлементов в организмах опробованных животных в порядке уменьшения значений (мг/кг, сухое вещество)

Fig. 2. Median concentrations of macro- and microelements in the organisms of the sampled animals in order of decreasing values (mg/kg, dry matter)

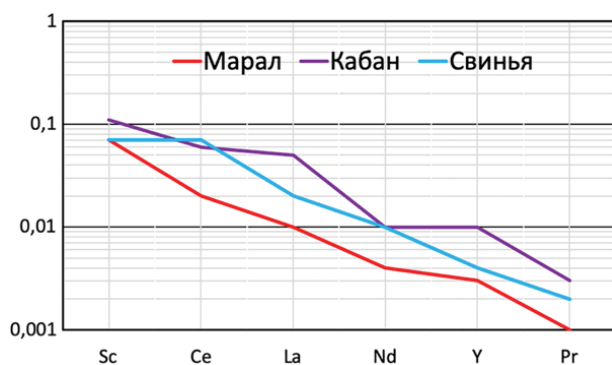


Рис. 3. Медианные содержания РЗЭ в организмах опробованных животных в порядке уменьшения значений (мг/кг, сухое вещество)

Fig. 3. Median rare earth elements (REE) concentrations in organisms of tested animals in order of decreasing values (mg/kg, dry matter)

Вероятнее всего, это и есть тот набор РЗЭ, который востребован в организме млекопитающих. Все остальные элементы из группы РЗЭ, похоже, не входят в норму в состав органов и тканей млекопитающих, и их наличие, тем более в повышенных концентрациях, может свидетельствовать об отклонении от нормы.

Интересно было бы сравнить полученные нами данные медианных содержаний химических элементов в организме животных с аналогичными данными по животным из других регионов. К сожалению, такие данные зачастую получены устаревшими методами анализа, поэтому сравнение с ними можно проводить лишь условно. В связи с чем далее перейдем к рассмотрению особенностей концентрации химических элементов в отдельных органах в сравнении с данными, полученными разными авторами по аналогичным животным в других регионах мира.

Сравнение наших данных по печени алтайского марала с данными химического состава печени благородных оленей на территории ряда стран Европы (табл. 3) показало, что у марала существенно выше содержания Fe, Cu, Se, Cd и Hg. Причем по Hg превышение на 3 порядка. Лишь по некоторым регионам наблюдается превышение содержаний элементов в печени оленей по Zn, Pb, Se и Cd.

Таблица 3. Сравнение элементного состава некоторых органов у марала с р. Малой Сумульты и у оленей из ряда других стран (мг/кг, сухое вещество)

Table 3. Comparison of the elemental composition of some organs of red deer from river M. Sumulta and deer from several other countries (mg/kg, dry matter)

Орган/ткань Organ/tissue	Элемент Element	Регион, источник (Region, source)						
		Горный Алтай Gorny Altai	Хорватия Croatia [12]	Норвегия Norway [13]	Польша Poland [14]	Нидерланды Netherlands [15]	Казахстан Kazakhstan [16]	Канада Canada [17]
Печень Liver	Fe	503	68,5	-	-	394	-	-
	Cu	146	14,7	15	16	86	-	122
	Zn	64,3	30	33	31	115	-	79,7
	Se	0,76	0,24	0,2	-	-	-	1,40
	Cd	0,72	0,18	0,04	0,19	-	-	1,10
	Hg	0,63	0,009	0,005	-	-	-	-
	Pb	0,44	0,95	0,07	0,26	0,49	-	<0,05
Мышца Muscle	Cu	6,94	3,48	-	3,3	-	1,40	-
	Zn	159	43,4	-	39	-	30,0	-
	Cd	<0,0001	0,12	-	0,1	-	<0,05	-
	Pb	0,01	0,15	-	0,22	-	<0,008	-
Почка Kidney	Fe	3940	101	-	-	284	-	-
	Cu	14,2	4,84	-	5,2	14	-	-
	Zn	72,9	49,2	-	30	144	-	-
	Cd	7,69	2,65	-	2,2	-	-	-
	Pb	1,88	0,09	-	0,31	1,258	-	-

Сопоставление химического состава мышц у марала и оленей из ряда европейских стран показало существенно более высокие значения у марала по Cu и Zn и значительно ниже показатели по Cd и Pb.

В почках сравниваемых животных у марала несопоставимо больше Fe, несколько больше Cu, Cd и Pb.

Наиболее сильные различия в химическом составе органов марала и оленей из других регионов мира выявлены по Hg в печени (у марала превышение в 100 раз) и по Fe в почках (у марала превышение в 100–300 раз).

Таблица 4. Сравнение элементного состава некоторых органов у дикого кабана с р. Малой Сумульты и у кабанов из ряда других стран (мг/кг, сухое вещество)

Table 4. Comparison of the elemental composition of some organs of wild boar from river M. Sumulta and boars from several other countries (mg/kg, dry matter)

Орган/ткань Organ/tissue	Элемент Element	Регион, источник (Region, source)					
		Горный Алтай Gorny Altai	Нидерланды Netherlands [15]	Италия Italy [18]	Польша Poland [19]	Швеция Sweden [20]	Турция Turkey [21]
Печень Liver	Mg	862	-	-	-	197	-
	Cr	0,34	-	0,14	-	-	1,3
	Mn	18,1	-	-	-	1,66	3,89
	Fe	4100	995	-	-	129	-
	Cu	30,9	15	46,1	-	6,67	0,71
	Zn	211	136	49,8	-	25,1	38,9
	As	0,002	-	-	-	0,02	-
	Se	1,08	-	-	-	2,3	0,42
	Cd	1,25	-	0,09	-	4,16	0,61
Мышца Muscle	Pb	0,25	0,92	0,32	-	0,14	0,75
	Na	1827	-	-	157 2	-	-
	Mg	818	-	-	557	-	-
	Cr	0,29	-	0,14	-	-	1,35
	Mn	1,1	-	-	1,91	-	1,0
	Fe	133	-	-	82,4	-	-
	Cu	5,6	-	12,2	5,82	-	0,45
	Zn	68,6	-	53,2	117	-	45,7
	Cd	<0,0001	-	0,08	-	-	0,51
Почка Kidney	Pb	0,002	-	0,13	-	-	0,44
	Cr	0,33	-	0,1	-	-	1,82
	Fe	252	525	-	-	-	-
	Cu	14,4	17	5,64	-	-	1,25
	Zn	59,7	140	32,5	-	-	32,2
	Cd	6,74	-	1,05	-	-	3,05
	Pb	0,08	1,33	0,3	-	-	0,52

Сопоставление данных содержания химических элементов в печени и почках у дикого кабана с р. М. Сумульты и аналогичных животных на территории некоторых стран Европы и Турции (табл. 4) показывает существенно повышенные содержания Mg, Mn, Fe и Zn в печени алтайского кабана, при этом содержания Cr, Cu, As, Se, Cd и Pb

сопоставимы. В мышцах у сравниваемых животных концентрации большинства элементов сопоставимы. Разница лишь в более высоком накоплении у кабанов из Италии и Турции Cd и Pb. В почках у кабана с Алтая выше содержание Cd и места-ми Cu, но меньше Fe, редко Cr, Zn и Pb.

Для организма свиньи домашней сравнение сделано только по мышцам и почкам. Выявлено, что в пробе бедренной мышцы домашней свиньи с Алтая по большинству элементов показатели либо сопоставимы, либо меньше показателей по мясу свиней из ряда стран Европы, Африки и США, а в почках, наоборот, все показатели по элементам (кроме As) выше у изучаемого животного (табл. 5).

Таблица 5. Сравнение элементного состава некоторых органов у свиньи домашней из села Купчегень (Горный Алтай) и ряда других стран (мг/кг, сухое вещество)

Table 5. Comparison of the elemental composition of some organs of domestic pig from Kupchegen and pigs from several other countries (mg/kg, dry matter)

Орган/ткань Organ/tissue	Элемент Element	Регион, источник (Region, source)					
		Горный Алтай Gorny Altai	Польша Poland [19]	Испания Spain [22]	Греция Greece [23]	Нигерия Nigeria [24]	США USA [25]
Мышца Muscle	Cr	0,22	-	0,13	<0,006	-	0,70
	Mn	0,19	1,92	1,01	-	-	-
	Fe	15,5	34,9	26,5	-	3,78	-
	Cu	1,44	3,05	6,85	-	0,05	9,87
	Zn	31,2	61,3	42,5	-	-	86,4
	As	0,02	-	0,003	-	-	-
	Cd	0,004	-	0,01	<0,02	0,03	-
	Pb	0,02	-	0,003	<0,02	0,09	-
Hg	0,01	-	0,001	-	-	0,14	
Почка Kidney	Cr	0,28	-	0,08	<0,006	-	-
	Fe	376	-	51,6	-	0,94	-
	Cu	28,3	-	5,63	-	0,26	-
	Zn	93,1	-	28,9	-	-	-
	As	0,04	-	0,01	-	-	-
	Cd	0,49	-	0,31	<0,02	0,02	-
	Pb	0,15	-	0,008	<0,02	0,08	-

Характерной особенностью элементного состава организма домашней свиньи из села Купчегень является высокое содержание Pb в головном мозге (14,1 мг/кг), что в несколько раз превышает эталонное содержание элемента в бычьей печени, используемой в качестве стандартного показателя для мяса, пригодного к потреблению человеком [26]. И это при том, что максимальное медианное содержание Pb выявлено в организме марала. Аномально высокое содержание свинца в головном мозге купчегеньской свиньи подтверждено методом сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионным спектрометром. В пробе го-

ловного мозга была обнаружена Pb-содержащая частица (рис. 4).

Столь высокая степень накопления Pb в головном мозге не может быть объяснена на данном этапе работы, этот вопрос требует дальнейших исследований.

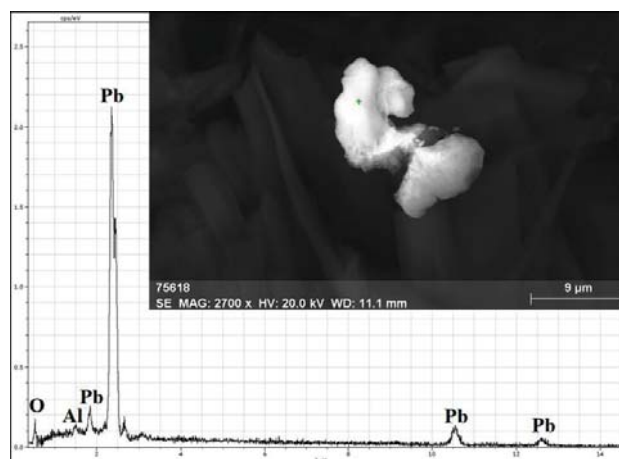


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение в обратно рассеянных электронах и энергодисперсионный спектр Pb-содержащей частицы в головном мозге домашней свиньи из села Купчегень

Fig. 4. Electron microscopic image in backscattered electrons and energy dispersive spectrum of a Pb-containing particle in the brain of a domestic pig from Kupchegen

С целью выявления основных факторов, влияющих на накопление химических элементов в организме исследованных животных, был выполнен многофакторный анализ всей совокупности данных. Полученные результаты представлены в табл. 6.

По результатам анализа для каждого животного было выявлено три значимых фактора, влияющих на особенности концентрации химических элементов в организме. Для алтайского марала ведущий фактор отвечает за особенности концентрации и распределения широкого спектра химических элементов, в том числе РЗЭ и радиоактивных элементов (РАЭ). Вероятнее всего, это фактор питания животного с учетом геофагии. Вторым фактором, вероятно, является способность химических элементов к накоплению в костной ткани. На это указывает наличие среди этой группы элементов Са, Р – основных компонентов гидроксилapatита и других остеотропных элементов. Третий фактор, по-видимому, отражает особенности металлогении места обитания изучаемого животного. Все химические элементы в данном случае являются халькофильными. Как известно, район Горного Алтая богат месторождениями и проявлениями полиметаллических руд [27].

Таблица 6. Результаты многофакторного анализа элементного состава органов и тканей изученных животных

Table 6. Results of multifactorial analysis of elemental composition of organs and tissues of the studied animals

Алтайский марал (Altai red deer)		
Фактор 1 (Factor 1)	Фактор 2 (Factor 2)	Фактор 3 (Factor 3)
Al, Si, V, Mn, Ga, Y, Zr, In, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Yb, W, Th, U	Li, P, Ca, Ti, Sr, Rh, Ba	As, Se, Cd, Te, Hg, Tl
Кабан (Wild boar)		
Фактор 1 (Factor 1)	Фактор 2 (Factor 2)	Фактор 3 (Factor 3)
Li, Be, B, Al, Si, Sc, V, Cr, Mn, Co, Ni, Ga, As, Y, Zr, In, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Pb, Th, U	P, Ca, Ti, Rh	Ag, Pt, Au
Домашняя свинья (Domestic pig)		
Фактор 1 (Factor 1)	Фактор 2 (Factor 2)	Фактор 3 (Factor 3)
Li, Al, Si, V, Mn, Co, Ni, Ga, As, Y, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Th, U	Mg, P, Ca, Sr	Cl, Cu, Se, Br, Mo, Cs, Hf, Ir

Для организма кабана первый фактор, как и в случае с маралом, имеет наибольшую долю влияния на химические элементы и, скорее всего, является фактором потребляемой пищи и геофагии. Второй фактор, как и в первом случае, вклад костной ткани в элементный состав организма. Третий фактор, влияющий на распределение элементов из группы благородных металлов, связан с особенностями местной металлогении.

В организме домашней свиньи первый фактор, аналогично с предыдущими животными, имеет наибольшую долю влияния и, скорее всего, также обусловлен химическим составом пищи. На это указывает схожий спектр химических элементов, связанных с влиянием данного фактора, причем для всех трех исследованных животных с этим фактором связано поступление в организм редких, редкоземельных и радиоактивных элементов. Второй фактор связан с остеотропными химическими элементами. Третий фактор у свиньи домашней, возможно, связан с участием в диете искусственных кормов. Согласно литературным данным, в различных типах комбикормов содержатся значительные концентрации Cu, Se, Mo [28]. Помимо влияния комбикормов к третьему фактору также следует отнести возможное влияние местной геохимии, в том числе гидрогеохимии природных вод.

Заключение

В организме алтайского марала, кабана и домашней свиньи наивысшими медианными значениями обладают среди макроэлементов – S, Cl и K; среди неметаллов – Br и I; среди тяжелых металлов – Pb и Hg; среди радиоактивных – Th; среди редкоземельных – Sc, Ce, La, Nd, Y и Pr. При этом

концентрация РЗЭ в организме свиней оказалась выше, чем в организме марала, а максимальные содержания РЗЭ тяжелой подгруппы выявлены в организме свиньи домашней из села, расположенного в пределах гранитного массива, причем на реке, в бассейне которой значительные площади заняты кислыми магматическими породами, в том числе щелочными гранитами.

Интересный и пока необъяснимый факт, выявленный нами в отношении макроэлементов, состоит в том, что в организме марала концентрация Cl почти вдвое выше, чем в организмах свиней.

В организмах изученных животных выявлены значительные превышения концентраций некоторых химических элементов в ряде органов и тканей относительно опубликованных данных по аналогичным видам животных из других регионов мира. Так, в мышце, печени и почке алтайского марала выявлены значительно более высокие содержания Fe, Cd и особенно Hg, содержание которой в печени на 2 порядка выше, чем у оленей из других регионов. В печени дикого кабана из Горного Алтая также выявлено резко повышенное содержание Fe и необычайно высокое содержание W в бронхах (1,08 мг/кг). У домашней свиньи из села Купчегень выявлено аномальное содержание Pb в головном мозге (14,4 мг/кг).

С помощью электронной микроскопии с ЭД анализатором на препаратах из проб свиньи домашней выявлено, что непосредственно в тканях головного мозга имеются стяжения (возможно, минеральные агрегаты), состоящие преимущественно из свинца.

Выявлено также, что каждое изученное животное имеет присущие только ему особенности накопления некоторых химических элементов: благородные металлы активнее аккумулируются в органах и тканях свиньи домашней; Hg и зачастую Pb накапливаются в большинстве органов в организме алтайского марала; покровные и дыхательные органы дикого кабана являются в большей степени, чем у других животных, концентраторами РЗЭ, РАЭ, металлов группы железа и W.

Основными факторами, влияющими на формирование элементного состава организма животных, обитающих непосредственно в районе активной геофагии, предположительно, являются фактор питания (в том числе геофагия), а также способность элементов накапливаться в костной ткани. Основными факторами формирования элементного состава организма свиньи в селе Купчегень, наиболее вероятно, являются применяемые при откорме привозные кормовые смеси и особенности местной металлогении, обусловленные расположением села в пределах гранитного массива и проявляемые через химические составы местных кормов и природных вод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермаков В.В., Тютиков С.Ф. Геохимическая экология животных. – М.: Наука, 2008. – 315 с.
2. Паничев А.М. Литофагия в мире животных и человека. – М.: Наука, 1990. – 224 с.
3. Laufer B. Geophagy // Publications of the Field Museum of Natural History. Anthropological Series. – 1930. – Vol. 18. – № 2. – P. 99–198.
4. Tawa Y., Sah S.A.M., Kohshima S. Salt-lick use in Malaysian tropical rainforests reveals behavioral differences by food habit in medium and large-sized mammals // European Journal of Wildlife Research. – 2022. – Vol. 68. – № 5. – P. 57–69.
5. Klaus G., Schmid B. Geophagy at natural licks and mammal ecology: a review // Mammalia. – 1998. – Vol. 62 – № 4. – P. 482–497.
6. Mineral lick use by a community of large herbivores in northern Iran / F. Salmanpour, Z. Shakoori, M. Kia, R. Eshaghi, M. Ghaderi, S. Ghomi, R. Kaveh, K. Rabie, B.H. Kiabi, M.S. Farhadinia // Ecology and Evolution. – 2023. – Vol. 13. – № 1. – P. 1–7.
7. Geophagy and geology of mineral licks (kudurs): a review of Russian publications / A.M. Panichev, K.S. Golokhvast, A.N. Gulkov, I.Yu. Chekryzhov // Environmental Geochemistry and Health. – 2013. – № 1. – P. 133–152.
8. Stockstad D.S., Morris M.S., Lory E.C. Chemical characteristics of natural licks used by big game animals in western Montana // Trans. N. Amer. Wild-life Conf. – 1953. – Vol. 18. – P. 247–257.
9. Houston D.C., Gilardi J.D., Hall A.J. Soil consumption by elephants might help to minimize the toxic effects of plant secondary compounds in forest browse // Mammal. Review. – 2001. – Vol. 31. – № 3–4. – P. 249–254.
10. Landscape REE anomalies and the cause of geophagy in wild animals at kudurs (mineral salt licks) in the Sikhote-Alin (Primorsky Krai, Russia) / A.M. Panichev, N.V. Baranovskaya, I.V. Seryodkin, I.Yu. Chekryzhov, E.A. Vakh, B.R. Soktoev, A.I. Belyanovskaya, R.A. Makarevich, T.N. Lutsenko, N.Yu. Popov, A.V. Ruslan, D.S. Ostapenko, A.V. Vetoshkina, V.V. Aramilev, A.S. Kholodov, K.S. Golokhvast // Environmental Geochemistry and Health. – 2022. – Vol. 44. – № 3. – P. 1137–1160.
11. Excess of REE in plant foods as a cause of geophagy in animals in the Teletskoye Lake basin, Altai Republic, Russia / A. Panichev, N. Baranovskaya, I. Seryodkin, I. Chekryzhov, E. Vakh, Yu. Kalinkin, T. Lutsenko, N. Popov, A. Ruslan, D. Ostapenko, E. Elovskiy, A. Vetoshkina, O. Patrusheva, R. Makarevich, Yu. Manakov, A. Kholodov, D. Spandidos, A. Tsatsakis, K. Golokhvast // World Academy of Sciences Journal. – 2023. – Vol. 5. – № 1. – P. 1–22.
12. Toxic and essential metal concentrations in four tissues of red deer (*Cervus elaphus*) from Baranja, Croatia / M. Lazarus, T. Orct, M. Blanuša, I. Vicković, B. Šoštarić // Food additives and contaminants. – 2008. – Vol. 25. – № 3. – P. 270–283.
13. Levels of trace elements in liver from Norwegian moose, reindeer and red deer in relation to atmospheric deposition / A. Frøslie, G. Norheim, J.P. Rambtek, E. Steinnes // Acta Veterinaria Scandinavica. – 1984. – Vol. 25. – № 3. – P. 333–345.
14. Concentrations of heavy metals in the tissues of red deer (*Cervus elaphus*) from the region of Warmia and Mazury, Poland / J. Falandysz, K. Szymczyk-Kobrzyńska, A. Brzostowski, K. Zalewski, A. Zasadowski // Food additives and contaminants. – 2005. – Vol. 22. – № 2. – P. 141–149.
15. Wolkers H., Wensing T., Bruinderink G.W.G. Heavy metal contamination in organs of red deer (*Cervus elaphus*) and wild boar (*Sus scrofa*) and the effect on some trace elements // Science of the total environment. – 1994. – Vol. 144. – № 1–3. – P. 191–199.
16. Макро- и микроэлементный состав мяса марала / Э.К. Окусханова, Б.К. Асенова, С.Т. Дюсембаев, Ж.С. Есимбеков, М.Б. Ребезов // Молодой ученый. – 2014. – № 11. – С. 90–93.
17. Pollock B. Trace elements status of white-tailed deer (*Odocoileus virginianus*) and moose (*Alces alces*) in Nova Scotia. – Canada: Canadian Cooperative Wildlife Health Centre: Newsletters & Publications, 2005. – 28 p.
18. Concentrations of some toxic and trace elements in wild boar (*Sus scrofa*) organs and tissues in different areas of the Province of Viterbo, Central Italy / A. Amici, P.P. Danieli, C. Russo, R. Primi, B. Ronchi // Italian Journal of Animal Science. – 2012. – Vol. 11. – P. 354–362.
19. Babicz M., Kasprzyk A. Comparative analysis of the mineral composition in the meat of wild boar and domestic pig // Italian Journal of Animal Science. – 2019. – Vol. 18. – № 1. – P. 1013–1020.
20. Concentrations of cadmium, lead, arsenic, and some essential metals in wild boar from Sweden / A. Malmsten, A.M. Dalin, J. Pettersson, S. Persson // European Journal of Wildlife Research. – 2021. – Vol. 2. – P. 1–8.
21. Demirbas Y., Erduran N. Concentration of selected heavy metals in brown hare (*Lepus europaeus*) and wild boar (*Sus scrofa*) from central Turkey // Balkan Journal of Wildlife Research. – 2017. – Vol. 4. – P. 26–33.
22. Toxic and essential metals in liver, kidney and muscle of pigs at slaughter in Galicia, north-west Spain / M. López-Alonso, M. Miranda, C. Castillo, J. Hernandez, M. Garcia-Vaquero, J. Benedito // Food Additives and Contaminants. – 2007. – Vol. 24. – № 9. – P. 943–954.
23. Heavy metal accumulation in animal tissues and internal organs of pigs correlated with feed habits / S. Leontopoulos, N. Gougoulis, D. Kantas, L. Roka // Bulgarian Journal of Agricultural Science. – 2015. – Vol. 21. – № 3. – P. 693–697.
24. Buba Z.M., Abbas E.A., Ahmed U. Determination of some heavy metals in kidney, liver and muscle of domestic pig (*Sus scrofa domestica*) in Guyuk Metropolis, Adamawa state, Nigeria // International Journal of Research and Scientific Innovation. – 2020. – Vol. 7. – № 10. – P. 250–255.
25. Trace elements and radiocesium in game species near contaminated sites / R.E. Oldenkamp, A.B.J. Bryan, R.A. Kenamer, J.C. Leaphart, S.C. Webster, J.C. Beasley // The Journal of Wildlife Management. – 2017. – Vol. 81. – № 8. – P. 1338–1350.
26. NAA characterization of the new bovine liver SRM / R. Zeisler, W. James, E. Mackey, R. Spatz, R. Greenberg // Journal of radioanalytical and nuclear chemistry. – 2008. – Vol. 278. – № 3. – P. 783–787.
27. Гусев А.И. Полиметаллическое оруденение Горного Алтая: перспективы и прогнозная оценка // Природные ресурсы Горного Алтая. Геология, геофизика, гидрогеология, геоэкология, минеральные и водные ресурсы. – 2007. – № 3. – С. 3–10.
28. Хоченков А.А. Сбалансированность рассыпных комбикормов для свиноматок // Актуальные проблемы интенсивного развития животноводства. – 2010. – № 13 (1). – С. 3–9.

Информация об авторах

Наталья Владимировна Барановская, доктор биологических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. nata@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3729-800X>

Александр Михайлович Паничев, доктор биологических наук, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экологии и охраны животных, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Россия, 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 7. sikhote@mail.ru

Дмитрий Александрович Стрепетов, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. das57@tpu.ru; <http://orcid.org/0000-0002-1041-4747>

Иван Владимирович Серёдкин, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экологии и охраны животных, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Россия, 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 7. seryodkinivan@inbox.ru; <http://orcid.org/0000-0003-4054-9236>

Булат Ринчинович Соктоев, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. bulatsoktoev@tpu.ru; <http://orcid.org/0000-0002-4102-4282>

Сергей Сергеевич Ильенко, кандидат геолого-минералогических наук, старший преподаватель отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. ilenokss@tpu.ru; <http://orcid.org/0000-0002-0216-4485>

Раиса Алексеевна Макаревич, научный сотрудник лаборатории геохимии, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Россия, 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 7. mak@tigdvo.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6787-6870>

Влада Владиславовна Куровская, инженер отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. kurovskaya@tpu.ru

Мария Алексеевна Рулик, магистрант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. mar15@tpu.ru

Поступила в редакцию: 05.02.2024

Поступила после рецензирования: 25.02.2024

Принята к публикации: 26.04.2024

REFERENCES

1. Ermakov V.V., Tyutikov S.F. *Geochemical ecology of animals*. Moscow, Nauka Publ., 2008. 315 p. (In Russ.)
2. Panichev A.M. *Lithophagy in the animal and human world*. Moscow, Nauka Publ., 1990. 224 p. (In Russ.)
3. Laufer B. Geophagy. Publications of the field museum of natural history. *Anthropological Series*, 1930, vol. 18, no. 2, pp. 99–198.
4. Tawa Y., Sah S.A.M., Kohshima S. Salt-lick use in Malaysian tropical rainforests reveals behavioral differences by food habit in medium and large-sized mammals. *European Journal of Wildlife Research*, 2022, vol. 68, no. 5, pp. 57–69.
5. Klaus G., Schmid B. Geophagy at natural licks and mammal ecology: a review. *Mammalia*, 1998, vol. 62, no. 4, pp. 482–497.
6. Salmanpour F., Shakoori Z., Kia M., Eshaghi R., Ghaderi M., Ghomi S., Kaveh R., Rabie K., Kiabi B.H., Farhadinia M.S. Mineral lick use by a community of large herbivores in northern Iran. *Ecology and Evolution*, 2023, vol. 13, no. 1, pp. 1–7.
7. Panichev A.M., Golokhvast K.S., Gulkov A.N., Chekryzhov I.Yu. Geophagy and geology of mineral licks (kudurs): a review of Russian publications. *Environmental Geochemistry and Health*, 2013, no. 1, pp. 133–152.
8. Stockstad D.S., Morris M.S., Lory E.C. Chemical characteristics of natural licks used by big game animals in western Montana. *Trans. N. Amer. Wild-life Conf*, 1953, vol. 18, pp. 247–257.
9. Houston D.C., Gilardi J.D., Hall A.J. Soil consumption by elephants might help to minimize the toxic effects of plant secondary compounds in forest browse. *Mammal Review*, 2001, vol. 31, no. 3–4, pp. 249–254.
10. Panichev A.M., Baranovskaya N.V., Seryodkin I.V., Chekryzhov I.Yu., Vakh E.A., Soktoev B.R., Belyanovskaya A.I., Makarevich R.A., Lutsenko T.N., Popov N.Yu., Ruslan A.V., Ostapenko D.S., Vetoshkina A.V., Aramilev V.V., Kholodov A.S., Golokhvast K.S. Landscape REE anomalies and the cause of geophagy in wild animals at kudurs (mineral salt licks) in the Sikhote-Alin (Primorsky Krai, Russia). *Environmental Geochemistry and Health*, 2022, vol. 44, no. 3, pp. 1137–1160.
11. Panichev A., Baranovskaya N., Seryodkin I., Chekryzhov I., Vakh E., Kalinkin Yu., Lutsenko T., Popov N., Ruslan A., Ostapenko D., Elovskiy E., Vetoshkina A., Patrusheva O., Makarevich R., Manakov Yu., Kholodov A., Spandidos D., Tsatsakis A., Golokhvast K. Excess of REE in plant foods as a cause of geophagy in animals in the Teletskoye Lake basin, Altai Republic, Russia. *World Academy of Sciences Journal*, 2023, vol. 5, no. 1, pp. 1–22.

12. Lazarus M., Orct T., Blanuša M., Vicković I., Šošćarić B. Toxic and essential metal concentrations in four tissues of red deer (*Cervus elaphus*) from Baranja, Croatia. *Food additives and contaminants*, 2008, vol. 25, no. 3, pp. 270–283.
13. Frøslie A., Norheim G., Rambtek J.P., Steinnes E. Levels of trace elements in liver from Norwegian moose, reindeer and red deer in relation to atmospheric deposition. *Acta Veterinaria Scandinavica*, 1984, vol. 25, no. 3, pp. 333–345.
14. Falandysz J., Szymczyk-Kobrzyńska K., Brzostowski A., Zalewski K., Zasadowski A. Concentrations of heavy metals in the tissues of red deer (*Cervus elaphus*) from the region of Warmia and Mazury, Poland. *Food additives and contaminants*, 2005, vol. 22, no. 2, pp. 141–149.
15. Wolkers H., Wensing T., Bruinderink G.W.G. Heavy metal contamination in organs of red deer (*Cervus elaphus*) and wild boar (*Sus scrofa*) and the effect on some trace elements. *Science of the total environment*, 1994, vol. 144, no. 1–3, pp. 191–199.
16. Okuskhanova E.K., Asenova B.K., Dusembaev S.T., Esimbekov Zh.C., Rebezov M.B. Macro- and microelement composition of red deer meat. *Young scientist*, 2014, no. 11, pp. 90–93. (In Russ.)
17. Pollock B. *Trace elements status of white-tailed deer (Odocoileus virginianus) and moose (Alces alces) in Nova Scotia*. Canada, Canadian Cooperative Wildlife Health Centre, Newsletters & Publications, 2005. 28 p.
18. Amici A., Danieli P.P., Russo C., Primi R., Ronchi B. Concentrations of some toxic and trace elements in wild boar (*Sus scrofa*) organs and tissues in different areas of the Province of Viterbo, Central Italy. *Italian Journal of Animal Science*, 2012, vol. 11, pp. 354–362.
19. Babicz M., Kasprzyk A. Comparative analysis of the mineral composition in the meat of wild boar and domestic pig. *Italian Journal of Animal Science*, 2019, vol. 18, no. 1, pp. 1013–1020.
20. Malmsten A., Dalin A.M., Pettersson J., Persson S. Concentrations of cadmium, lead, arsenic, and some essential metals in wild boar from Sweden. *European Journal of Wildlife Research*, 2021, vol. 2, pp. 1–8.
21. Demirbas Y., Erduran N. Concentration of selected heavy metals in brown hare (*Lepus europaeus*) and wild boar (*Sus scrofa*) from central Turkey. *Balkan Journal of Wildlife Research*, 2017, vol. 4, pp. 26–33.
22. López-Alonso M., Miranda M., Castillo C., Hernandez J., Garcia-Vaquero M., Benedito J. Toxic and essential metals in liver, kidney and muscle of pigs at slaughter in Galicia, north-west Spain. *Food Additives and Contaminants*, 2007, vol. 24, no. 9, pp. 943–954.
23. Leontopoulos S., Gougoulas N., Kantas D., Roka L. Heavy metal accumulation in animal tissues and internal organs of pigs correlated with feed habits. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 2015, vol. 21, no. 3, pp. 693–697.
24. Buba Z.M., Abbas E.A., Ahmed U. Determination of Some Heavy Metals in Kidney, Liver and Muscle of Domestic pig (*Sus scrofa domestica*) in Guyuk Metropolis, Adamawa state, Nigeria. *International Journal of Research and Scientific Innovation*, 2020, vol. 7, no. 10, pp. 250–255.
25. Oldenkamp R.E., Bryan A.B.J., Kennamer R.A., Leaphart J.C., Webster S.C., Beasley J.C. Trace elements and radiocesium in game species near contaminated sites. *The Journal of Wildlife Management*, 2017, vol. 81, no. 8, pp. 1338–1350.
26. Zeisler R., James W., Mackey E., Spatz R., Greenberg R. NAA characterization of the new bovine liver SRM. *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*, 2008, vol. 278, no. 3, pp. 783–787.
27. Gusev A.I. Polymetallic mineralization in the Altai Mountains: prospects and prognosis. *Natural resources of the Altai Mountains. Geology, geophysics, hydrogeology, geoecology, mineral and water resources*, 2007, no. 3, pp. 3–10. (In Russ.)
28. Khochenkov A.A. Balance of placer mixed fodder for sows. *Current problems of intensive development of animal husbandry*, 2010, vol. 13, no. 1, pp. 3–9. (In Russ.)

Information about the authors

Natalia V. Baranovskaya, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. nata@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3729-800X>

Alexander M. Panichev, Dr. Sc., Cand. Sc., Leading Researcher, Pacific Geographical Institute FEB RAS, 7, Radio street, Vladivostok, 690041, Russian Federation. sikhote@mail.ru

Dmitry A. Strepetov, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. das57@tpu.ru; <http://orcid.org/0000-0002-1041-4747>

Ivan V. Seryodkin, Cand. Sc., Leading Researcher, Pacific Geographical Institute FEB RAS, 7, Radio street, Vladivostok, 690041, Russian Federation. seryodkinivan@inbox.ru; <http://orcid.org/0000-0003-4054-9236>

Bulat R. Soktoev, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. bulatsoktoev@tpu.ru; <http://orcid.org/0000-0002-4102-4282>

Sergey S. Ilenok, Cand. Sc., Senior Lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. ilenokss@tpu.ru; <http://orcid.org/0000-0002-0216-4485>

Raisa A. Makarevich, Researcher, Pacific Geographical Institute FEB RAS, 7, Radio street, Vladivostok, 690041, Russian Federation. mak@tigdvo.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6787-6870>

Vlada V. Kurovskaya, Engineer, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. kurovskaya@tpu.ru

Mariya A. Rulik, Master's Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. mar15@tpu.ru

Received: 05.02.2024

Revised: 25.02.2024

Accepted: 26.04.2024

УДК 681.11.031.12
DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4630
Шифр специальности ВАК: 05.14.02

Математическая модель накопителя энергии автономной фотоэлектрической станции

С.Г. Обухов✉, Д.Ю. Давыдов

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет Россия, г. Томск

✉ serob@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. Одним из приоритетных направлений развития современной энергетики является активное использование технологий возобновляемых источников энергии, лидирующее положение среди которых по объемам ввода генерирующих мощностей и областям практического применения занимает фотоэнергетика. В последние годы фотоэлектрические станции все чаще находят применение в составе систем автономного электроснабжения, чему в немалой степени способствует значительное снижение стоимости их компонентов, обусловленное совершенствованием технологий. Автономные системы электроснабжения могут значительно различаться по мощности, условиям эксплуатации, требованиям к бесперебойности электроснабжения и многим другим факторам, что определяет высокую важность задачи выбора состава основного электрооборудования, обеспечивающего оптимальные технико-экономические показатели проектируемой энергетической системы. Для обоснованного выбора состава оборудования автономной фотоэлектростанции требуются имитационные модели всех ее основных компонентов, адекватно отображающие их рабочие характеристики в реальных условиях эксплуатации. Важным компонентом автономных фотоэлектрических станций является накопитель энергии, включающий аккумуляторную батарею и солнечный контроллер, обеспечивающий управление энергетическим балансом электростанции. Настройки солнечного контроллера во многом определяют эксплуатационные режимы фотоэлектростанции, от которых преимущественно зависит срок службы аккумуляторных батарей. С учетом того, что затраты на накопитель энергии составляют существенную долю затрат от общих финансовых вложений в проектируемую электростанцию, проблема достоверной оценки срока службы аккумуляторных батарей является весьма актуальной. **Цель:** разработка математической модели накопителя энергии для проектирования и оптимизации состава оборудования автономных фотоэлектрических станций. **Методы:** математическое и компьютерное моделирование с использованием программного комплекса MatLab/Simulink. **Результаты.** Разработана математическая модель аккумуляторной батареи, построенная на основе модифицированной модели Шеферда и кинетической модели. Модель является универсальной и может использоваться для моделирования статических и динамических характеристик аккумуляторных батарей разных типов. Для идентификации параметров модели достаточно только данных технической спецификации, предоставляемой производителем. В состав общей модели накопителя включена модель срока жизни аккумуляторной батареи, позволяющая динамически корректировать величину доступной максимальной емкости батареи в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: фотоэлектрическая станция, накопитель энергии, аккумуляторная батарея, математическая модель, модель срока жизни, состояние заряда, показатель работоспособности, оптимизация состава оборудования

Для цитирования: Обухов С.Г., Давыдов Д.Ю. Математическая модель накопителя энергии автономной фотоэлектрической станции // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 6. – С. 110–122. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4630

UDC 681.11.031.12
DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4630

Mathematical model of a battery energy storage for a standalone solar photovoltaic plant

S.G. Obukhov✉, D.Yu. Davydov

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉ serob@tpu.ru

Abstract. Relevance. One of the priority areas for modern energy development is the active use of renewable energy technologies, the leading position among which in terms of the volume of commissioned generating capacity and areas of practical application is occupied by photovoltaics. In recent years, solar photovoltaic plants are increasingly being used as part of autonomous power supply systems, which is largely facilitated by a significant reduction in the cost of their components due to improved technology. Autonomous power supply systems can vary significantly in power, operating conditions, requirements for uninterrupted power supply and many other factors. This determines the high importance of the task of choosing the composition of the main electrical equipment that ensures optimal technical and economic indicators of the designed energy system. To make a reasonable choice of the equipment of an autonomous photovoltaic power plant, simulation models of all its main components are required that adequately reflect their performance characteristics under real operating conditions. An important component of autonomous photovoltaic plants is the energy storage device, which includes a battery and a solar controller that manages the energy balance of the power plant. The settings of the solar controller largely determine the operating modes of the photovoltaic power plant, on which the service life of the batteries primarily depends. Taking into account the fact that the costs of energy storage constitute a significant share of the costs of the total financial investments in the designed power plant, the problem of reliably assessing the service life of batteries is very relevant. **Aim.** Development of a mathematical model of energy storage system for the design and optimization of the equipment of autonomous photovoltaic plants. **Methods.** Mathematical and numerical modeling using the MatLab/Simulink software package. **Results.** A mathematical model of a battery has been developed, based on the modified Shepherd model and the kinetic model of a rechargeable battery. The model is universal and can be used to simulate the static and dynamic characteristics of different types of batteries. To identify model parameters, only the technical specification data provided by the manufacturer is sufficient. The complex model includes a battery life model, which allows you to dynamically adjust the available maximum battery capacity during operation.

Keywords: photovoltaic plant, energy storage, storage battery, mathematical model, battery lifespan model, state of charge, performance indicator, equipment optimization

For citation: Obukhov S.G., Davydov D.Yu. Mathematical model of a battery energy storage for a standalone solar photovoltaic plant. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 6, pp. 110–122. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4630

Введение

Среди всех технологий производства электрической энергии безусловным лидером по объему ввода новых генерирующих мощностей за последнее десятилетие является фотоэнергетика. По данным международного агентства по возобновляемым источникам энергии (International Renewable Energy Agency – IRENA) в период с 2010 по 2022 гг. общая установленная мощность фотоэлектрических станций (ФЭС) выросла в 26 раз, превысив в 2022 г. знаковую отметку в 1000 ГВт [1]. Значительную долю рынка фотоэнергетики составляют автономные системы электроснабжения, область практического применения которых в последние годы стремительно расширяется. Автономные ФЭС используются в качестве источников питания сотовых станций, уличного освещения, телекоммуникационных систем, фермерских хозяйств, гостиниц и многих других объектов, удаленных от сетей централизованного электроснабжения. Себестоимость генерируемой электроэнергии данных объектов на базе традиционных источников является чрезвычайно высокой и варьируется в диапазоне от 35 до 270 р. за кВт·ч, в зависимости от региона и объекта электроснабжения [2]. Повсеместная доступность солнечной энергии, большой срок службы основного электрооборудования, простота и минимальные затраты на техническое обслуживание, масштабируемость на любую требуемую мощность способствуют бурному росту рынка и

областей практического применения автономных энергетических систем на основе ФЭС. Весомым стимулом развития фотоэнергетики является постоянное снижение стоимости компонентов фотоэлектрических станций, обусловленное совершенствованием технологий их производства. Средняя стоимость электроэнергии *LCOE* (Levelized cost of energy) автономных ФЭС в период с 2010 по 2022 гг. снизилась на 89 % с 0,445 до 0,049 доллара США за кВт·ч, а средневзвешенная общая установленная стоимость проектов автономных ФЭС, введенных в эксплуатацию в 2022 г., составила 876 долларов США за кВт, что на 83 % ниже, чем в 2010 г. [1, 3].

Технико-экономическую эффективность ФЭС во многом определяют состав и типоразмер основного электрооборудования, выбор которого производится на этапе проектирования. Необходимость и высокая сложность решения данной задачи обусловлены тем, что эксплуатационные режимы работы электростанции зависят от множества внешних факторов (инсоляция, погодные условия, характер электропотребления), имеющих стохастическую природу и изменяющихся в широком диапазоне, как в течение суток, так и по сезонам года. Множество возможных вариантов построения ФЭС определяют необходимость решения оптимизационной задачи выбора оборудования по результатам сравнительного анализа ее эксплуатационных характеристик на длительном временном интервале –

не менее одного года [4–7]. Соответственно, для обоснованного выбора состава оборудования ФЭС требуются имитационные модели всех ее основных компонентов, адекватно отображающие их рабочие характеристики в реальных условиях эксплуатации.

Важным компонентом автономных систем электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) является накопитель энергии, с помощью которого осуществляется управление энергетическим балансом в изолированной энергетической системе и обеспечивается бесперебойное электроснабжение потребителей. В большинстве практических случаев в качестве накопителей энергии автономных энергосистем используются аккумуляторные батареи (АКБ), которые наилучшим образом соответствуют их требованиям по объемам и времени хранения энергии [8]. Затраты на систему накопления энергии являются достаточно высокими и составляют от 25 до 60 % от общих финансовых вложений в электростанцию [9, 10], что определяет высокую важность задачи определения их оптимального размера и срока службы. Несмотря на множество известных математических моделей АКБ, успешно применяемых во многих областях научных исследований, большинство из них малоприменимы для решения задачи выбора оптимального состава оборудования автономных ФЭС, что обусловлено рядом специфических требований к их проектированию. Применительно к рассматриваемой задаче, математическая модель накопителя энергии должна обеспечивать имитационное моделирование его рабочих режимов с учетом воздействия стохастических внешних факторов на длительных временных интервалах, а значит, иметь высокое быстродействие. Ввиду большого разнообразия автономных систем электроснабжения по типоразмеру, мощности и целевому назначению в них применяются накопители энергии на основе АКБ разных типов, соответственно, используемая модель должна поддерживать моделирование характеристик АКБ на основе различных электрохимических систем. Одним из самых сложных в практической реализации требований к модели накопителя является достоверное прогнозирование срока службы АКБ, который определяется совокупным воздействием на нее стресс-факторов во время эксплуатации [10, 11].

Целью настоящего исследования является разработка математической модели накопителя энергии для проектирования и оптимизации состава оборудования автономных ФЭС с учетом обозначенных выше требований.

Методы исследования

Для достижения поставленной цели исследования разрабатываемая модель АКБ должна адекват-

но отображать изменение в процессе эксплуатации двух ее основных параметров: степени заряда SOC (State of Charge) и напряжения на ее клеммах V_{batt} в зависимости от протекающего через нее тока I_{batt} , значения которого определяются текущим энергетическим балансом и настройками контроллеров системы управления. Математические модели АКБ данного типа формализуются как модели напряжения, для построения которых используется множество разнообразных приемов и методов. Проведенный обзор и анализ научных работ по теме исследования показал, что все математические модели напряжения АКБ можно условно поделить на две большие группы: физические и эмпирические [12, 13].

Физические модели АКБ основаны на уравнениях, описывающих химические реакции внутри элементов батареи. Они позволяют с высокой точностью моделировать эксплуатационные характеристики АКБ, однако для их построения необходимо определение большого числа параметров, описывающих электрохимические процессы, что приводит к существенному усложнению моделей. Физические модели используются преимущественно для решения задач, связанных с разработкой новых и совершенствованием существующих материалов и технологий, используемых при производстве АКБ, а также для разработки интеллектуальных систем контроля АКБ.

Эмпирические модели строятся по принципу «черного ящика», входные и выходные переменные которого связаны между собой определенными соотношениями, установленными по результатам экспериментов. Достоинством эмпирических моделей АКБ является высокое быстродействие, которое достигается не только за счет упрощения исходных уравнений, но и из-за имеющейся возможности исключения из их математического описания части характеристик, которые несущественны для решаемой задачи. Для идентификации параметров эмпирических моделей используют или каталожные данные АКБ, предоставляемые их производителями, или результаты специализированных лабораторных испытаний. Применение первого подхода позволяет создавать универсальные модели АКБ, которые можно использовать для моделирования АКБ широкой номенклатуры. Второй подход применяют в тех случаях, когда необходимо смоделировать определенные характеристики АКБ с высокой точностью, однако для его практической реализации требуются детализированные наборы экспериментальных данных большого объема, для обработки которых в последние годы все чаще используют модели АКБ, основанные на методах машинного обучения [14, 15]. Необходимость проведения специализированных, длительных и доро-

гостоящих испытаний АКБ существенно ограничивают области практического применения математических моделей данного типа.

В результате ранее проведенных исследований была разработана комбинированная модель АКБ, представленная в [16], построенная на основе модифицированного уравнения Шеферда [17] и кинетической модели АКБ [18]. В данной статье представлены результаты исследований по разработке математической модели срока жизни АКБ, являющейся неотъемлемой и важной компонентой общей модели накопителя энергии автономной ФЭС.

Необходимость достоверного прогнозирования эксплуатационного ресурса АКБ определяется тем, что в качестве основного критерия оптимизационной задачи по выбору состава оборудования ФЭС чаще всего используют стоимость жизненного цикла *LCC* (Life cycle cost) или *LCOE*, значения которых определяются на весь срок службы проектируемой электростанции [5–7]. И если для большинства других компонентов срок службы не зависит от целевого назначения ФЭС и определяется по данным их технической спецификации, то срок службы АКБ в значительной степени зависит от их эксплуатационных режимов. С учетом того, что эксплуатационные режимы АКБ проектируемой ФЭС зависят от многих факторов (географического расположения, режимов электропотребления, используемого типа оборудования) и могут кардинально различаться, достоверный прогноз срока службы АКБ является необходимым условием успешного решения оптимизационной задачи.

Основными причинами старения АКБ являются физико-химические процессы, приводящие к расщеплению электролита, потере воды, сульфатированию и коррозии электродов, потере активной массы. Интенсивность этих процессов, или скорость старения, зависит от типа АКБ и условий эксплуатации. Механизмы старения и основные факторы деградации характеристик АКБ, а также обзор современных методов прогнозирования их срока службы подробно описаны в работах [19–21].

Определение достоверных количественных зависимостей между стресс-факторами, механизмами деградации и сроком службы АКБ является на сегодняшний день актуальной научно-технической проблемой, решению которой посвящено большое количество научных исследований [10, 11, 22–24]. Высокая сложность данной задачи обусловлена тем, что характер стресс-факторов имеет стохастическую природу, а их влияние на процессы старения АКБ во многих случаях является взаимозависимым.

Проведенный анализ публикаций по теме исследования показал, что все математические модели оценки срока жизни АКБ можно разделить на две большие категории – модели, основанные на

производительности, и модели подсчета циклов. В моделях, основанных на производительности, значения срока жизни АКБ моделируются на основе определенных параметров (заряд, напряжение, внутреннее сопротивление и др.), для которых установлены некоторые предельные значения, превышение которых означает конец срока службы АКБ. В моделях подсчета циклов состояние АКБ определяется по соотношению между числом эквивалентных циклов заряда/разряда батареи за время ее функционирования и числом циклов, гарантированных производителем при определенных условиях эксплуатации. Используемые модели могут строиться на основе как физических, так и эмпирических уравнений, могут быть независимы друг от друга или интегрированы в обобщенную модель АКБ. Важным преимуществом моделей подсчета циклов в сравнении с моделями производительности является возможность их построения только по данным технической спецификации, что определяет их высокую универсальность. На модели подсчета циклов и построена предлагаемая модель срока жизни АКБ, описание которой приведено ниже.

В качестве основного инструмента при проведении настоящих исследований использовался программный комплекс MatLab/Simulink (версия 2020b). Для верификации разработанной математической модели использовались результаты ресурсных испытаний АКБ, приведенные в работах [25, 26].

Модель срока жизни аккумуляторной батареи

Ключевыми показателями АКБ, характеризующими ее производительность, являются состояние заряда *SOC* и состояние работоспособности *SOH* (State of Health). Состояние, или степень, заряда АКБ определяется как отношение ее оставшейся емкости Q к максимально доступной Q_{\max} в текущий момент времени:

$$SOC = \frac{Q}{Q_{\max}}.$$

Показатель работоспособности определяется как отношение текущей максимальной емкости АКБ к ее первоначальному значению $Q_{\max 0}$, соответствующему новой, полностью заряженной батарее:

$$SOH = \frac{Q_{\max}}{Q_{\max 0}}.$$

Величина *SOH* отображает постепенное снижение доступной максимальной емкости АКБ, обусловленной неизбежной деградацией ее характеристик в процессе эксплуатации. Международные и отечественные стандарты (ГОСТ Р МЭК 60896-11-2015) определяют окончание срока службы АКБ моментом времени, при котором их доступная ем-

кость снижается ниже 80 % от номинального значения $SOH < 0,8$ (для новой АКБ $SOH = 1$).

Результаты многочисленных исследований показали, что основными стресс-факторами, влияющими на срок жизни АКБ, являются температура T , глубина разряда DOD (Depth of Discharge) и число рабочих циклов N_{cycle} . Большинство производителей АКБ в паспортах технической спецификации предоставляют характеристики их срока службы, выраженные в числе рабочих циклов, в зависимости от глубины разряда $N_{cycle} = f(DOD)$ и температуры $N_{cycle} = f(T)$, например, [27].

Проведенный анализ технических характеристик АКБ разных типов показал, что зависимость $N_{cycle} = f(T)$ в рабочем диапазоне температур эксплуатации АКБ от 20 до 45 °С близка к линейной, а зависимость $N_{cycle} = f(DOD)$ с хорошей точностью может быть аппроксимирована полиномом 4-го порядка [28]. Для построения универсальной модели срока жизни АКБ целесообразно нормализовать число рабочих циклов:

$$N_{cycle_n} = \frac{N_{cycle}}{N_{cycle_rat}},$$

где N_{cycle} – число рабочих циклов по графикам технической спецификации; N_{cycle_rat} – номинальное число рабочих циклов при заданной глубине разряда и стандартной температуре 20 °С.

Тогда величина нормализованных рабочих циклов при стандартной температуре АКБ в зависимости от DOD будет определяться уравнением:

$$N_{cycle_n} = k_4 DOD^4 + k_3 DOD^3 + k_2 DOD^2 + k_1 DOD + k_0,$$

где k_4, k_3, k_2, k_1, k_0 – коэффициенты уравнения регрессии.

В качестве примера на рис. 1 приведены результаты аппроксимации технических характеристик свинцово-кислотных АКБ с трубчатыми электродами и намазными пластинами серии OPzS, широ-

ко применяемых в качестве накопителей энергии в автономных системах электроснабжения на основе ВИЭ. Маркерами на представленных графиках обозначены данные из технической спецификации, а линиями – результаты аппроксимации. Согласно технической спецификации максимальное число рабочих циклов АКБ данного типа при глубине разряда $DOD = 80\%$ и стандартной температуре 20 °С составляет $N_{cycle_rat} = 1600$.

Для определения эквивалентного числа рабочих циклов АКБ при произвольных значениях DOD и T следует использовать следующее уравнение:

$$N_{cycle} = \left[k_4 k_T DOD^4 + k_3 k_T DOD^3 + k_2 k_T DOD^2 + k_1 k_T DOD + k_0 k_T \right] N_{cycle_rat}, \quad (1)$$

где k_T – значение температурного коэффициента, определяемого по результатам аппроксимации зависимости $N_{cycle_n} = f(T)$ (рис. 1).

Расчетные зависимости эквивалентного числа рабочих циклов АКБ серии OPzS от глубины разряда для разных значений температуры эксплуатации, полученные по уравнению (1), показаны на рис. 2.

Важной задачей построения адекватной модели срока жизни АКБ является решение проблемы определения числа рабочих циклов и величины DOD в режимах частичного заряда/разряда АКБ, характерных для энергетических систем на основе ВИЭ. Одним из эффективных способов решения данной проблемы является идентификация события начала (окончания) зарядно-разрядного микроцикла АКБ по моментам времени пересечения нуля током АКБ I_{batt} [28, 29]. Предлагаемый метод обеспечивает динамическую коррекцию величины доступной максимальной емкости Q_{max} АКБ, что соответствует реальным условиям их эксплуатации. Кроме того, он не требователен к вычислительным ресурсам и может быть достаточно просто реализован в современных контроллерах заряда/разряда АКБ.

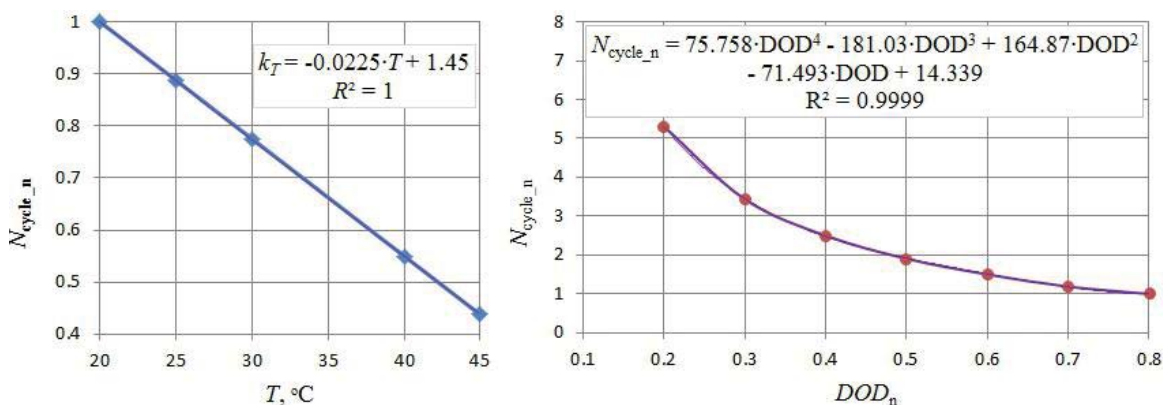


Рис. 1. Результаты аппроксимации технических характеристик АКБ серии OPzS

Fig. 1. Battery characteristics approximation results (OPzS series)

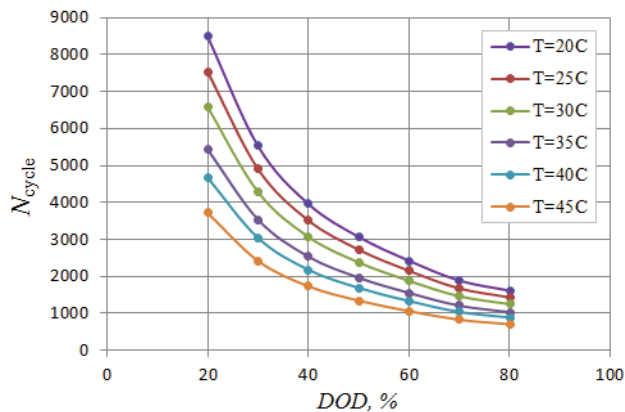


Рис. 2. Расчетные зависимости эквивалентного числа рабочих циклов АКБ серии OPzS
Fig. 2. Calculated dependencies of equivalent number of operation cycles (OPzS series)

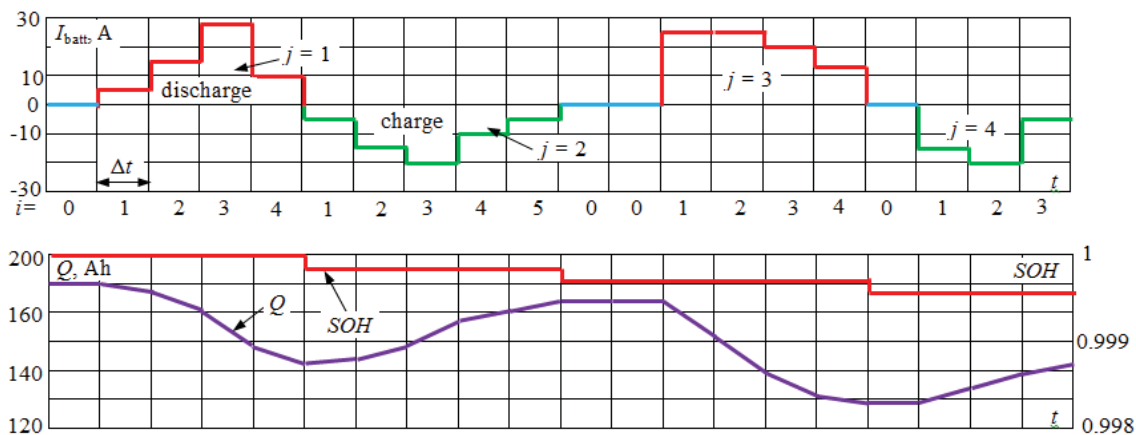


Рис. 3. Иллюстративная форма изменения параметров АКБ во время эксплуатации
Fig. 3. Time diagrams of changes in battery parameters during operation

Предлагаемую методологию определения числа эквивалентных рабочих циклов АКБ поясняет рис. 3, на котором схематично представлены временные зависимости изменения некоторых параметров АКБ во время эксплуатации.

На каждом временном шаге моделирования Δt по текущим значениям тока $I_{\text{batt}}(t)$ определяются уровень заряда $SOC(t)$ и глубина разряда $DOD(t)$ батареи:

$$SOC(t) = \frac{Q(t-1) - I_{\text{batt}}(t)\Delta t}{Q_{\text{max}}};$$

$$DOD(t) = 1 - SOC(t).$$

В качестве индикатора зарядно-разрядных циклов АКБ используется целочисленная логическая переменная i , величина которой на каждом шаге расчета увеличивается на 1, если ток АКБ $I_{\text{batt}}(t)$ не изменяет знак, и обнуляется при пересечении током значения нуля. Состояния АКБ при $I_{\text{batt}}=0$ при расчете микроциклов игнорируются, и для них принимается $i=0$. Средние за микроцикл значения глубины разряда \overline{DOD} и температуры \overline{T} АКБ определяются по уравнениям:

$$\overline{DOD} = \frac{\sum_{i=1}^N DOD_i}{N}; \quad \overline{T} = \frac{\sum_{i=1}^N T_i}{N},$$

где N – число расчетных значений переменной в микроцикле.

Подставляя полученные значения \overline{DOD} и \overline{T} в уравнение (1), получаем эквивалентное число рабочих циклов $N_{\text{cycle } j}$, которое обеспечит АКБ при данных условиях эксплуатации до полного исчерпания ее ресурса. Соответственно, единовременный ущерб, нанесенный АКБ данным j -ым микроциклом, составит $D_j = 1/N_{\text{cycle } j}$, а величину совокупного ущерба D АКБ можно определить с использованием правила Пальмгрена–Майнера по уравнению:

$$D = \sum_{j=1}^K D_j,$$

где K – общее количество микроциклов с момента начала эксплуатации АКБ.

Предлагаемую методологию определения величины единовременного ущерба, нанесенного АКБ за микроцикл, поясняет рис. 2, из которого видно,

что при $\vec{T}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и величине $\overline{DOD}=80\%$ эквивалентное число рабочих циклов будет равно $N_{\text{cycle}_j}=1600$, а при $\overline{DOD}=50\%$ – $N_{\text{cycle}_j}=3000$. Соответственно, величина единовременного ущерба в первом случае составит $D_j=1/1600$, а во втором – $D_j=1/3000$.

Окончание срока жизни АКБ соответствует моменту времени, когда величина совокупного ущерба достигнет значения $D=1$. Для количественной оценки текущего показателя работоспособности АКБ SOH величину ущерба необходимо масштабировать по условию, что окончанию срока жизни АКБ соответствует величина $SOH=0,8$. Рассчитанное значение SOH позволяет динамически корректировать величину текущей максимальной емкости АКБ после каждого микроцикла:

$$Q_{\max} = Q_{\max_0} \cdot SOH.$$

Модель срока жизни АКБ реализована в виде отдельного функционального блока, что позволяет легко интегрировать ее в состав общей модели накопителя энергии автономной ФЭС.

Модель накопителя энергии автономной фотоэлектрической станции

Полная модель накопителя энергии построена по модульному принципу на основе четырех функциональных блоков (рис. 4), что позволяет легко ее модифицировать под решаемые задачи.

Основным функциональным назначением накопителя энергии автономной ФЭС является управление энергетическим балансом в изолированной энергетической системе, который складывается из мощности, генерируемой солнечными батареями –

P_{PV} , и гарантированным источником питания (дизель- или бензогенератор) – P_{GEN} , а также мощностью, потребляемой электрическими нагрузками – P_{load} . Текущее состояние энергетического баланса определяет величину располагаемой электрической мощности P_{set} , которая используется в периоды избытка для заряда АКБ, а в периоды дефицита для питания потребителей от АКБ:

$$P_{set} = (P_{PV} + P_{GEN} - P_{load}) \eta_{\text{char}} - \text{в режиме заряда};$$

$$P_{set} = (P_{PV} + P_{GEN} - P_{load}) \frac{1}{\eta_{\text{dischar}}} - \text{в режиме разряда},$$

где η_{char} , η_{dischar} – эффективность преобразования энергии АКБ в режимах заряда и разряда, соответственно.

При моделировании величина тока, протекающего через АКБ I_{batt} в пределах одного расчетного интервала, принимается неизменной и определяется по уравнению:

$$I_{\text{batt}} = \frac{P_{set}}{V_{\text{batt}}}.$$

Важным компонентом автономной ФЭС является контроллер солнечных батарей, который на практике может быть выполнен в виде отдельного устройства или быть встроенным в гибридный солнечный инвертор. Современные солнечные контроллеры реализуют множество полезных функций, в частности: отбор максимальной мощности с солнечных батарей, защиту АКБ от перезаряда и глубокого разряда, подключение/отключение генератора по расписанию или по уровню заряда АКБ, ограничение максимальных токов заряда-разряда АКБ и др.

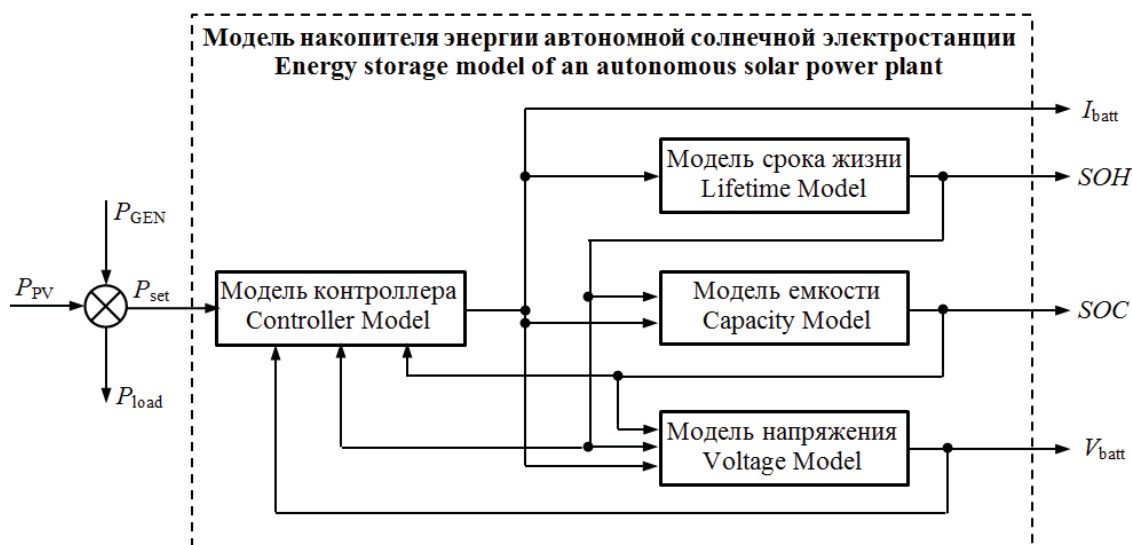


Рис. 4. Упрощенная функциональная схема модели накопителя энергии автономной ФЭС
 Fig. 4. Simplified flowchart of autonomous PV-station energy storage functional model

Настройка всех этих функций производится на этапе конфигурации ФЭС с помощью соответствующих уставок контроллера, и эти настройки во многом определяют эксплуатационные режимы не только АКБ, но и всей электростанции. Соответственно, важным модулем разработанного программного приложения является модель контроллера, с помощью которой обеспечивается настройка параметров конфигурации ФЭС, необходимых для последующего анализа. В настоящем исследовании использовались типовые уставки, характерные для большинства промышленных контроллеров ФЭС: максимальные токи заряда и разряда АКБ, максимальное напряжение заряда и минимальное напряжение разряда АКБ, максимальный и минимальный уровень заряда. На практике данные уставки определяют соответствующие ограничения, при достижении которых происходит смена режима работы ФЭС, например, при снижении SOC до минимально допустимого значения вводится в работу генератор.

Отметим, что разработанные модели контроллера и накопителя энергии позволяют выполнить оценку и более сложных режимов применения ФЭС, например, провести анализ эффективности работы ФЭС параллельно с сетью с продажей излишков электроэнергии в периоды ее избытка в дневное время суток.

Модуль модели напряжения построен на основе модифицированной модели Шеферда [17], описываемой уравнением:

$$V_{batt} = E - Ri - K \frac{Q_{max}}{Q_{max} - \int_0^t idt} \int_0^t idt - R_{pol} i^* + \text{Exp}, \quad (2)$$

где V_{batt} – напряжение на клеммах АКБ; i – ток через аккумулятор; i^* – фильтрованный ток; E – ЭДС аккумулятора; R – внутреннее сопротивление АКБ; Q_{max} – полная (максимальная) емкость АКБ; R_{pol} – сопротивление поляризации; Exp – напряжение экспоненциальной зоны; K – постоянная поляризации.

Данная модель является универсальной и может быть использована для моделирования АКБ разных типов, однако для этого необходимо использовать соответствующие формулы для определения двух последних слагаемых в уравнении (2). Например, для свинцово-кислотных АКБ применяются следующие уравнения:

$$R_{pol} = \begin{cases} K \frac{Q_{max}}{Q_{max} - \int_0^t idt} & \text{при } i > 0 \text{ (режим разряда);} \\ K \frac{Q_{max}}{\int_0^t idt + 0.1 \cdot Q_{max}} & \text{при } i < 0 \text{ (режим заряда);} \end{cases}$$

$$\text{Exp} = \begin{cases} A \exp(-Bit) & \text{при } i > 0 \text{ (режим разряда);} \\ A[1 - \exp(-B|i|t)] & \text{при } i < 0 \text{ (режим заряда),} \end{cases}$$

где A – амплитуда экспоненциальной зоны напряжения; B – обратная постоянная времени экспоненциальной зоны.

Для построения модели напряжения необходимо идентифицировать пять эмпирических параметров (R , E , K , A , B), для определения значений которых достаточно только данных технической спецификации рассматриваемой АКБ.

Модуль модели емкости построен на основе кинетической модели ($KiBaM$) [18], обеспечивающей учет физических ограничений на доступную емкость АКБ во время эксплуатации.

Концепция модели $KiBaM$ заключается в представлении АКБ в виде двух взаимосвязанных резервуаров, один из которых содержит доступный для непосредственного использования заряд q_1 , а второй – связанный заряд q_2 . Для вычисления значений этих зарядов на каждом временном шаге моделирования Δt используются следующие уравнения:

$$q_1 = q_{1.0} \cdot e^{-k\Delta t} + \frac{(q_0 k c - i)(1 - e^{-k\Delta t})}{k} - \frac{ic(k\Delta t - 1 + e^{-k\Delta t})}{k},$$

$$q_2 = q_{2.0} e^{-k\Delta t} + q_0(1 - c)(1 - e^{-k\Delta t}) - \frac{i(1 - c)(k\Delta t - 1 + e^{-k\Delta t})}{k},$$

где $q_{1.0}$ и $q_{2.0}$ – количество заряда в доступном и связанном резервуарах, соответственно, при $t=0$, и значит, $q_0 = q_{1.0} + q_{2.0}$; k – константа скорости; c – коэффициент емкости.

Для построения модели емкости необходимо идентифицировать три параметра: максимальную емкость АКБ Q_{max} (А·ч), k и c . Для определения параметров модели $KiBaM$ также достаточно только данных технической спецификации на конкретную модель АКБ.

Степень заряда АКБ рассчитывается по выражению:

$$SOC(t) = SOC(t-1) + \frac{1}{Q_{max}} \left[\int_0^t idt + q_{buff} \right],$$

где q_{buff} – буферный заряд АКБ, который отображает уменьшение доступной емкости в режимах разряда большими токами, а также ограничения на принимаемую зарядную мощность при высоком уровне остаточного заряда.

Для определения численного значения q_{buff} используются следующие уравнения:

$$q_{\text{buff}} = \begin{cases} q_1 & \text{при } q_1 < 0; \\ 0 & \text{при } 0 < q_1 < q_{1\text{max}}; \\ q_1 - q_{1\text{max}} & \text{при } q_1 > q_{1\text{max}}. \end{cases}$$

Подробное описание моделей напряжения и емкости приведено в работе [16].

Верификация математической модели накопителя энергии автономной ФЭС

Верификация разработанной модели накопителя энергии проводилась путем сравнения ее модельных статических и динамических зарядно-разрядных характеристик с характеристиками, полученными из данных технической спецификации АКБ разных типов и опубликованными результатами их ресурсных испытаний. В качестве примера в данной работе приводятся результаты верификации математической модели свинцово-кислотного аккумулятора панцирного типа с трубчатыми электродами и жидким электролитом OPzS 2V200Ah [30]. В таблице приведены идентифицированные по паспортным данным параметры математических моделей емкости и напряжения, которые использовались при проведении вычислительных экспериментов в разработанной модели MatLab/Simulink.

Таблица. Параметры математических моделей аккумуляторной батареи OPzS 2V200Ah

Table. Parameters of OPzS 2V200Ah electrochemical battery model

Наименование параметра Parameter	Значение параметра Value
Модель напряжения/Voltage model	
ЭДС аккумулятора/Battery EMF, E (V)	2,0602
Внутреннее сопротивление Internal resistance, R (Om)	0,0017
Постоянная поляризации Polarization constant, K (V/Ah)	0,000282
Амплитуда экспоненциальной зоны напряжения/Exponential voltage amplitude, A (V)	0,0476
Обратная постоянная времени экспоненциальной зоны Inverse time constant of battery dynamics exponential zone, B (1/Ah)	6,0
Модель емкости/Capacity model	
Максимальная емкость аккумулятора Maximum capacity, Q (Ah)	238,27
Константа скорости/Rate constant, k (A)	1,80
Коэффициент емкости/Capacity factor, c	0,23

На рис. 5 представлены результаты моделирования статических разрядных характеристик АКБ OPzS 2V200Ah при разных значениях разрядного тока, которые выражены в долях от величины номинальной емкости C для 10-ти часового режима разряда. Маркерами на рис. 5 показаны экспериментальные точки разрядных кривых, а линиями – результаты моделирования.

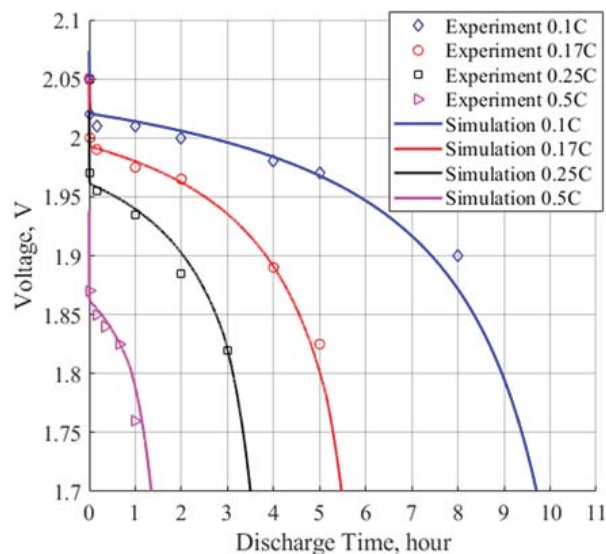


Рис. 5. Разрядные характеристики аккумулятора OPzS 2V200Ah

Fig. 5. Battery discharge characteristics (OPzS 2V200Ah)

Для верификации динамических характеристик разработанной модели и оценки адекватности отображения показателя работоспособности АКБ во время эксплуатации использовались результаты ресурсных испытаний АКБ серии OPzS, опубликованные в работах [25, 26]. Для проведения ресурсных испытаний авторы статьи [25] разработали специализированный профиль заряда-разряда АКБ общей продолжительностью в 16 часов, типичный для энергетических систем на основе ВИЭ, который характеризуется изменением в широком диапазоне зарядных (с максимальным значением $I_{\text{batt}}=0,42$ C) и разрядных (с максимальным значением $I_{\text{batt}}=0,2$ C) токов батареи. Ресурсные испытания АКБ проводились в следующей последовательности. Полностью заряженная АКБ разряжается постоянным током $I_{\text{batt}}=0,1$ C в течение одного часа, после чего она переключается на специализированный нагрузочный тест, который представляет собой последовательное выполнение 50-ти профилей ВИЭ. После окончания теста производится замер остаточной емкости и полный заряд АКБ, после чего описанная выше процедура повторяется. Данная методика ресурсных испытаний была реализована в вычислительных экспериментах на разработанной модели накопителя энергии автономной ФЭС.

На рис. 6 представлены результаты моделирования режимов АКБ OPzS 2V200Ah на одном временном профиле ВИЭ.

Полученные результаты моделирования показывают, что предлагаемая модель обеспечивает адекватное отображение основных параметров АКБ в процессе эксплуатации.

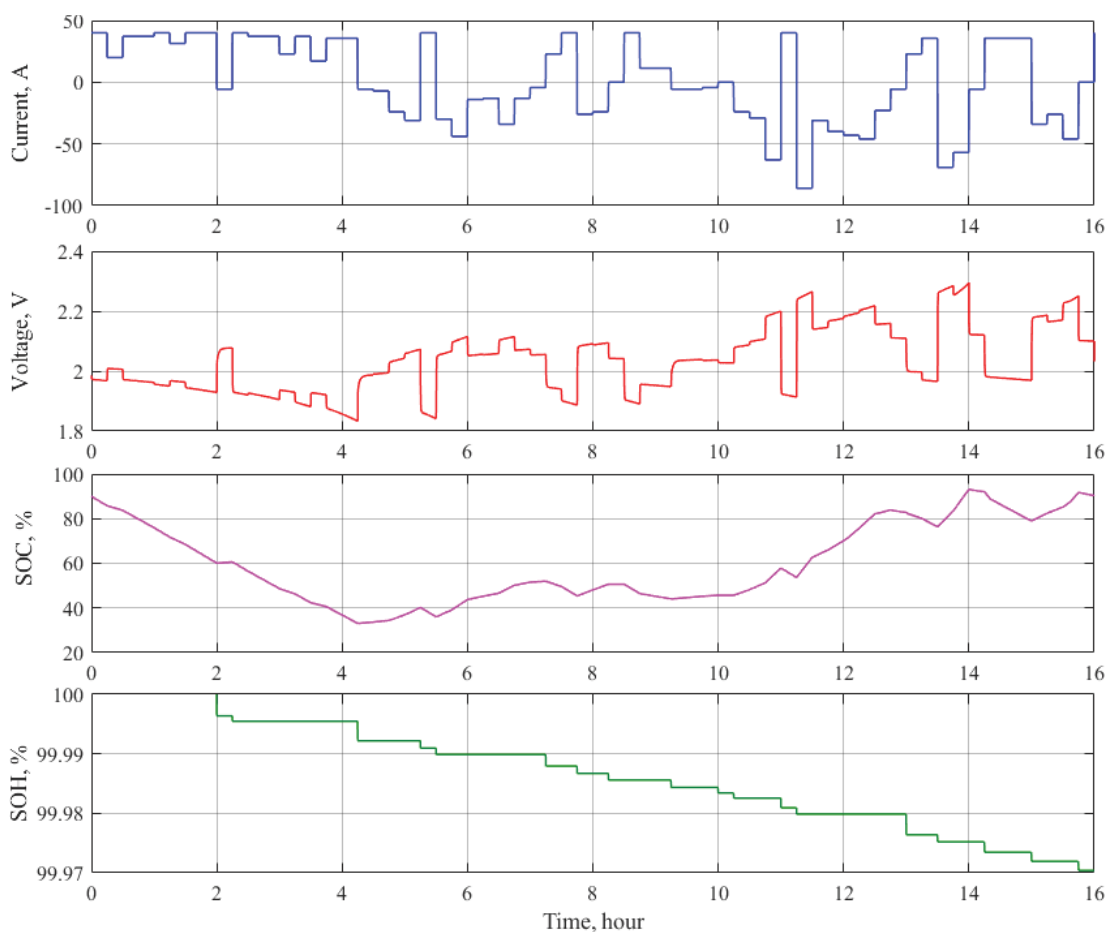


Рис. 6. Результаты моделирования режимов батареи OPzS 2V200Ah

Fig. 6. Results of modeling battery operating mode parameters (OPzS 2V200Ah)

Расчетный срок службы АКБ OPzS 2V200Ah, полученный по результатам моделирования, составил 13,4 тестов, каждый из которых включает 50 последовательных 16-ти часовых профилей ВИЭ, или 446 суток эксплуатации. При проведении ресурсных испытаний АКБ данного типа при аналогичных условиях батарея исчерпала свой ресурс за 420 дней [26], соответственно, ошибка моделирования составила 6,2 %.

Способность предлагаемой модели адекватно отображать динамические характеристики АКБ подтверждают результаты ее апробации, выполненные на свинцово-кислотных, никель-кадмиевых и литий-железо-фосфатных АКБ. Проведённая серия вычислительных экспериментов показала, что величина погрешности между моделируемым и реальным напряжением АКБ находится в пределах не выше ± 5 % в диапазоне изменения SOC от 100 до 20 %, как в режимах заряда, так и в режимах разряда.

Заключение

В результате проведенных исследований разработана математическая модель накопителя энергии на основе аккумуляторных батарей, адекватно отображающая изменение их основных параметров

в процессе эксплуатации на длительных интервалах времени. Модель является универсальной и применима для аккумуляторных батарей разного типа, идентификация параметров модели производится по данным технической спецификации производителя. Модель построена по модульному принципу, что позволяет достаточно просто ее модифицировать под решаемые задачи исследований. Новизной предложенной модели является оригинальная методика определения срока жизни батареи путем подсчета числа прошедших микроциклов заряда-разряда и их последующее эквивалентирование по средней глубине разряда и температуре. Проведенная апробация модели на аккумуляторах разных типов показала, что предлагаемая модель обеспечивает отображение параметров аккумуляторной батареи и определение ее срока службы с погрешностью не выше 7 %.

Предложенная модель может найти применение в организациях, занимающихся проектированием автономных фотоэлектрических станций, а также быть интересна пользователям, изучающим возможность использования подобных энергетических систем в личном хозяйстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Renewable power generation costs in 2022 // IRENA. – August 2023. – 208 p. URL: www.irena.org (дата обращения 15.03.2024).
2. Бердников Р., Холкин Д., Чаусов И. Оптимизация систем энергоснабжения удаленных и изолированных территорий за счет управления энергетической гибкостью // Энергетическая политика. – 2023. – № 1 (179). – С. 94–105.
3. Global LCOEs of decentralized off-grid renewable energy systems / J.M. Weinand, M. Hoffmann, J. Göpfert, T. Terlouw, J. Schönau, P. Kuckertz, R. McKenna, L. Kotzur, J. Linßen, D. Stolten // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2023. – Vol. 183. – Art. no. 113478. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113478.
4. Ma J., Yuan X. Techno-economic optimization of hybrid solar system with energy storage for increasing the energy independence in green buildings // Journal of Energy Storage. – 2023. – Vol. 61. – Art. no. 106642. DOI: 10.1016/j.est.2023.106642.
5. Обухов С.Г., Ибрагим А. Оптимизация состава оборудования гибридных энергетических систем с возобновляемыми источниками энергии // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2020. – Т. 20. – № 2. – С. 64–76. DOI: 10.14529/power200206.
6. Comparison of economic performance of lead-acid and li-ion batteries in standalone photovoltaic energy systems / J. Carroquino, C. Escriche-Martínez, L. Valiño, R. Dufo-López // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11 (8). – Art. no. 3587. DOI: 10.3390/app11083587.
7. Review on photovoltaic with battery energy storage system for power supply to buildings: challenges and opportunities / B. Li, Z. Liu, Y. Wu, P. Wang, R. Liu, L. Zhang // Journal of Energy Storage. – 2023. – Vol. 61. – Art. no. 106763. DOI: 10.1016/j.est.2023.106763.
8. Обухов С.Г., Плотноков И.А., Масолов В.Г. Анализ режимов работы накопителей энергии в автономных гибридных электростанциях с возобновляемыми источниками энергии // Альтернативная энергетика и экология (ISJAE). – 2018. – № 13–15. – С. 55–67. DOI: 10.15518/isjaee.2018.13-15.055-067.
9. A simple methodology for estimating battery lifetimes in Solar Home System design / N. Narayan, T. Papakosta, V. Vega-Garita, J. Popovic-Gerber, P. Bauer, M. Zeman // IEEE AFRICON. – Cape Town, South Africa, 2017. – P. 1195–1201. DOI: 10.1109/AFRCON.2017.8095652.
10. Obukhov S.G., Plotnikov I.A., Masolov V.G. Service life tests for storage batteries used in islanded power systems with renewable energy sources // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2021. – Т. 25. – № 4. – P. 463–477. DOI: 10.21285/1814-3520-2021-4-463-477.
11. Карамов Д.Н. Интеграция процесса категоризации электрохимических накопителей энергии в задачу оптимизации состава оборудования автономных энергетических Комплексов, использующих возобновляемые источники энергии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 5. – С. 113–130. DOI: 10.18799/24131830/2019/5/262.
12. Review on battery modelling techniques / S. Tamilselvi, S. Gunasundari, N. Karuppiah, R.A. Razak, S. Madhusudan, V.M. Nagarajan, T. Sathish, M.Z.M. Shamim, C.A. Saleel, A.A. Afzal // Sustainability. – 2021. – Vol. 13. – Art. no. 10042. DOI: 10.3390/su131810042.
13. A comprehensive review of battery modeling and state estimation approaches for advanced battery management systems / Y. Wang, J. Tian, Z. Sun, L. Wang, R. Xu, M. Li, Z. Chen // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2020. – Vol. 131. – Art. no. 110015. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110015.
14. Machine-learning assisted identification of accurate battery lifetime models with uncertainty / P. Gasper, N. Collath, H.C. Hesse, A. Jossen, K. Smith // Journal of The Electrochemical Society. – 2022. – Vol. 169. – Art. no. 080518. DOI: 10.1149/1945-7111/ac86a8.
15. Prediction of battery cycle life using early-cycle data, machine learning and data management / B. Celik, R. Sandt, L.C.P. dos Santos, R. Spatschek // Batteries. – 2022. – Vol. 8. – № 12. – Art. no. 266. DOI: 10.3390/batteries8120266.
16. Обухов С.Г., Давыдов Д.Ю. Математическая модель аккумуляторной батареи с учетом физических ограничений на доступную мощность // Электрохимическая энергетика. – 2023. – Т. 23. – № 3. – С. 121–133. DOI: 10.18500/1608-4039-2023-23-3-121-133.
17. Tremblay O., Dessaint L.A. Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications // World Electric Vehicle Journal. – 2009. – Vol. 3. – № 2. – P. 289–298. DOI: 10.3390/wevj3020289.
18. Manwell J.F., McGowan J.G. Lead acid battery storage model for hybrid energy systems // Solar Energy. – 1993. – Vol. 50. – № 5. – P. 399–405. DOI: 10.1016/0038-092X(93)90060-2.
19. Brik K., Ammara F. Causal tree analysis of depth degradation of the lead acid battery // Journal of Power Sources. – 2013. – Vol. 228. – P. 39–46. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.10.088.
20. A comprehensive review of the lithium-ion battery state of health prognosis methods combining aging mechanism analysis / Y. Xiao, J. Wen, L. Yao, J. Zheng, Z. Fang, Y. Shen // Journal of Energy Storage. – 2023. – Vol. 65. – Art. no. 107347. DOI: 10.1016/j.est.2023.107347.
21. A comprehensive review of lithium-ion batteries modeling, and state of health and remaining useful lifetime prediction / M. Elmahallawy, T. Elfouly, A. Alouani, A.M. Massoud // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – P. 119040–119070. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3221137.
22. An analysis of battery degradation in the integrated energy storage system with solar photovoltaic generation / M. Lee, J. Park, S.I. Na, H.S. Choi, B.S. Bu, J. Kim // Electronics. – 2020. – Vol. 9. – Art. no. 701. DOI: 10.3390/electronics9040701.
23. Comparison of lead-acid and li-ion batteries lifetime prediction models in stand-alone photovoltaic systems / R. Dufo-López, T. Cortés-Arcos, J.S. Artal-Sevil, J.L. Bernal-Agustín // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11 (3). DOI: 10.3390/app11031099.
24. García-Vera Y.E., Dufo-López R., Bernal-Agustín J.L. Optimization of isolated hybrid microgrids with renewable energy based on different battery models and technologies // Energies. – 2020. – Vol. 13. DOI: 10.3390/en13030581.

25. Lifetime modelling of lead acid batteries / H. Bindner, T. Cronin, P. Lundsager, J.F. Manwell, U. Abdulwahid, I. Baring-Gould // European Union Benchmarking Research Project (ENK6-CT-2001-80576). – New York, NY, USA, 2005. – 79 p.
26. Model prediction for ranking lead-acid batteries according to expected lifetime in renewable energy systems and autonomous power-supply systems / J. Schiffer, D.U. Sauer, H. Bindner, T. Cronin, P. Lundsager, R. Kaiser // Journal of Power Sources. – 2007. – Vol. 168. – P. 66–78. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2006.11.092.
27. CS Battery Energy CO Limited. URL: <https://www.csbatteryco.com/> (дата обращения 05.03.2024).
28. Estimating battery lifetimes in Solar Home System design using a practical modeling methodology / N. Narayan, T. Papakosta, V. Vega-Garita, Z. Qin, J. Popovic-Gerber, P. Bauer, M. Zeman // Applied Energy. – 2018. – Vol. 228. – P. 1629–1639. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.06.152.
29. Универсальная модель срока службы аккумуляторных батарей в автономных фотоэлектрических системах / Д.Н. Карамов, И.Р. Муфтахов, В.В. Потапов, А.А. Сыромятников, И.Н. Шушпанов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 2 (26). – С. 85–96. DOI: 10.38028/ESI.2022.26.2.008.
30. HOPPECKE Germany. URL: https://www.hoppecke.com/fileadmin/Redakteur/Hoppecke-Main/Products/Downloads/Montagehandbuch_geschl_EN_final.pdf (дата обращения 05.03.2024).

Информация об авторах

Сергей Геннадьевич Обухов, доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. serob@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7177-4036>

Денис Юрьевич Давыдов, кандидат технических наук, старший преподаватель отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. denisyudavydov@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-2998-6304>

Поступила в редакцию: 25.03.2024

Поступила после рецензирования: 18.04.2024

Принята к публикации: 16.05.2024

REFERENCES

1. Renewable power generation costs in 2022. *IRENA*. August 2022, 208 p. Available at: www.irena.org (accessed 15 March 2024).
2. Berdnikov R., Kholkin D., Chausov I. Optimization of energy supply systems for remote and isolated territories through energy flexibility management. *Energy policy*, 2023, no. 1 (179), pp. 94–105. (In Russ.)
3. Weinand J.M., Hoffmann M., Göpfert J., Terlouw T., Schönauf J., Kuckertz P., McKenna R., Kotzur L., Linßen J., Stolten D. Global LCOEs of decentralized off-grid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, vol. 183, art. no. 113478. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113478.
4. Ma J., Yuan X. Techno-economic optimization of hybrid solar system with energy storage for increasing the energy independence in green buildings. *Journal of Energy Storage*, 2023, vol. 61, art. no. 106642. DOI: 10.1016/j.est.2023.106642.
5. Obukhov S.G., Ibrahim A. Optimization of Equipment Composition of Hybrid Energy Systems with Renewable Energy Sources. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 64–76. (In Russ.) DOI: 10.14529/power200206.
6. Carroquino J., Escriche-Martínez C., Valiño L., Dufo-López R. Comparison of economic performance of lead-acid and li-ion batteries in standalone photovoltaic energy systems. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, no. 8, Art. no. 3587. DOI: 10.3390/app11083587.
7. Li B., Liu Z., Wu Y., Wang P., Liu R., Zhang L. Review on photovoltaic with battery energy storage system for power supply to buildings: challenges and opportunities. *Journal of Energy Storage*, 2023, vol. 61, art. no. 106763. DOI: 10.1016/j.est.2023.106763.
8. Obukhov S.G., Plotnikov I.A., Masolov V.G. The analysis of operation modes of energy stores in autonomous hybrid power plants with renewable energy resources. *Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2018, vol. 13–15, pp. 55–67. (In Russ.). DOI: 10.15518/isjaee.2018.13-15.055-067.
9. Narayan N., Papakosta T., Vega-Garita V., Popovic-Gerber J., Bauer P., Zeman M. A simple methodology for estimating battery lifetimes in Solar Home System design. *IEEE AFRICON*. Cape Town, South Africa, 2017. pp. 1195–1201. DOI: 10.1109/AFRCON.2017.8095652.
10. Obukhov S.G., Plotnikov I.A., Masolov V.G. Service life tests for storage batteries used in islanded power systems with renewable energy sources. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2021, vol. 25, no. 4, pp. 463–477. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2021-4-463-477.
11. Karamov D.N. Integration of the storage battery categorization process into the task of optimizing the equipment of standalone energy systems with renewable energy sources. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 5, pp. 113–130. (In Russ.) DOI 10.18799/24131830/2019/5/262.
12. Tamilselvi S., Gunasundari S., Karupiah N., Razak R.A., Madhusudan S., Nagarajan V.M., Sathish T., Shamim M.Z.M., Saleel C.A., Afzal A.A. Review on battery modelling techniques. *Sustainability*, 2021, vol. 13, art. no. 10042. DOI: 10.3390/su131810042.

13. Wang Y., Tian J., Sun Z., Wang L., Xu R., Li M., Chen Z. A comprehensive review of battery modeling and state estimation approaches for advanced battery management systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, vol. 131, art. no. 110015. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110015.
14. Gasper P., Collath N., Hesse H.C., Jossen A., Smith K. Machine-learning assisted identification of accurate battery lifetime models with uncertainty. *Journal of The Electrochemical Society*, 2022, vol. 169, art. no. 080518. DOI: 10.1149/1945-7111/ac86a8.
15. Celik B., Sandt R., Dos Santos L.C.P., Spatschek R. Prediction of battery cycle life using early-cycle data, machine learning and data management. *Batteries*, 2022, vol. 8 (12), art. no. 266. DOI: 10.3390/batteries8120266.
16. Obukhov S.G., Davydov D.Yu. Mathematical model of the electrochemical battery with physical constraints of available capacity. *Electrochemical Energetics*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 121–133. (In Russ.) DOI: 10.18500/1608-4039-2023-23-3-121-133.
17. Tremblay O., Dessaint L.A. Experimental validation of a battery dynamic model for ev applications. *World Electric Vehicle Journal*, 2009, vol. 3, no. 2, pp. 289–298. DOI: 10.3390/wevj3020289.
18. Manwell J.F., McGowan J.G. Lead acid battery storage model for hybrid energy systems. *Solar Energy*, 1993, vol. 50, no. 5, pp. 399–405. DOI: 10.1016/0038-092X(93)90060-2.
19. Brik K., Ammara F. Causal tree analysis of depth degradation of the lead acid battery. *Journal of Power Sources*, 2013, vol. 228, pp. 39–46. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.10.088.
20. Xiao Y., Wen J., Yao L., Zheng J., Fang Z., Shen Y. A comprehensive review of the lithium-ion battery state of health prognosis methods combining aging mechanism analysis. *Journal of Energy Storage*, 2023, vol. 65, art. no. 107347. DOI: 10.1016/j.est.2023.107347.
21. Elmahallawy M., Elfouly T., Alouani A., Massoud A.M. A comprehensive review of lithium-ion batteries modeling, and state of health and remaining useful lifetime prediction. *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 119040–119070. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3221137.
22. Lee M., Park J., Na S.I., Choi H.S., Bu B.S., Kim J. An analysis of battery degradation in the integrated energy storage system with solar photovoltaic generation. *Electronics*, 2020, vol. 9, art. no. 701. DOI: 10.3390/electronics9040701.
23. Dufo-López R., Cortés-Arcos T., Artal-Sevil J.S., Bernal-Agustín J.L. Comparison of lead-acid and li-ion batteries lifetime prediction models in stand-alone photovoltaic systems. *Applied Sciences*, 2021, vol. 1, art. no. 1099. DOI: 10.3390/app11031099.
24. García-Vera Y.E., Dufo-López R., Bernal-Agustín J.L. Optimization of isolated hybrid microgrids with renewable energy based on different battery models and technologies. *Energies*, 2020, vol. 13. DOI: 10.3390/en13030581.
25. Bindner H., Cronin T., Lundsager P., Manwell J.F., Abdulwahid U., Baring-Gould I. Lifetime modelling of lead acid batteries. *European Union Benchmarking Research Project (ENK6-CT-2001-80576)*. New York, NY, USA, 2005. 79 p.
26. Schiffer J., Sauer D.U., Bindner H., Cronin T., Lundsager P., Kaiser R. Model prediction for ranking lead-acid batteries according to expected lifetime in renewable energy systems and autonomous power-supply systems. *Journal of Power Sources*, 2007, vol. 168, pp. 66–78. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2006.11.092.
27. *Company CS Battery Energy CO Limited*. Available at: <https://www.csbattery.com/> (accessed 5 March 2024).
28. Narayan N., Papakosta T., Vega-Garita V., Qin Z., Popovic-Gerber J., Bauer P., Zeman M. Estimating battery lifetimes in Solar Home System design using a practical modeling methodology. *Applied Energy*, 2018, vol. 228, pp. 1629–1639. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.06.152.
29. Karamov D.N., Muftahov I.R., Potapov V.V., Syromyatnikov A.A., Shushpanov I.N. A universal model of battery life in autonomous photovoltaic systems. *Information and mathematical technologies in science and management*, 2022, vol. 2 (26), pp. 85–96. (In Russ.) DOI: 10.38028/ESI.2022.26.2.008.
30. *HOPPECKE Germany*. Available at: https://www.hoppecke.com/fileadmin/Redakteur/Hoppecke-Main/Products/Downloads/Montagehandbuch_geschl_EN_final.pdf (accessed 5 March 2024).

Information about the authors

Sergey G. Obukhov, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. serob@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7177-4036>

Denis Yu. Davydov, Cand. Sc., Senior Lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. denisyudavydov@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-2998-6304>

Received: 25.03.2024

Revised: 18.04.2024

Accepted: 16.05.2024

УДК 631.41

DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4357

Шифр специальности ВАК: 03.02.13

Накопление мышьяка в ортштейнах spolic technosols в районе крупного медеплавильного комбината Среднего Урала

М.В. Шабанов, М.С. Маричев✉

*Санкт-Петербургский государственный аграрный университет,
Россия, г. Санкт-Петербург, г. Пушкин*

✉m.s.marichev@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена необходимостью изучения поведения мышьяка в почвах как одного из основных загрязнителей депонирующих сред в районах горнометаллургической отрасли. В последние десятилетия выбросы мышьяка в окружающую среду достигли огромных масштабов, поэтому данный элемент привлекает внимание исследователей всего мира. Но несмотря на все стороннюю изученность данной проблемы остаются некоторые аспекты, которые необходимо уточнить, чтобы понять геохимию мышьяка. В данной работе рассматриваются spolic technosols с критически высоким содержанием мышьяка в профиле почвы с чередующимся водно-застойными режимами и сухими условиями. Как одни из главных почвообразующих элементов, ортштейны содержат значительное количество соединений железа и марганца, способны к адсорбционным процессам и вовлечению элементов в процесс конкрециообразования. *Целью* работы является установление влияния ортштейнов на аккумуляцию мышьяка в почве, подверженной интенсивной техногенной нагрузке. *Объектом* исследования являются ортштейны spolic technosols в зоне работы медеплавильного комбината и фоновых не подверженных загрязнению почв. *Методы.* Определение мышьяка проводилось методом инверсионной вольтамперометрии. Морфологическое описание и структуризация ортштейнов проводились с помощью сканирующей электронной микроскопии с помощью установки «Thermo Fisher Phenom XL G2 Desktop SEM». *Результаты.* В ходе исследования морфологических особенностей ортштейнов выявлены различия в почвах, подверженных большей техногенной нагрузке. Внутрь ортштейнов во всех исследуемых почвах мышьяк не обнаружен. Также концентрации мышьяка в общей массе ортштейнов составляет до 40–50 % от массы почвы. Данный факт свидетельствует об аккумуляции мышьяка путем поверхностной адсорбции и о выступлении ортштейнов в качестве геохимического барьера. Полученные в ходе работы данные могут способствовать поиску способов очистки почв, загрязненных мышьяком, а также дают понять основные процессы поведения данного элемента в почвообразовании.

Ключевые слова: почвенные компоненты, ортштейны, фиксация мышьяка, загрязнение почв, техногенез

Для цитирования: Шабанов М.В., Маричев М.С. Накопление мышьяка в ортштейнах spolic technosols в районе крупного медеплавильного комбината Среднего Урала // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 6. – С. 123–134. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4357

UDC 631.41

DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4357

Arsenic accumulation in spolic technosols in the area of a large copper smelting plant in the Middle Urals

M.V. Shabanov, M.S. Marichev✉

St. Petersburg State Agrarian University, Pushkin, St. Petersburg, Russian Federation

✉m.s.marichev@yandex.ru

Abstract. Relevance. The necessity to study arsenic behaviour in soils as one of the main pollutants of depositing environments in areas of mining and metallurgical industry. In recent decades, arsenic emissions into the environment have reached a huge scale, so this element attracts the attention of researchers around the world. But in spite of all the studies of this problem, there are still some aspects that need to be clarified to understand the geochemistry of arsenic. This paper deals with spolic technosols with critically high arsenic content in the soil profile with alternating water-logged and dry conditions. As one of the main soil-forming elements, orthosteins contain significant amounts of iron and manganese compounds and are capable of adsorption and involvement of the elements in nodule formation. **Aim.** To determine the influence of orthosteins on arsenic accumulation in soil subjected to intensive anthropogenic load. **Object.** Ortsteins spolic technosols in the zone of operation of copper smelting plant and background soils not exposed to pollution. **Methods.** Arsenic was determined by inversion voltammetry method. Morphological characterisation and patterning of the orthosteins were performed by scanning electron microscopy using a Thermo Fisher Phenom XL G2 Desktop SEM unit. **Results.** The study of morphological features of orthosteins revealed differences in soils subjected to greater anthropogenic load. Arsenic was not detected inside the orthosteins in all studied soils. Also arsenic concentrations in the total mass of ortstein is up to 40–50% of the soil mass. This fact indicates the accumulation of arsenic by surface adsorption and the appearance of orthosteins as a geochemical barrier. The data obtained in the course of this work can contribute to the search for ways to clean up soils contaminated with arsenic, as well as provide an understanding of the basic processes of the behaviour of this element in soil formation.

Keywords: soil components, orthosteins, arsenic fixation, soil pollution, technogenesis

For citation: Shabanov M.V., Marichev M.S. Arsenic accumulation in spolic technosols in the area of a large copper smelting plant in the Middle Urals. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 6, pp. 123–134. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4357

Введение

Производство цветных металлов является серьезной угрозой для окружающей среды и риском для здоровья человека [1–3]. В результате переработки сульфидных руд с аэрозолями в атмосферу поступают не только тяжелые металлы, но и металлоиды, одним из которых является мышьяк. Известно, что данный элемент сохраняется в депонирующих средах в течение длительного периода времени [4]. Высокая токсичность мышьяка и его поступление в экосистемы является одной из острых проблем во всем мире, особенно при потенциально высоком риске его закрепления в средах. Основными средами с наиболее высокими рисками накопления в них данного элемента являются почвы, подземные и поверхностные воды, а также живые организмы. Мышьяк – один из наиболее распространенных металлоидов. Он встречается во многих аллотропных соединениях и присутствует на всех континентах более чем в 105 странах [5]. Широко распространен, но редко встречается в земной коре, его концентрация в пределах 2–10 ppm, хотя в некоторых районах сульфидных месторождений обнаружены более высокие концентрации – до 60 ppm [6, 7]. Согласно рекомендации Европейского союза, почва, которую можно использовать в сельскохозяйственных целях, должна содержать <20 ppm [8].

Миллионы людей проживают в зонах воздействия производственной деятельности комбинатов цветной металлургии и сталкиваются с угрозой отравления мышьяком через систему почва–растение. В ходе выплавки меди в атмосферу поставляется огромное количество газопылевых выбросов. Образуются шлакоотвалы, хвостохранилища и отвалы пустых пород. Мышьяк входит в со-

став перерабатываемой руды в виде изоморфной примеси и в процессе выплавки поступает в окружающую среду как с газопылевыми выбросами, так и гидрогенным путем с отвалов и хвостохранилища [9]. В результате воздействия комбината формируются техногенные ландшафты с высокими концентрациями загрязняющих веществ неорганической природы [10, 11]. Мышьяк может адсорбироваться почвенными агрегатами, гумусом и железисто-марганцовистыми конкрециями [12].

Токсичность и подвижность мышьяка зависят от его степени окисления [12], поэтому важно понимать, как влияют почвенные условия на закрепление металлоида в почве. Установлено, что данный элемент прекрасно адсорбируется железистыми и марганцовыми минералами, а также оксидами и гидроксидами железа и марганца. Железо и марганец являются типоморфными элементами многих почв [13]. Их соединения чувствительны к изменению окислительно-восстановительных условий и могут быть потенциальными индикаторами процессов почвообразования [14].

Железомарганцевые конкреции, ортштейны, являются обычными компонентами почв с низкой водопроницаемостью и образуются при сезонных изменениях окислительно-восстановительного потенциала (Eh) и pH почв [15]. В почвах они встречаются округлой или неправильной формы, содержат кристаллы первичных и вторичных минералов, таких как кварц, полевые шпаты, плагиоклазы и глинистые минералы, которые цементированы вместе с оксидами железа и марганца [16, 17]. Ортштейны имеют большое значение в геохимических процессах из-за их высокой адсорбционной способности, они содержат многие элементы, включая

токсичные металлические загрязнители [18, 19], редкоземельные металлы [20] и питательные элементы для растений [21].

Таким образом, железомарганцевые конкреции являются одними из ключевых компонентов почвенной среды, регламентируют геохимическое поведение металлов и металлоидов и существенно влияют на их стабильность закрепления при изменении почвенных процессов. Данные обстоятельства исследовались рядом ученых [22–29], но мало кто рассматривал поведение структурных преобразований самих железомарганцевых конкреций при высоких концентрациях мышьяка в почвах.

В связи с вышеизложенной целью данной работы является установить влияние ортштейнов на накопление мышьяка в почве, подверженной высокой техногенной нагрузке.

Объекты и методы

Для исследования концентрации мышьяка в ортштейнах была выбрана северо-таежная зона Свердловской области в районе г. Красноуральске (рис. 1), где с 1931 г. функционирует медеплавильный комбинат. В результате многолетней деятельности из-за нарушений рационального землепользования, отсутствия современных методов очистки отходящих га-

зов прилегающие ландшафты претерпели сильное видоизменение с образованием больших площадей нарушенных, загрязненных земель [30].

В качестве объектов исследования представлены Luvisols podzolic, gleic, сформированные под луговой и травянистой растительностью, а также под смешанными лесами с травянистой растительностью (рис. 1).

Всего на территории исследования был выделен один тип почв и два типа ландшафта в зависимости от степени антропогенного воздействия. Природные ландшафты – участки, подверженные минимальному воздействию и антропогенно-измененные вблизи медеплавильного комбината. Морфологический анализ почв проводили в полевых условиях. Для описания строения профиля и изучения морфологических горизонтов использовали морфогенетический метод. При изучении морфологических свойств почв основное внимание уделялось строению генетических горизонтов, которые в значительной степени определяют их генетическую принадлежность. Для аналитического изучения ортштейнов отбирали почвенные образцы, где визуально прослеживаются стяжения железа и марганца. Отбор проводился согласно ISO 18400-104.

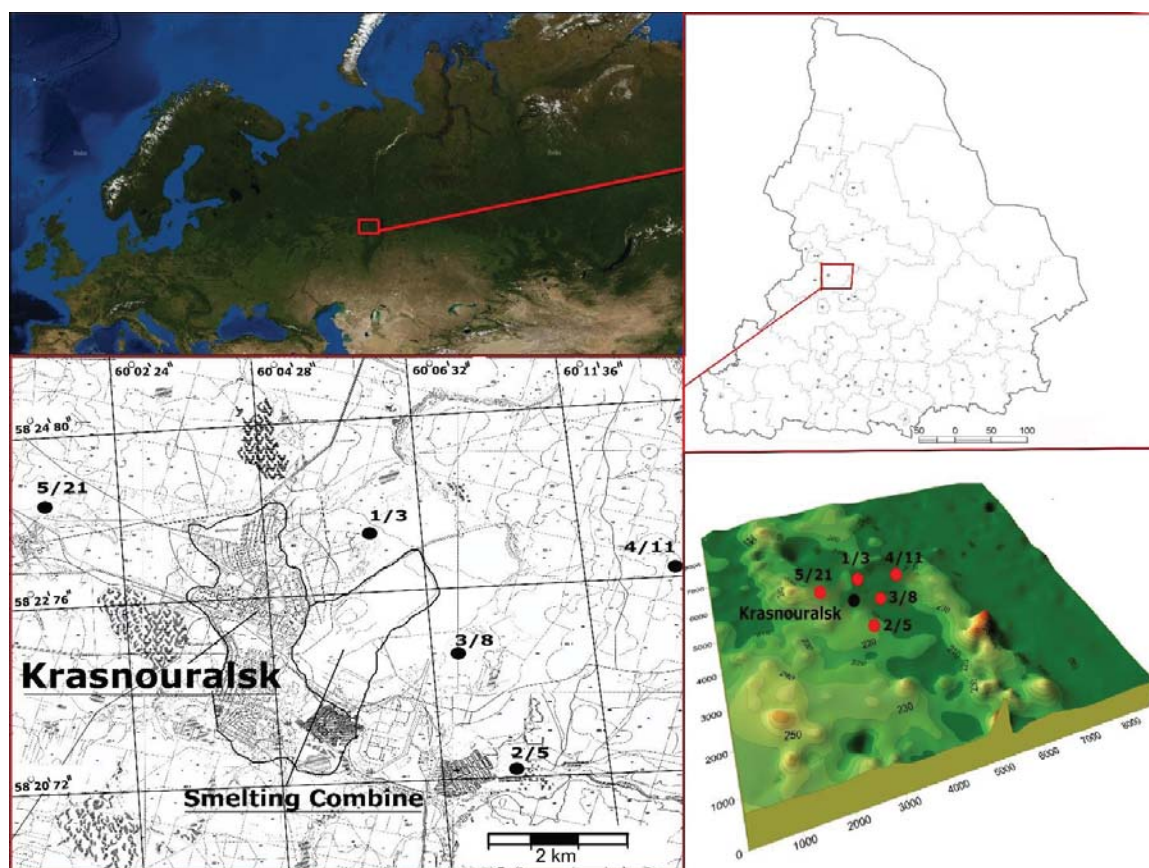


Рис. 1. Карта района работ, схема отбора почвенных образцов
 Fig. 1. Map of the work area, soil sampling scheme

В ходе работ было заложено пять разрезов на различном отдалении от источника эмиссии комбината (рис. 1). Вертикальный срез почвы до материнской породы. В качестве сравнения производился отбор проб почв на отдаленных участках от комбината (условно фоновых) – № 2/5, 5/21, и в зоне интенсивной техногенной нагрузки – № 1/3, 3/8, 4/11.

Для определения морфологии ортштейнов ненарушенный образец воздушно-сухой почвы размачивали в воде и затем пропускали через сито 0,25 мм путем мокрого просеивания, оставшиеся на сите ортштейны промывали дистиллированной водой и сушили при комнатной температуре.

Подготовленные вышеописанным способом образцы визуально очищали от примесей первичных минералов (кварц, полевой шпат обломки горных пород) и затем повторно отбирали примеси с помощью бинокулярного микроскопа Микромед 2-20. Определение pH в почвенной суспензии проводилось в соотношении почва/раствор 1:5 с помощью комбинированного хлорсеребряного электрода в соответствии с ISO 10390. Содержание углерода органического вещества определялось по ISO 14235. Определение обменных катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} проводилось в соответствии с ISO 23470. Гранулометрический состав почв определялся путем осаждения в водной суспензии фракций почв в различном интервале времени с отбором жидкости на различной высоте, расчеты проводились по формуле Стокса (1).

$$V = \frac{2g(d_2 - d_1)}{\mu}, \quad (1)$$

где V – скорость седиментации почвенных частиц, см/с; g – ускорение силы тяжести, равное 981 см/с^2 ; d_2 – средняя плотность минеральных частиц; d_1 – плотность воды при данной температуре; r – радиус частиц, см; μ – вязкость воды, Па, при данной температуре.

Определение валового мышьяка проводилось методом инверсионной вольтамперометрии по ПНД Ф 16.1:2.2.2:3.48-06. Для проведения анализа 1,000 г конкреций заливали 5 мл 50 % азотной кислоты и 2 мл концентрированной серной кислоты с последующим кипячением в течение 5 минут до удаления паров серной кислоты. После удаления паров добавлялось 5 мл 50 % азотной кислоты с последующим нагревом в течение 10 минут на песчаной бане. Вытяжку отфильтровывали в мерную колбу на 50 мл через складчатый фильтр белая лента, остатки почвы промывались бидистиллированной водой и доводилось до метки. В подготовленной таким образом вытяжке определялся мышьяк на вольтамперометрическом анализаторе TA-Lab.

Для характеристики структуры и морфологии образцов был использован метод сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с помощью установки «Thermo Fisher Phenom XL G2 Desktop SEM» (США). С помощью настольного магнетронного напылителя «Cressington 108 auto Sputter Coater» (Великобритания) на подготовленные образцы в вакуумной камере ($\sim 0,01$ мбар) наносился тонкий (5–10 нм) слой золота. Ускоряющее напряжение при съёмке микрофотографий составляло 15 кВ.

Результаты и обсуждение

Физико-химическая характеристика почв

Разрезы 5/21 и 2/5 являются условно фоновыми, так как в них содержание мышьяка ниже или незначительно выше ОДК и мировых кларковых значений, составляющих 5,6–5,7 мг/кг [31, 32]. Находятся данные разрезы почв в отдалении от комбината на расстоянии >5 км. Разрезы 1/3, 3/8 и 4/11 расположены в непосредственной близости к комбинату. Почвы данных районов относятся к техногенно-трансформированным Spolic Technosols (рис. 1). Для фоновых почв Luvisols (5/21 и 2/5) среднее содержание углерода органического вещества в слое 0–15 см в пределах 5 % при кислой реакции среды. В элювиальном горизонте его содержание резко уменьшается (табл. 1). Аэропромвыбросы поставляют в окружающую среду газопылевые отходы плавки, помимо зональных элементов, катионов еще и анионы, среди которых присутствует серный ангидрид. В результате его взаимодействия с водяным паром атмосферы образуется серная кислота, которая поступает на поверхность Земли, происходит подкисление верхней части профиля. Серная кислота участвует в разрушении минеральной части профиля, в результате происходит вынос обменных катионов кальция и магния, а также илстых частиц в нижние слои почвы. Поэтому верхний пятнадцатисантиметровый слой преимущественно супесчаный, нижний элювиальный горизонт тяжелосуглинистый (табл. 1).

В почвах Spolic Technosols характерно изменение реакции среды от очень сильнокислой до сильнокислой, содержание гумуса низкое (табл. 1). Также наблюдается обеднение обменными катионами кальция и магния и илистой фракцией.

Морфологические признаки конкреций

Важным фактором, определяющим многие свойства ортштейнов, является их морфология. Наличие ортштейнов в почве указывает на застойно-промывной водный режим. Верхний горизонт АУ, который испытывает наибольшую кислотную нагрузку в результате аэропромвыбросов, обедняется илистой фракцией и, как следствие, приобретает легкий гранулометрический состав – супесчаный, нижний элювиальный горизонт тяжелосуглинистый, что обуславливает низкую водопроницае-

мость, поэтому вода атмосферных осадков долго застаивается в верхних горизонтах, обеспечивая анаэробные условия и конкрециообразования. Поэтому максимальное количество конкреций фиксируется в серогумусовых горизонтах, за исключением в разрезах № 2/5 и 4/11.

Опесчаненные верхние горизонты обладают низкой плотностью, в результате ортштейны в по-

давлиющем большинстве ровные, округлые, а нижние элювиальные более тяжелые по гранулометрическому составу, из-за чего конкреции угловатые или угловато-уплощенные. Цвет конкреций серогумусового горизонта коричнево-черный за счет преобладания марганца (табл. 2), в элювиальном горизонте коричневые, за исключением разре-

Таблица 1. Физико-химические свойства серогумусового (AY) и элювиального (E) горизонтов исследуемых почв

Table 1. Physico-chemical properties of grey humus (AY) and eluvial (E) soil horizons

Образец/показатель Sample/indicator	Почвенный профиль №/Soil profile no.				
	1/3	2/5	3/8	4/11	8/21
Горизонт/Horizon	AY				
С органического вещества, %/Organic matter C, %	3,87±0,02	5,30±0,05	1,15±0,02	2,17±0,01	4,22±0,05
pH _{H2O}	3,97±0,10	4,91±0,01	3,73±0,03	4,54±0,05	5,81±0,01
pH _{KCl}	3,54±0,05	5,15±0,04	3,31±0,02	3,97±0,07	5,04±0,02
Ca ²⁺	7,50±0,15	3,10±0,03	3,75±0,01	12,25±0,20	19,73±0,88
Mg ²⁺	5,00±0,18	8,69±0,19	5,52±0,20	12,24±0,35	14,37±0,88
Размер фракции <0,001 мм, %/Fraction size <0,001 mm, %	11,93±0,25	18,67±0,50	8,26±0,32	6,73±0,56	12,54±0,80
Размер фракции <0,01 мм, %/Fraction size <0,01 mm, %	39,48±0,58	15,61±0,65	16,22±0,72	5,81±0,74	11,93±0,82
Горизонт/Horizon	E _g				
С органического вещества, %/Organic matter C, %	0,87±0,03	0,90±0,01	0,71±0,01	0,74±0,06	0,55±0,01
pH _{H2O}	4,67±0,04	3,52±0,04	4,82±0,04	4,47±0,02	5,02±0,03
pH _{KCl}	3,75±0,03	3,70±0,07	3,89±0,01	3,92±0,03	4,91±0,02
Ca ²⁺	4,38±0,08	3,35±0,40	5,25±0,30	6,25±0,10	21,25±1,77
Mg ²⁺	1,63±0,02	5,67±0,03	8,13±0,24	5,00±0,08	12,50±1,20
Размер фракции <0,001 мм, %/Fraction size <0,001 mm, %	13,46±0,85	45,60±0,92	24,17±0,63	40,09±1,20	43,76±0,45
Размер фракции <0,01 мм, %/Fraction size <0,01 mm, %	39,48±1,25	47,13±0,20	47,74±1,15	55,32±2,17	43,46±1,54

Таблица 2. Макро- и мезоморфологическая характеристика конкреций

Table 2. Macro- and mesomorphological characteristics of nodules

Почва № Soil no.	Цвет/код цвета по Mansell Mansell color/color code	10-кратное увеличение/10x zoom	
		Форма/Form	Поверхность/Surface
Серогумусовый горизонт/Grey humus (AY) soil horizon			
1/3	Коричневато-черный/10YR3/4 Brownish black/10YR3/4	Округлые Rounded	Неровная, с вкраплениями кварцевых зерен Uneven, with flecks of quartz grains
2/5	Коричневато-черный/5YR2/4 Brownish black/5YR2/4		
3/8	Коричневый/7,5YR4/3 Brown/7.5YR4/3		Ровная, с углублениями, единичные вкрапления кварца Flat, with depressions, single inclusions of quartz
4/11	Коричневато-черный/10YR2/3 Brownish black/10YR2/3		
5/21	Коричневый/7,5YR4/4 Brown/7.5YR4/4	Остроугольные Sharp	Неровная с углублениями, единичные вкрапления кварца Uneven with depressions, single quartz inclusions
Элювиальный горизонт/Eluvial (E) soil horizon			
1/3	Коричневый/7,5YR4/4 Brown/7.5YR4/4	Угловато-округлые, уплощенные Angularly round, flattened	Неровная с многочисленными включениями кварца Uneven with numerous quartz inclusions
2/5	Коричневый/10YR4/4 Brown/10YR4/4	Угловато-округлые Angularly round	Неровная, трещиноватая, единичные включения кварца Uneven, cracked, single quartz inclusions
3/8	Коричневый/10YR4/4 Brown/10YR4/4		Неровная, шероховатая, единичные включения кварца Uneven, rough, single quartz inclusions
4/11	Коричневато-черный 10YR3/3 Brownish black 10YR3/3	Угловато-округлые, удли- ненные, уплощенные Angularly round, elongated, flattened	Неровная, шероховатая, единичные включения кварца Uneven, rough, single quartz inclusions
5/21	Коричневый/10YR4/6 Brown/10YR4/6	Угловатые, уплощенные Angular, flattened	Неровная, трещиноватая с углублениями, единичные включения кварца Uneven, cracked with depressions, single quartz inclusions

Элементный состав ортштейнов

Оксиды Fe и Mn в конкрециях обладают высокой реакционной способностью из-за их большой площади поверхности и поверхностных зарядов, зависящих от pH, и поэтому способны контролировать доступность питательных и токсичных элементов для поглощения растениями.

На рис. 2 изображены снимки ортштейнов, полученных структурной электронной микроскопией с точки обора 3/8 и глубины 1–15 см – серогумусовый горизонт, на рис. 4 ортштейны из разреза № отбора 3/8 с глубины 15–30 см – элювиальный горизонт. Во всех изученных образцах на свежем изломе концентрической структуры не обнаружено. Материал ортштейнов состоит из органического, аморфного и кристаллического вещества. По данным EDXзонда основными химическими элементами являются O, C, Si, Fe, Al и Mn. На общем фоне отчетливо выделяются крупные кристаллические зоны 2, 3, 4 и 6 (рис. 2) и 2, 3, 4 и 5 (рис. 3), представленные первичными минералами. При визуальном осмотре с использованием микроскопа идентифицирован кварц, по данным расчетов – санидин и анортит. Цементирующим материалом являются аморфные изотропные формы железа и марганца. Они заполняют пустоты и трещины ортштейна и покрывают тонкой пленкой первичные минералы, по данным структурных расчетов представлены якобитом и маггемитом. Содержание железа в пределах от 5,5 до 27 %, марганца – от 3,5 до 10,5 %. Кроме этого, обнаруживается высокое содержание органического вещества.

По данным табл. 3 РФА содержание основных конкрециообразующих элементов Si, Fe и Al сильно варьирует. Максимальное содержание кремния – от 23,42 до 23,14 %, какой-либо закономерности распределения не обнаружено.

Содержание железа – от 5,65 до 9,42 %, марганца – от 0,33 до 1,65 %. Максимальное количество железа выявлено в элювиальном и субэлювиальном горизонтах, марганец преобладает в верхней части профиля.

Алюминий, калий и натрий, как видно из табл. 3, согласуются с содержанием кремния, что

позволяет предположить, что в ортштейнах алюминий содержится в алюмосиликатах типа санидина и анортита.

Кальций и магний являются высокоподвижными элементами, поэтому они вымываются из верхней части профиля и переносятся вниз, вследствие чего их концентрации в элювиальном горизонте выше, чем в серогумусовом.

Содержание мышьяка в конкрециях

Во многих почвах мышьяк тесно связан с динамикой оксида железа. Хотя аморфные оксиды железа являются компонентами, которые преимущественно влияют на сорбцию мышьяка во многих различных типах почв и отложений, роль железа более важна в почвах с чередующимися окислительно-восстановительными условиями. Геохимия мышьяка в периодически анаэробных почвах очень сложна. Наступление бескислородных условий в почве может изменить равновесие мышьяка за счет растворения минералов. В первую очередь это зависит от различных химических реакций, таких как восстановительное растворение оксидов железа (III), которое первоначально высвобождает связанный мышьяк с последующим окислением железа (II), в результате формируются свежесформированные оксигидроксиды железа, которые становятся более активными в качестве акцепторов электронов после каждого цикла окислительно-восстановительных эпизодов. Эти оксидные минералы сочетают в себе высокую удельную поверхность с высоким сродством к оксианионам, но с более низкой энергией сцепления по сравнению с аэробной почвой.

Закрепление мышьяка в ортштейнах может происходить двумя односторонними способами. Это унаследованный мышьяк, который накапливается из почвенной массы в ходе конкрециообразования [33], и второй – это адсорбция, в результате чего образуются поверхностные комплексы [34]. А на количество закрепленного мышьяка влияет удаление от источника эмиссии. Как видно из данных табл. 4, процент мышьяка в конкрециях от массы почвы колеблется в широком диапазоне – от 2,20 до 74,5 %.

Таблица 3. Химический состав ортштейнов по данным рентгенструктурнофазового анализа

Table 3. Chemical composition of orthosteins according to X-ray structure-phase analysis data

Почва № Soil no.	Горизонт Horizon	Глубина, см Depth, cm	Si	Al	Fe	C	K	Na	Mg	Mn	Ca
			%								
1/3	AY	3–15	26,41	6,92	7,64	3,36	1,49	1,04	0,64	1,16	0,45
	Elg	15–30	29,14	7,11	5,65	3,74	1,75	1,35	0,67	0,72	0,56
2/5	AY	4–12	26,20	8,07	7,11	4,78	1,68	1,07	0,70	0,50	0,57
	El	12–25	25,50	7,04	9,42	2,84	2,14	1,59	0,57	0,76	0,64
3/8	AY	1–15	29,14	7,13	5,88	5,91	1,52	1,00	0,67	0,33	0,39
	BEI	15–25	25,71	6,44	9,05	2,53	1,34	1,12	0,58	1,35	0,49
4/11	AY	3–11	29,06	7,12	6,85	4,49	1,50	0,99	0,70	0,66	0,47
	El	11–27	27,97	6,33	8,79	3,30	1,49	1,07	0,58	0,73	0,60
5/21	AY	2–30	23,42	6,07	9,06	5,40	1,29	1,09	0,60	0,63	0,82
	Elg	30–38	27,98	6,66	7,73	3,15	1,52	1,15	0,65	1,65	0,64

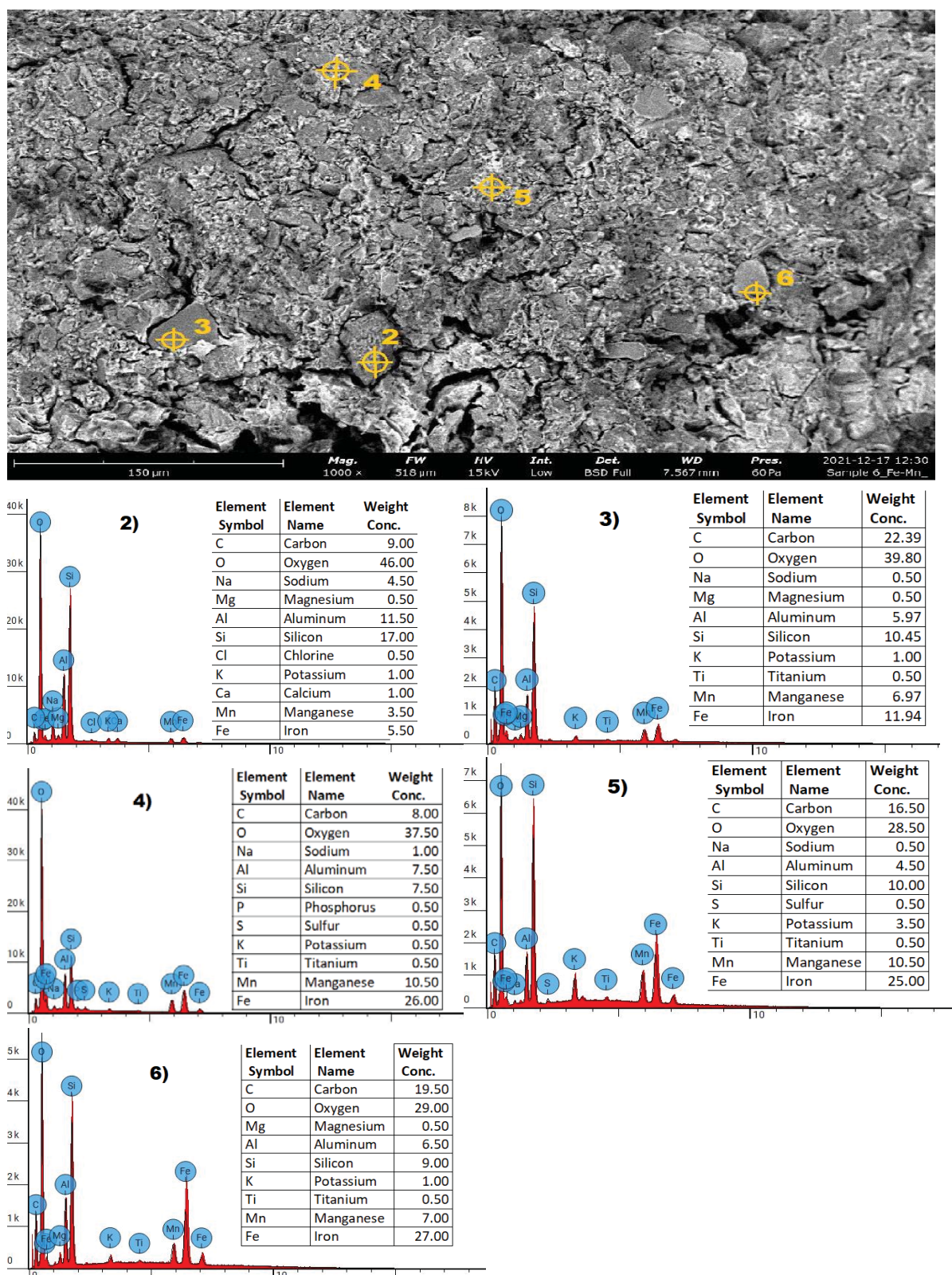


Рис. 2. Сканирующая электронная микрофотография выбранной типичной конкреции (5 мм) из серо-гумусового горизонта АУ, элементного состава с использованием EDS-анализа (5 точек). Химический состав по данным энергодисперсионной рентгеновской спектрометрии (Energy-dispersive X-ray spectroscopy – EDX)

Fig. 2. Scanning electron micrograph of a selected typical nodule (5 mm) from the grey humus AY horizon, element composition using EDS analysis (5 points). Chemical composition according to energy dispersive X-ray spectrometry (EDX) data

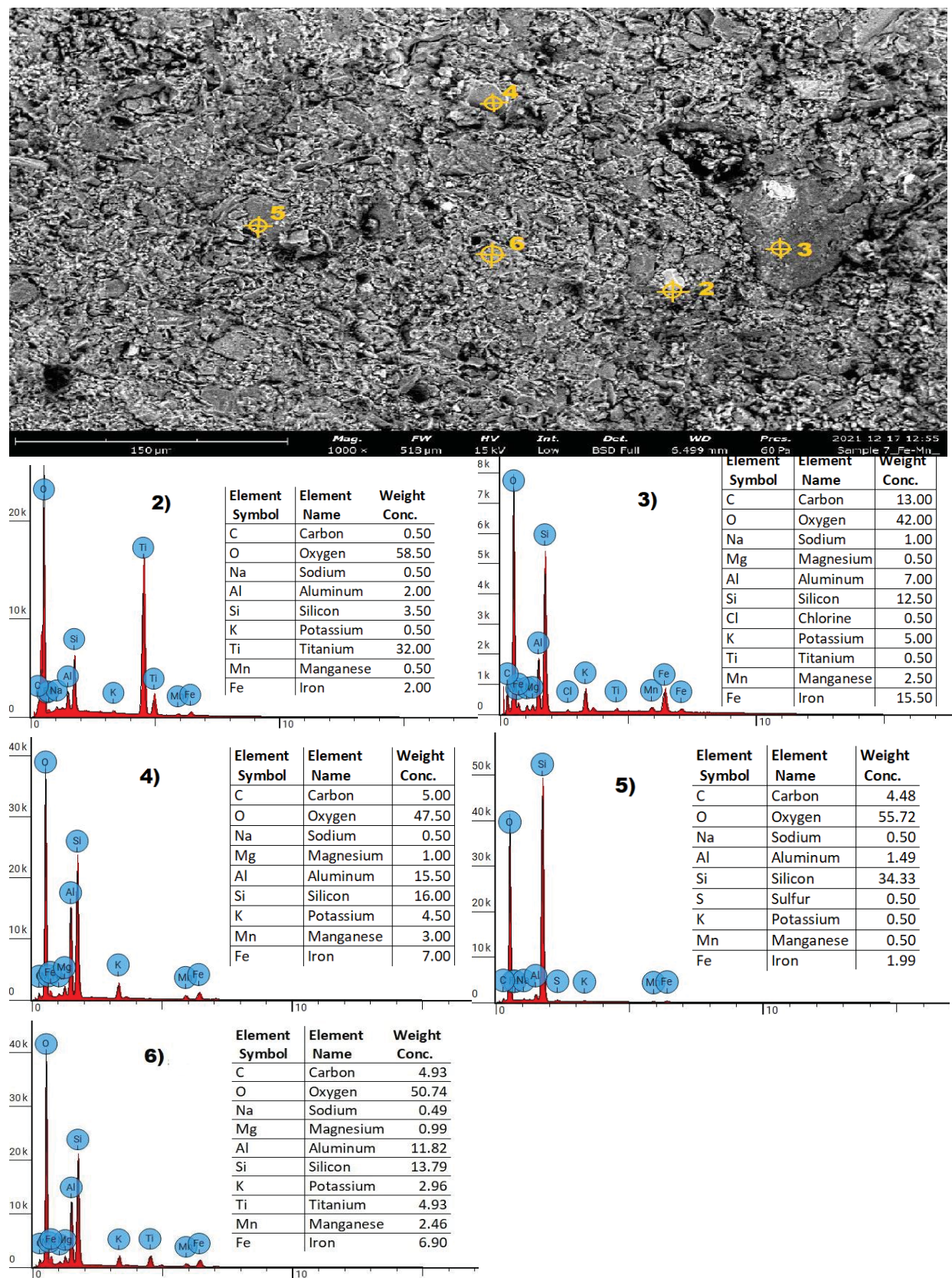


Рис. 3. Сканирующая электронная микрофотография выбранной типичной конкреции (1–2 мм) из серо-гумусового горизонта АУ, элементного состава с использованием EDS-анализа (5 точек). Химический состав по данным энергодисперсионной рентгеновской спектрометрии ((Energy-dispersive X-ray spectroscopy – EDX)

Fig. 3. Scanning electron micrograph of a selected typical nodule (1–2 mm) from grey humus horizon AY, element composition using EDS analysis (5 points). Chemical composition according to energy dispersive X-ray spectrometry (EDX) data

Таблица 4. Содержание мышьяка в исследуемых почвах и железисто-сегрегированных элементах

Table 4. Arsenic content in the studied soils and iron-segregated elements

Горизонт Horizon	Глубина, см Depth, cm	% конкреций от мас- сы почвы nodules % in soil mass	As		
			в почве, мг/кг in soil, mg/kg	в конкрециях, мг/кг in nodules, mg/kg	в конкрециях от массы почвы, % in nodules in soil mass, %
Почва 1/3/Soil 1/3					
AY	0-15	11,21	33,0 ±1,00	20,5 ± 0,20	3,42
EL _g	15-30	1,17	5,30 ± 0,80	2,20 ± 0,50	0,27
Почва 2/5/Soil 2/5					
AY	4-12	8,81	1,80 ± 0,40	16,16 ± 0,01	57,86
EL _g	12-25	16,24	2,70 ± 0,50	22,56 ± 1,30	48,08
Почва 3/8/Soil 3/8					
AY	1-15	7,83	450,0 ± 1,50	74,5 ± 1,50	0,81
BEL _g	12-25	0,79	17,0 ± 0,50	16,8 ±0,80	1,22
Почва 4/11/Soil 4/11					
AY	5-11	1,39	150,0 ± 4,00	38,40 ± 1,50	0,51
EL	11-27	1,54	43,20 ± 0,02	14,50 ± 0,90	0,70
Почва 5/21/Soil 5/21					
AY	2-30	7,64	2,75 ± 0,30	9,05 ± 0,20	44,49
EL	30-38	0,75	2,50 ± 0,10	42,9 ± 1,20	8,22

Концентрация мышьяка в почве варьирует от 1,80 до 450,0 мг/кг почвы, превышение ПДК в 200 раз. Мышьяк концентрируется в основном в верхней почвенной толще (0–15 см), вниз по профилю наблюдается его снижение (табл. 4).

Содержание и распределение ортштейнов также зависит от многих факторов, одним из которых является чередование аэробных и анаэробных условий. В почвах хемогенно-сегрегированные элементы в основном образуются либо в 0–15 см толще, либо в средней части профиля на границе серогумусового и субэлювиального горизонтов (табл. 4).

В ходе исследования выявлена взаимосвязь между реакцией почвенного раствора и содержания мышьяка в ортштейнах от массы почвы. В сильно-кислых и кислых почвах (в радиусе до 5 км) адсорбируется максимальное его количество, за исключением разреза 8, где при тех же условиях показатель pH явно не способствует адсорбции, что, очевидно, связано с тем, что почвенный разрез имеет избыточное переувлажнение и даже в летний период почвенный профиль насыщен водой. В таких условиях в поверхностных горизонтах образуется грубогумусовые вещества (растительный детрит), которые в большей части адсорбируют на себе весь мышьяк.

На расстоянии от комбината более 5 км, разрез 8/21, такой зависимости не выявлено и содержание мышьяка в почвах значительно меньше (табл. 4). Процентное содержание конкреций в почвенном профиле также значительно ниже, и даже в условиях кислой реакции среды содержание мышьяка меньше.

Заключение

Анализ морфологических признаков исследуемых почв выявил различия в Luvisols, расположенных в непосредственной близости от комбината, и условно фоновых районах. Вследствие увеличения

кислотности почв под воздействием техногенных факторов заметно усиливается элювиальный процесс и увеличивается горизонт EL. С отдалением от комбината степень оподзолености снижается.

Мышьяк является неотъемлемым компонентом земной коры. При проявлении техногенеза его концентрации в экосистемах возрастают в том числе в почвах в сотни раз. Оказавшись совершенно в иных условиях, в почве он частично поглощается растениями, часть адсорбируется минеральной массой почвы. Одним из адсорбентов мышьяка являются железисто-марганцовистые ортштейны. Ортштейны обладают сложным физико-химическим и минералогическим составом, образуются в специфических условиях, обладают сложной структурой. Главным адсорбентом в ортштейнах являются соединения железа и марганца. В нашем исследовании во внутренней части ортштейнов мышьяк не выявлен, но в тот же момент его концентрация в конкрециях высока, что обусловлено поверхностной адсорбцией. Что свидетельствует о выступлении ортштейнов в качестве геохимических барьеров на пути миграции мышьяка в почве.

Изложенные результаты позволяют признать существование ряда закономерностей конкрециообразования и изменения свойств почв в зависимости от морфологических особенностей. Размер, форма, плотность претерпевают разные изменения в зависимости от условий почвообразования.

Тенденция аккумуляции мышьяка в хемогенно-сегрегированных элементах зависит в первую очередь от удаленности от источника загрязнения, а во вторую – от физических свойств. Наиболее интенсивно мышьяк накапливается в твердых хорошо сформированных конкрециях и составляет до 50 % от массы почвы, в рыхлых процесс аккумуляции слабый.

Кислотность почв также влияет на накопление мышьяка. В сильнокислых почвах, расположенных на удалении до 5 км, в хемогенно-сегрегированных элементах концентрируется до 50 % мышьяка от

массы почвы. В слабокислых почвах такой зависимости не выявлено. Конкреции являются своеобразным геохимическим барьером на пути миграции мышьяка в почвенном профиле.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Moulick D., Chowardhara B., Panda S.K. Agroecotoxicological aspect of arsenic (as) and cadmium // Plant-metal interactions, Cd on field crops and its mitigation: current status and future prospect / Eds. S. Srivastava, A.K. Srivastava, P. Suprasanna. – Germany: Springer Publ., 2019. – P. 217–246. DOI: 10.1007/978-3-030-20732-8_11
2. Окисление техногенных минеральных образований кислыми стоками сульфидных отвалов (на примере Карабашской агломерации) / М.В. Шабанов, М.С. Маричев, Т.М. Минкина, А.А. Соколов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 4. – С. 69–85. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_4_0_69.
3. Поступление тяжелых металлов в депонирующие среды Карабашской геотехногенной системы / М.В. Шабанов, М.С. Маричев, Т.М. Минкина, С.С. Манджиева, Д.Г. Невидомская // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 5. – С. 117–132. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_5_0_117.
4. Assessment of the impact of industry-related air emission of arsenic in the soils of forest ecosystems / M.V. Shabanov, M.S. Marichev, T.M. Minkina, S.S. Mandzhieva, D.G. Nevidomskaya // Forests. – 2023. – Vol. 14. – 632 p. DOI: 10.3390/f14030632
5. Barringer J.L., Reilly P.A. Arsenic in groundwater: a summary of sources and the biogeochemical and hydrogeologic factors affecting arsenic occurrence and mobility // Current Perspectives in Contaminant Hydrology and Water Resources Sustainability. – 2013. – P. 83–116. DOI: 10.5772/55354
6. Mandal B.K., Suzuki K.T. Arsenic round the world: a review // Talanta. – 2002. – Vol. 58. – P. 201–235. DOI: 10.1016/s0039-9140(02)00268-0
7. United States. Bureau of Mines. Mineral Facts and Problems. – Washington D.C., 1985. URL: <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc12817/> (дата обращения: 04.08.2023).
8. Shrivastava A., Barla A., Bose S. Arsenic contamination in shallow ground water and agricultural soil of Nadia block, West Bengal, India Front // Environ. Sci. – 2014. – Vol. 2. – P. 1–9. DOI: 10.3389/fenvs.2014.00050
9. Identifying the local influencing factors of arsenic concentration in suburban soil: a multiscale geographically weighted regression approach / Yu. Zhu, Bo. Liu, G. Jin, Z. Wu, D. Wang // Toxics. – 2024. – Vol. 12. – № 3. – P. 229. DOI: 10.3390/toxics12030229
10. Влияние кислых сульфатных вод на загрязнение почв террикона в Карабашском рудном районе / М.В. Шабанов, М.С. Маричев, Д.Г. Невидомская, Т.М. Минкина // Устойчивое развитие горных территорий. – 2023. – Т. 15. – № 4. – С. 888–900. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-4-888-900.
11. Формирование хемоземов в условиях длительного воздействия аэропромышленных выбросов горно-металлургического комбината / М.В. Шабанов, М.С. Маричев, С.С. Манджиева, А.А. Соколов // Устойчивое развитие горных территорий. – 2023. – Т. 15. – № 3. – С. 727–740. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-3-727-740.
12. Bissen M., Frimmel F.H. Arsenic – a review. Part I: occurrence, toxicity, speciation, mobility // Acta Hydrochimica et Hydrobiologica. – 2003. – Vol. 31. – P. 9–18. DOI: 10.1002/ahch.200390025
13. Elemental composition and geochemical characteristics of iron-manganese nodules in main soils of China / W.F. Tan, F. Liu, Y.H. Li, H.Q. Hu, Q.Y. Huang // Pedosphere. – 2006. – Vol. 16 (1). – P. 72–81. DOI: 10.1016/S1002-0160(06)60028-3
14. Szymański W., Skiba M. Distribution, morphology, and chemical composition of Fe-Mn nodules in Albeluvisols of the Carpathian Foothills, Poland // Pedosphere. – 2013. – Vol. 23 (4). – P. 445–454. DOI: doi.org/10.1016/s1002-0160(13)60037-5
15. Geochemical characteristics of selected elements in iron-manganese cutans and matrices of Alfisols in Central China / L. Huang, F. Liu, W. Tan, H. Hu, M.K. Wang // J. Geochem. Explor. – 2009. – Vol. 103. – P. 30–36. DOI: 10.1016/J.GEXPLO.2009.06.001
16. Szymański W., Skiba M., Blachowski A. Mineralogy of Fe-Mn nodules in Albeluvisols in the Carpathian Foothills, Poland // Geoderma. – 2014. – Vol. 217. – P. 102–110. DOI: 10.1016/j.geoderma.2013.11.008
17. Insights into the formation process and environmental fingerprints of iron-manganese nodules in subtropical soils of China / X. Yu, Y. Fu, P.C. Brookes, S.G. Lu // Soil Sci. Soc. Amer. J. – 2015. – Vol. 79. – P. 1101–1114. DOI: 10.2136/sssaj2015.01.0049
18. Manceau A., Lanson M., Geoffroy N. Natural speciation of Ni, Zn, Ba, and As in ferromanganese coatings on quartz using X-ray fluorescence, absorption, and diffraction // Geochim. Cosmochim. Acta. – 2007. – Vol. 71. – P. 95–128. DOI: 10.1016/j.gca.2006.08.036
19. Molecular scale speciation of Zn and Ni in soil ferromanganese nodules from Loess soils of the Mississippi basin / A. Manceau, N. Tamura, R.S. Celestre, A.A. Macdowell, N. Geoffroy, G. Sposito, H.A. Padmore // Environ. Sci. Technol. – 2003. – Vol. 37. – P. 75–80. DOI: 10.1021/es025748r
20. Marcus M.A., Toner B.M., Takahashi Y. Forms and distribution of Ce in a ferromanganese nodule // Mar. Chem. – 2018. – Vol. 202. – P. 58–66. DOI: 10.1016/j.marchem.2018.03.005
21. Jien S., Hseu Z., Chen Z. Hydrogeological implications of ferromanganiferous nodules in rice-growing Plinthitic Ultisols under different moisture regimes // Soil Sci. Soc. Amer. – 2010. – Vol. 74. – P. 880–891. DOI: 10.2136/sssaj2009.0020
22. О формах Fe-соединений в конкрециях из разных почв / В.Ф. Бабанин, Л.О. Карпачевский, А.А. Опапенко, С.А. Шоба // Почвоведение. – 1976. – № 5. – С. 132–138.
23. Богданов Н.И., Воропаева З.И. Марганцево-железистые конкреции в западносибирских черноземах как показатель их гидроморфности // Почвоведение. – 1969. – № 11. – С. 3–16.

24. Водяницкий Ю.А., Горшков А.И., Сивцов А.В. Особенности оксидогенеза марганца в почвах Русской равнины // Почвоведение. – 2002. – № 10. – С. 1171–1180.
25. Водяницкий Ю.Н. Состав Fe-Mn ортштейнов по результатам синхротронного рентгеновского анализа // Почвоведение. – 2006. – № 2. – С. 168–178.
26. Водяницкий Ю.Н., Зайдельман Ф.Р. Железистые и марганцевые минералы в конкрециях дерново-подзолистых почв разной степени оглеения на разных материнских породах // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, Почвоведение. – 2000. – № 3. – С. 3–14.
27. Зайдельман Ф.Р., Никифорова А.С. Влияние дренажа на свойства железомарганцевых конкреций // Почвоведение. – 1995. – № 3. – С. 337–343.
28. Зайдельман Ф.Р., Ковалев И.В. Влияние дренажа на состояние и строение конкреций в серых оглееных почвах // Почвоведение. – 1998. – № 9. – С. 1103–1111.
29. Зайдельман Ф.Р., Данилова Г.А. Влияние степени гидроморфизма на состав органического вещества новообразований дерново-подзолистых почв // Почвоведение. – 1992. – № 6. – С. 15–24.
30. Шабанов М.В., Маричев М.С. Геохимические аномалии тяжелых металлов в почвах природных и антропогенных ландшафтов (на примере Красноуральского промузла) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 6. – С. 230–239. DOI: 10.18799/24131830/2022/6/3545
31. Rudnic R. L., Gao S. Composition of the continental crust // Treatise on Geo-chemistry. The Crust. Elsevier Sci. – 2003. – Vol. 3. – P. 1–64. DOI: 10.1016/B0-08-043751-6/03016-4
32. Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. – Екатеринбург: Уро РАН, 2009. – 382 с.
33. Архипова А.А. Среднефоновые содержания элементов-примесей в минералах гнейсово-магматитовых комплексов фундамента Беларуси // Литосфера. – 1996. – № 5. – С. 130–139.
34. Лифшиц В.Г. Поверхность твердого тела и поверхностные фазы // Соровский образовательный журнал. – 1995. – № 1. – С. 99–107.

Информация об авторах

Михаил Викторович Шабанов, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры почвоведения и агрохимии, Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Россия, 196601, г. Санкт-Петербург, г. Пушкин, Петербургское шоссе, 2. geohim.spb@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4725-3673>

Максим Сергеевич Маричев, кандидат биологических наук, заведующий биохимической лабораторией, Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Россия, 196601, г. Санкт-Петербург, г. Пушкин, Петербургское шоссе, 2. m.s.marichev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0429-2234>

Поступила: 17.08.2023

Прошла рецензирование: 14.10.2023

Принята к публикации: 23.05.2024

REFERENCES

1. Moulick D., Chowardhara B., Panda S.K. Agroecotoxicological aspect of arsenic (as) and cadmium. *Plant-metal interactions, Cd on field crops and its mitigation: current status and future prospect*. Eds. S. Srivastava, A.K. Srivastava, P. Suprasanna. Germany, Springer, 2019. pp. 217–246. DOI: 10.1007/978-3-030-20732-8_11
2. Shabanov M.V., Marichev M.S., Minkina T.M., Sokolov A.A. Oxidation of manmade mineral formations with acid waste water at sulphide-containing waste dumps: a case study of Karabash agglomeration. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.*, 2024, vol. 4, pp. 69–85. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236_1493_2024_4_0_69
3. Shabanov M.V., Marichev M.S., Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Nevidomskaya D.G. Inflow of heavy metals to depositional environments at Karabash geotechnical system. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.*, 2024, vol. 5, pp. 117–132. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236_1493_2024_5_0_117
4. Shabanov M.V., Marichev M.S., Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Nevidomskaya D.G. Assessment of the impact of industry-related air emission of arsenic in the soils of forest ecosystems. *Forests*, 2023, vol. 14, no. 632. DOI: 10.3390/f14030632
5. Barringer J.L., Reilly P.A. Arsenic in groundwater: a summary of sources and the biogeochemical and hydrogeologic factors affecting arsenic occurrence and mobility. *Current Perspectives in Contaminant Hydrology and Water Resources Sustainability*, 2013, pp. 83–116. DOI: 10.5772/55354
6. Mandal B.K., Suzuki K.T. Arsenic round the world: a review. *Talanta*, 2002, vol. 58, pp. 201–235. DOI: 10.1016/S0039-9140(02)00268-0
7. United States. Bureau of Mines. *Mineral Facts and Problems*. 1985. Washington D.C. Available at: <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc12817/> (accessed August 4, 2023).
8. Shrivastava A., Barla A., Bose S. Arsenic contamination in shallow ground water and agricultural soil of Nadia block, West Bengal, India. *Front. Environ. Sci.*, 2014, vol. 2, pp. 1–9. DOI: 10.3389/fenvs.2014.00050
9. Zhu Yu., Liu Bo., Jin G., Wu Z., Wang D. Identifying the local influencing factors of arsenic concentration in suburban soil: a multiscale geographically weighted regression approach. *Toxics*, 2024, vol. 12, no. 3, p. 229. DOI: 10.3390/toxics12030229
10. Shabanov M.V., Marichev M.S., Nevidomskaya D.G., Minkina T.M. Acidic sulphate water influence on terricon soil pollution in the Karabash ore district. *Sustainable Development of Mountain Territories*, 2023, vol. 15, no. 4, pp. 888–900. (In Russ.) DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-4-888-900

11. Shabanov M.V., Marichev M.S., Mangiyeva S.S., Sokolov A.A. Chemozem formation under conditions of prolong exposure to aero-industrial emissions from a mining and smelting plant. *Sustainable Development of Mountain Territories*, 2023, vol. 15, no. 3, pp. 727–740. (In Russ.) DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-3-727-740
12. Bissen M., Frimmel F.H. Arsenic – a review. Part I: occurrence, toxicity, speciation, mobility. *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica*, 2003, vol. 31, pp. 9–18. DOI: 10.1002/ahch.200390025
13. Tan W.F., Liu F., Li Y.H., Hu H.Q., Huang Q.Y. Elemental composition and geochemical characteristics of iron-manganese nodules in main soils of China. *Pedosphere*, 2006, vol. 16 (1), pp. 72–81. DOI:10.1016/S1002-0160(06)60028-3
14. Szymański W., Skiba M. Distribution, morphology, and chemical composition of Fe-Mn nodules in Albeluvisols of the Carpathian Foothills, Poland. *Pedosphere*, 2013, vol. 23 (4), pp. 445–454. DOI: doi.org/10.1016/s1002-0160(13)60037-5
15. Huang L., Liu F., Tan W., Hu H., Wang M.K. Geochemical characteristics of selected elements in iron-manganese cutans and matrices of Alfisols in Central China. *J. Geochem. Explor.*, 2009, vol. 103, pp. 30–36. DOI: 10.1016/J.GEXPLO.2009.06.001
16. Szymański W., Skiba M., Blachowski A. Mineralogy of Fe-Mn nodules in Albeluvisols in the Carpathian Foothills, Poland. *Geoderma*, 2014, vol. 2017, pp. 102–110. DOI: 10.1016/j.geoderma.2013.11.008
17. Yu X., Fu Y., Brookes P.C., Lu S.G. Insights into the formation process and environmental fingerprints of iron-manganese nodules in subtropical soils of China. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 2015, vol. 79, pp. 1101–1114. DOI: 10.2136/sssaj2015.01.0049
18. Manceau A., Lanson M., Geoffroy N. Natural speciation of Ni, Zn, Ba, and As in ferromanganese coatings on quartz using X-ray fluorescence, absorption, and diffraction. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 2007, vol. 71, pp. 95–128. DOI: 10.1016/j.gca.2006.08.036
19. Manceau A., Tamura N., Celestre R.S., Macdowell A.A., Geoffroy N., Sposito G., Padmore H.A. Molecular scale speciation of Zn and Ni in soil ferromanganese nodules from Loess soils of the Mississippi basin. *Environ. Sci. Technol.*, 2003, vol. 37, pp. 75–80. DOI: 10.1021/es025748r
20. Marcus M.A., Toner B.M., Takahashi Y. Forms and distribution of Ce in a ferromanganese nodule. *Mar. Chem.*, 2018, vol. 202, pp. 58–66. DOI: 10.1016/j.marchem.2018.03.005
21. Jien S., Hseu Z., Chen Z. Hydopedological implications of ferromanganiferous nodules in rice-growing Plinthitic Ultisols under different moisture regimes. *Soil Sci. Soc. Amer.*, 2010, vol. 74, pp. 880–891. DOI: 10.2136/sssaj2009.0020
22. Babanin V.F., Karpachevsky L.O., Opalenko A.A., Shoba S.A. On the forms of Fe- compounds in nodules from different soils. *Soil Science*, 1976, no. 5. pp. 132–138. (In Russ.)
23. Bogdanov N.I., Voropaeva Z.I. Manganese-iron nodules in West Siberian chernozems as an indicator of their hydromorphism. *Soil Science*, 1969, no. 11. pp. 3–16. (In Russ.)
24. Vodyanitsky Yu.A., Gorshkov A.I., Sivtsov A.V. Features of manganese oxidogenesis in soils of the Russian Plain. *Soil Science*, 2002, no. 10, pp. 1171–1180. (In Russ.)
25. Vodyanitsky Yu.N. Composition of Fe-Mn orthosteins according to the results of synchrotron X-ray analysis. *Soil Science*, 2006, no. 2, pp. 168–178. (In Russ.)
26. Vodyanitsky Yu.N., Zaidelman F.R. Iron and manganese minerals in nodules of sod-podzolic soils of different degrees of starching on different meterine rocks. *Vestnik Mosk. unct. Ser. 17. Soil Science*, 2000, no. 3, pp. 3–14. (In Russ.)
27. Zaidelman F.R., Nikiforova A.S. Effect of drainage on the properties of ferromanganese nodules. *Soil Science*, 1995, no. 3, pp. 337–343. (In Russ.)
28. Zaidelman F.R., Kovalev I.V. Effect of drainage on the state and structure of nodules in grey ogleyen soils. *Soil Science*, 1998, no. 9, pp. 1103–1111. (In Russ.)
29. Zaidelman F.R., Danilova G.A. Influence of the degree of hydromorphism on the composition of organic matter of newly formed sod-podzolic soils. *Soil Science*, 1992, no. 6, pp. 15–24. (In Russ.)
30. Shabanov M.V., Marichev M.S. Geochemical anomalies of heavy metals in soils of natural and anthropogenic landscapes (by the example of Krasnouralsky industrial area). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 6, pp. 230–239. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2022/6/3545.
31. Rudnic R.L., Gao S. Composition of the continental crust. Treatise on Geo-chemistry. *The Crust. Elsevier Sci.*, 2003, vol. 3, pp. 1–64. DOI: 10.1016/B0-08-043751-6/03016-4
32. Grigoriev N.A. *Distribution of chemical elements in the upper part of the continental crust*. Yekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2009. 382 p. (In Russ.)
33. Arkhipova A.A. Mean background contents of element-impurities in minerals of gneiss-magmatite complexes of the basement of Belarus. *Lithosphere*, 1996, no. 5, pp. 130–139 (In Russ.)
34. Lifshits V.G. Solid state surface and surface phases. *Sorov Educational Journal*, 1995, no. 1, pp. 99–107. (In Russ.)

Information about the authors

Mikhail V. Shabanov, Cand. Sc., Associate Professor, St. Petersburg State Agrarian University, 2, Peterburgskoe highway, Pushkin, St. Petersburg, 196601, Russian Federation. geohim.spb@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4725-3673>.

Maksim S. Marichev, Cand. Sc., Head of Biochemical Laboratory, St. Petersburg State Agrarian University, 2, Peterburgskoe highway, Pushkin, St. Petersburg, 196601, Russian Federation. m.s.marichev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0429-2234>

Received: 17.08.2023

Revised: 14.10.2023

Accepted: 23.05.2024

УДК 66.091.3-997:546.05:621.03
DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4355
Шифр специальности ВАК: 2.4.9

Углеродные матрицы, допированные Sr, для использования в качестве электродов в радиоизотопных источниках электрической энергии

А.А. Аскарова¹, В.Н. Николкин¹, Д.С. Бутаков^{1✉}, Л.П. Синельников¹, В.Н. Рычков²

¹ АО «Институт реакторных материалов», Россия, г. Заречный

² Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, г. Екатеринбург

✉butakov_ds@irmatom.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена необходимостью создания новых безопасных источников энергии, способных удовлетворить нужды производства и медицины там, где применение традиционных источников энергии невозможно или нерентабельно. К числу таких источников могут быть отнесены радиоизотопные источники питания, в которых выработка энергии обеспечивается за счет естественного распада радионуклидов. Важнейшими составляющими источников тока типа суперконденсаторов являются электродные материалы, характеристики которых определяют электрофизические показатели радиоизотопных источников. В данной работе предложен способ синтеза углеродной матрицы, допированной Sr, для использования в качестве электродов радиоизотопных источников питания. *Цель:* разработка, освоение и оптимизация метода синтеза электродов радиоизотопных источников питания на основе углеродных материалов, допированных радиоизотопом Sr-90. *Объекты:* углеродный материал, допированный имитатором радиоизотопа Sr-90 (Sr стабильный). Углеродные матрицы получены карбонизацией резорцин-формальдегидной смолы, допированной солью стабильного стронция. *Методы:* сканирующая электронная микроскопия, низкотемпературная адсорбция-десорбция азота, циклическая вольтамперометрия, гальваностатический заряд-разряд, импедансная микроскопия. *Результаты.* Проведен синтез углеродной матрицы, допированной стабильным изотопом стронция, методом полукарбонизации с последующей физической активацией углекислым газом. Исследованы структура, пористость и электрохимические характеристики материала. Установлено, что физическая активация положительно сказывается на развитии удельной площади поверхности и мезопористости образцов синтезированной матрицы, вследствие чего улучшаются ее электрохимические характеристики. Метод физической активации предложен в качестве наиболее предпочтительного для синтеза углеродной матрицы, допированной изотопами стронция, для применения в качестве электродов радиоизотопных источников питания.

Ключевые слова: радиоизотопный источник, углеродная матрица, резорцин-формальдегидная смола, изотоп стронция, физическая активация, площадь поверхности, мезопористость, электрическая емкость

Для цитирования: Углеродные матрицы, допированные Sr, для использования в качестве электродов в радиоизотопных источниках электрической энергии / А.А. Аскарова, В.Н. Николкин, Д.С. Бутаков, Л.П. Синельников, В.Н. Рычков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 6. – С. 135–142. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4355

UDC 66.091.3-997:546.05:621.03
DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4355

Sr-doped carbon matrices for use as electrodes in autonomous electrical energy sources

A.A. Askarova¹, V.N. Nikolkin¹, D.S. Butakov^{1✉}, L.P. Sinelnikov¹, V.N. Rychkov²

¹ Institute of Reactor Materials, Zarechny, Russian Federation

² Ural Federal University, Yekaterinburg, Russian Federation

✉butakov_ds@irmatom.ru

Abstract. Relevance. The necessity to create new safe energy sources that can meet the needs of production and medicine where the use of traditional energy sources is impossible or unprofitable. Such sources may include radioisotope power sources, in which energy production is ensured by the natural decay of radionuclides. The most important components of current sources such as supercapacitors are electrode materials, the characteristics of which determine the electrophysical characteristics of radioisotope sources. This work proposes a method for synthesizing a carbon matrix doped with Sr for use as electrodes of radioisotope power sources. **Aim.** Development, mastery and optimization of a method for synthesizing electrodes of radioisotope power sources based on carbon materials doped with the Sr-90 radioisotope. **Objects.** Carbon material doped with a radioisotope simulant Sr-90 (Sr stable). Carbon matrices were obtained by carbonizing a resorcinol-formaldehyde resin doped with a stable strontium salt. **Methods.** Scanning electron microscopy, low-temperature adsorption-desorption of nitrogen, cyclic voltammetry, galvanostatic charge-discharge, impedance microscopy. **Results.** A carbon matrix doped with a stable strontium isotope was synthesized by the method of semi-carbonization followed by physical activation with carbon dioxide. The structure, porosity and electrochemical characteristics of the material were studied. It was established that physical activation has a positive effect on the development of the specific surface area and mesoporosity of the samples of the synthesized matrix, as a result of which its electrochemical characteristics are improved. The method of physical activation is proposed as the most preferable for the synthesis of a carbon matrix doped with strontium isotopes for use as electrodes of radioisotope power supplies.

Keywords: radioisotope source, carbon matrix, resorcinol-formaldehyde resin, Sr isotope, physical activation, surface area, mesoporosity, electrical capacitance

For citation: Askarova A.A., Nikolkin V.N., Butakov D.S., Sinelnikov L.P., Rychkov V.N. Sr-doped carbon matrices for use as electrodes in autonomous electrical energy sources. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 6, pp. 135–142. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4355

Введение

В последние годы большое внимание уделяется разработке источников питания различных конструкций, обеспечивающих выработку энергии потребителю в течение длительного времени без подзарядки от внешнего источника электрического тока. С этой целью ведутся активные работы по созданию источников электрической энергии, основанных на прямом преобразовании энергии радиоактивного распада природных и искусственных радионуклидов [1]. В качестве источника излучения в таких источниках питания с многолетним ресурсом эксплуатации перспективным является использование ^{90}Sr , обладающего доступностью и относительно низкой стоимостью [2]. Для его практического применения в электродах разрабатываемых источников питания конденсаторного типа необходима разработка обладающей оптимальными свойствами специальной матрицы, допированной ^{90}Sr радионуклидом. В качестве электродных материалов часто используют углеродные материалы, полученные из различных прекурсоров. Многообразие аллотропных модификаций и морфологических типов делает углерод весьма перспективным для электрохимических областей применения: углеродные электроды хорошо поляризуются, являются химически инертными, устойчивы в широком диапазоне температур, амфотерность углерода позволяет использовать его как в качестве катода, так и в качестве анода [3].

Для синтеза углеродного материала, обладающего высокой емкостью, необходимо сформировать матрицу, обладающую большой площадью поверхности и определенным типом пор [4]. В настоящее время известны такие методы синтеза углеродных материалов с большой площадью по-

верхности, как методы жестких [5–8] и мягких шаблонов [9–11], гидротермальной обработки [6, 12–14] и методы химической [15–19] и физической [8, 15, 20] активации.

Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки. В случае изготовления радиоизотопных источников питания (РИП) необходимо создание электродов на основе углеродных матриц, допированных радиоактивными источниками излучения. Методы, предполагающие использование кислот и ультразвука [6, 8, 15] для выщелачивания порообразователей (методы жесткого шаблона и химической активации), не могут быть использованы из-за возможного вымывания радионуклида из матрицы. Метод гидротермальной обработки не может быть использован, так как повышенная температура будет способствовать выщелачиванию допированного материала. Методы мягких шаблонов и химического осаждения из газовой фазы относятся к весьма дорогостоящим. В качестве наиболее перспективной технологии изготовления углеродных матриц рассматривается метод физической активации с использованием в качестве активирующего газа диоксида углерода или другого окисляющего газа при высоких температурах (750–1000 °C) с целью развития пористой иерархической структуры. В основе метода физической активации лежит реакция (1) частичного окисления углерода в присутствии окисляющего газа:



По сравнению с другими методами этот метод является наиболее простым и менее затратным, предполагает использование недорогого сырья и характеризуется достижением высокой удельной

площади поверхности (до 1000 м²/г) [4, 21]. Данный метод является термохимическим, так как сочетает в себе воздействие повышенной температуры и процесса окисления. Однако в литературе наиболее часто применяется термин «физическая активация» [15, 20, 21], поэтому при описании настоящего подхода использована устоявшаяся терминология.

В настоящей работе для исследования процесса изготовления РИП конденсаторного типа на основе углеродных матриц выполнен синтез углеродного материала, допированного имитатором изотопа Sr-90 – стабильным Sr, и проведена его активация для получения высокой удельной площади поверхности и пористости. Из полученного материала сформированы электроды, изготовлена двухэлектродная ячейка, и определены её электрические характеристики.

Материалы и методы

Для получения углеродной матрицы осуществлена следующая последовательность операций. В водном растворе объемом 3 мл SrCl₂, содержащем 2,56 мг стабильного стронция, растворяли 0,33 г резорцина. Далее к раствору прибавляли 1 мл раствора формалина с массовой концентрацией 37 %. Полученный трехкомпонентный раствор полимеризовали при 60 °С в закрытом состоянии 24 часа, далее при той же температуре в открытом виде в течение 24 часов.

Изготовленный порошок резорцин-формальдегидной смолы (РФС) подвергали последовательной карбонизации при 500 °С, затем при 900 °С в вакууме. Выдержка на каждом этапе составляла 1 ч, скорость нагрева 5 °С/мин. Процедура приготовления образца РФС+СО₂ отличалась тем, что на этапе обжига при 900 °С для активации поверхности выполнена обработка углеродной матрицы в среде СО₂.

Микроструктура обожженных порошков изучалась с использованием сканирующего электронного микроскопа TESCAN Mira 3.

Удельную площадь поверхности и пористость образцов после обжига исследовали методом низкотемпературной адсорбции-десорбции азота с применением анализатора сорбции газов Nova 1200e фирмы Quantachrome.

Электрохимические характеристики (вольтамперометрия, циклы зарядки-разрядки, импедансная спектроскопия) были определены при помощи электрохимической станции Zive-MP2 по двухэлектродной схеме. Электроды для исследований получены с использованием порошка РФС и суспензии политетрафторэтилена методом каландрирования. Содержание порошка углеродного материала, полученного из резорцино-формальдегидной смолы, в электроде составляло 75–85 %.

Удельная электрическая емкость одного электрода рассчитана согласно уравнению (2) [6, 7, 17]:

$$C_{single} = \frac{2 \cdot I \cdot t}{\Delta U \cdot m}, \quad (2)$$

где I – ток разряда, А; t – время разряда, с; ΔU – падение напряжения, В; m – масса одного электрода, г.

Результаты исследования

Для изучения структуры поверхности образцов порошка резорцин-формальдегидной смолы после карбонизации получены изображения SEM, представленные на рис. 1, *a–d*. Принципиального различия структуры между РФС и РФС+СО₂ на уровне 50 мкм не обнаружено. Обоим материалам свойственна развитая поверхность и рыхлая структура, сформированная конгломерацией сферических микрочастиц размером около 1 мкм. Предполагается, что углеродный материал с такой структурой будет свободно контактировать с ионами электролита в электрохимической ячейке. Однако для РФС+СО₂ характерен несколько меньший размер частиц и большая неоднородность и пористость поверхности. Эти отличия, вероятно, вызваны частичным разрушением структуры РФС при активации окисляющим газом.

Исследование влияния физической активации с применением активирующего газа СО₂ на пористую структуру и состояние поверхности образцов РФС проведено при помощи методов ВЕТ и ВЖН. Как показано на рис. 2, *a*, для обоих материалов измеряемая величина быстро возрастает в интервале низких давлений <0,3 Р/Р₀, указывая на то, что поверхность образцов принадлежит к Н1 типу петель гистерезиса (согласно классификации IUPAC), что характерно для адсорбции в микропорах. Эти данные согласуются с данными кривых распределения пор по размерам, представленными на рис. 2, *b*. В действительности практически все поры, сформировавшиеся в процессе изготовления РФС и РФС+СО₂, являются микропорами. Полученные результаты измерений свидетельствуют о довольно узком интервале распределения пор по размерам: диаметр пор изменяется от 0,7 до 3 нм ($D_{meso}=2–50$ нм).

Результаты исследований удельной площади поверхности и объема пор для образцов материалов представлены в табл. 1. Удельная площадь поверхности для РФС составила 664 м²/г. Вклад микропор в общий объем пор для материала составляет 51 %. Для образца РФС+СО₂ измеренная удельная площадь поверхности составляет 1315 м²/г, при этом вклад микропор уменьшается и составляет 43 %. Полученные данные измерений свидетельствуют, что объем пор РФС+СО₂ практически в два раза превышает значения величины пористости для РФС. Таким образом, применение физической активации существенно увеличивает удельную площадь поверхности и объема пор РФС+СО₂.

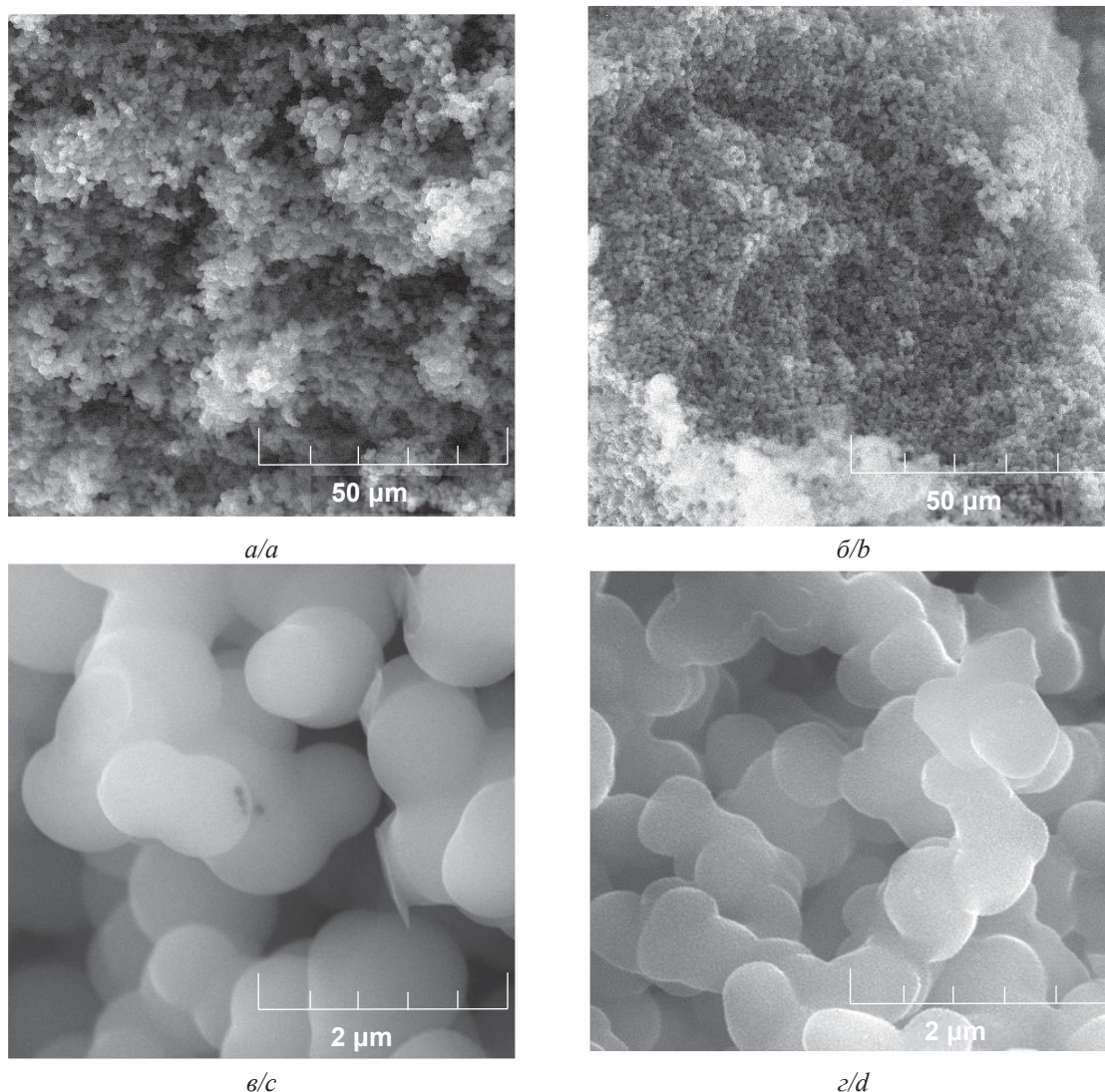


Рис. 1. Фотографии, полученные при помощи сканирующего электронного микроскопа, образцов РФС (а, в) и РФС+СО₂ (б, г)
Fig. 1. Photographs obtained using a scanning electron microscope, samples of PFC (a, c) and PFC+CO₂ (b, d)

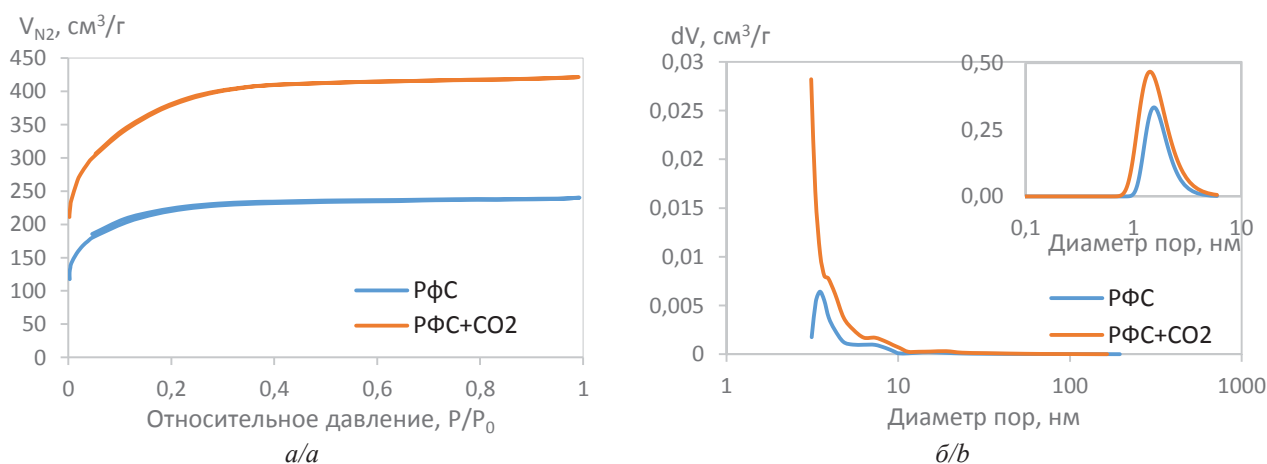


Рис. 2. Кривые определения характеристик поверхности: а) изотермы адсорбции-десорбции N₂; б) распределение мезопор по размерам (микропоры во вставке)
Fig. 2. Curves for determination of surface characteristics a) adsorption-desorption isotherms of N₂; b) size distribution of mesopores of pores (micropores in the insert)

Таблица 1. Характеристики пористости и поверхности РФС и РФС+CO₂

Table 1. Characteristics of porosity and surface of РФС and РФС+CO₂

Образец Sample	Удельная площадь поверхности, м ² /г Specific surface area, m ² /g	Общий объем пор, см ³ /г Total pore volume, cm ³ /g	Объем микропор, см ³ /г Micropore volume, cm ³ /g	Доля микропор, % Microporosity fraction, %
РФС	664	0,372	0,199	51
РФС+CO ₂	1315	0,652	0,281	43

Электрохимические характеристики РФС и РФС+CO₂ исследовали в двухэлектродной ячейке. В качестве электролита использовали 1М раствор H₂SO₄ и ионную жидкость 1-бутил 3-метилимидазолия трифторметансульфата, растворенную в пропилен-карбонате с массовым соотношением 3:1 (далее в тексте – органический электролит). Для водного электролита окно напряжений составило 0-1 В, для органического – 0-2 В. На рис. 3, а, б показаны циклы вольтамперометрии в водном и органическом электролитах при скорости сканирования 3 мВ/с. Для образца РФС+CO₂ при проведении вольтамперометрических исследований получена более широкая площадь циклограммы, что характерно для высокой электрической емкости материала. Для данного образца наблюдается циклическая кривая, близкая к прямоугольной, что свойственно для суперконденсаторов с двойным электрическим слоем на поверхности электродов. Узкая циклограмма на графике, полученная при исследовании образца РФС, вероятно, является следствием большого количества микропор в материале и практически полного отсутствия мезопор, препятствующих образованию двойного электрического слоя на поверхности. Скругление вольтамперометрического цикла РФС+CO₂ при использо-

вании органического электролита обусловлено затруднением диффузии крупных ионов органического электролита в порах материала.

Гальваностатические кривые заряда-разряда получены при токах 1 мА/с и представлены на рис. 4, а, б для водного и органического электролитов. Можно отметить, что для кривых РФС+CO₂ характерна практически треугольная форма кривой. Это подтверждает предположения о простой диффузии ионов электролита по порам образцов и высокой обратимости заряда электрода, обнаруженной по результатам циклической вольтамперометрии. Падение напряжения в водном электролите H₂SO₄, соответствующее величине последовательного сопротивления ячейки, составило 0,321 и 0,008 В для РФС и РФС+CO₂ соответственно. Значения падения напряжения для этих же образцов в органическом электролите характеризуется величинами 0,368 и 0,138 В.

В табл. 2 представлены величины электрических емкостей образцов электродов РФС и РФС+CO₂ в различных средах. Электрическая емкость образца РФС в среде водного электролита практически в 30 раз превышает аналогичный параметр в органическом электролите. Для РФС+CO₂ эта разница сокращается до двух. Указанный факт подтверждает наличие более доступных пор в структуре образца РФС+CO₂, что облегчает диффузию крупных ионов органического электролита.

Таблица 2. Емкость образцов РФС и РФС+CO₂ в различных средах

Table 2. Capacity of РФС and РФС+CO₂ samples in various environments

Образец Sample	Емкость электрода, Ф/г/Electrode capacity, F/g	
	Раствор 1 М H ₂ SO ₄ Solution 1 M H ₂ SO ₄	Ионная жидкость Ionic liquid
РФС	8,7	0,3
РФС+CO ₂	84,3	47,8

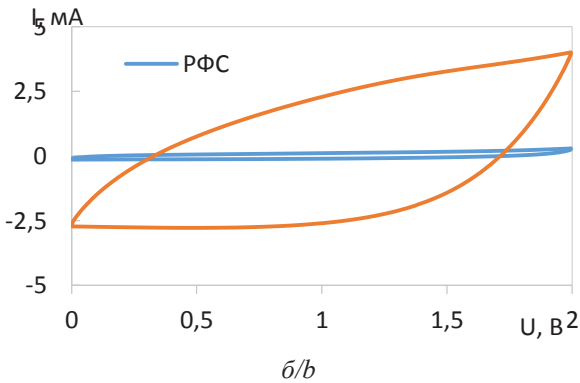
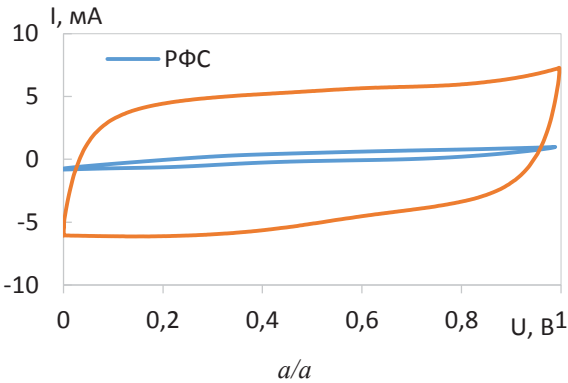


Рис. 3. Вольтамперометрические циклы РФС и РФС+CO₂: а) в 1М растворе H₂SO₄; б) в органическом электролите
Fig. 3. Voltammetric cycles of РФС and РФС+CO₂: а) in 1M H₂SO₄ solution; б) in organic electrolyte

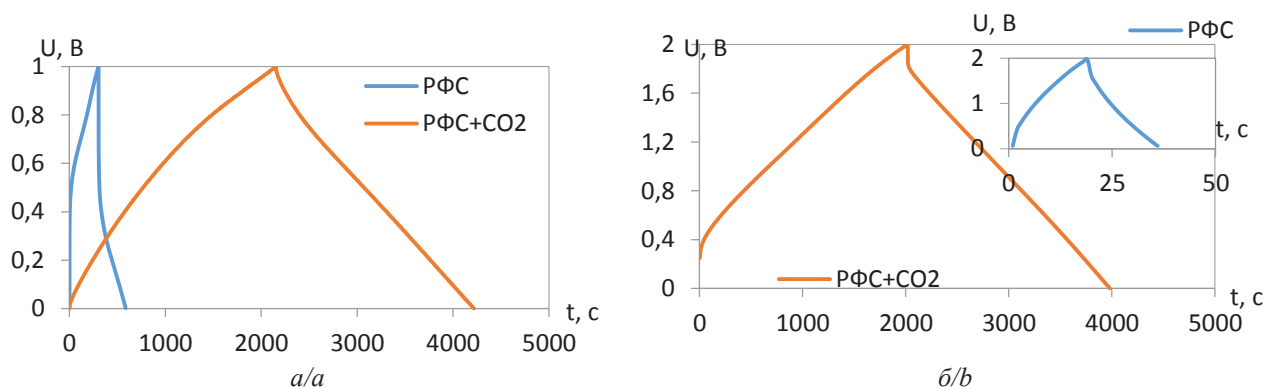


Рис. 4. Циклы заряда-разряда РФС и РФС+СО₂: а) в 1М растворе Н₂SO₄; б) в органическом электролите
Fig. 4. Charge-discharge cycles of PFC and PFC+CO₂: a) in 1M H₂SO₄ solution; b) in organic electrolyte

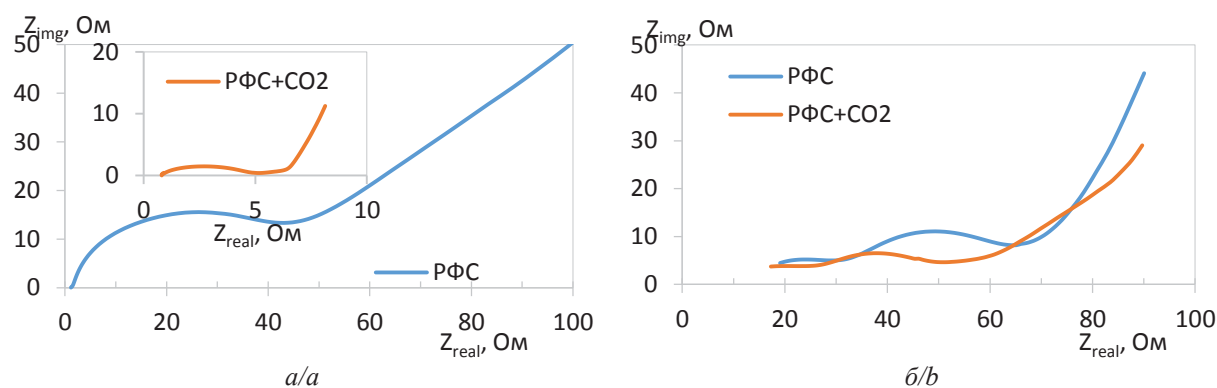


Рис. 5. Кривые импедансной спектроскопии РФС и РФС+СО₂: а) в 1М растворе Н₂SO₄; б) в органическом электролите
Fig. 5. Impedance spectroscopy curves for PFC and PFC+CO₂: a) in 1M H₂SO₄ solution; b) in organic electrolyte

Импедансная спектроскопия позволяет определить последовательное сопротивление R_s ячейки, которому соответствует контактное сопротивление проводов и корпуса ячейки, R_p сопротивление переноса заряда через двойной слой электрода и сопротивление диффузии ионов электролита.

Результаты импедансной спектроскопии представлены на рис. 5, а, б. Сопротивление R_s для электродов с РФС и РФС+СО₂ составляет 59 и 5 Ом в 1 М Н₂SO₄ и 74 и 55 Ом в органическом электролите соответственно. Для образца РФС+СО₂ в Н₂SO₄ характерен самый крутой наклон кривой, что свойственно для высокой скорости диффузии ионов электролита.

Обсуждение и заключение

В данной работе образцы углеродной матрицы, содержащей Sr, были синтезированы двумя способами: путем непосредственной карбонизации и с применением дополнительной физической активации с использованием СО₂ в качестве активирующего газа. Полученные экспериментальные результаты исследований показывают, что материалом с наилучшими характеристиками был образец после физической активации, удельная площадь поверхности и объем пор которого составляли 1315 м²/г и 0,652 см³/г. Так-

же для данного образца характерна наибольшая удельная электрическая емкость электрода 84,3 Ф/г. Электрическая емкость углеродной матрицы составляет 99,2 Ф/г. Данный эффект является результатом частичного разрушения поверхности углеродного материала в процессе физической активации, сопровождающегося улучшением поверхностных характеристик и, как следствие, повышением доступности поверхности материала ионам электролита.

Полученный результат близок к известным данным, имеющимися в зарубежной литературе, где говорится о величинах удельной площади поверхности 700–2000 м²/г и объемах пор 0,6–2,3 см³/г; удельная электрическая емкость данных материалов составляет от 100 до 110 Ф/г [8, 15, 20]. Таким образом, углеродная матрица, полученная в данной работе, соответствует техническому результату, достигнутому научным сообществом.

Подводя итог, можно отметить, что углеродная матрица, полученная путем предварительной карбонизации РФС с последующей физической активацией в атмосфере СО₂, является наиболее подходящим из исследованных материалов для допирования изотопом ⁹⁰Sr с целью применения в радиоизотопных источниках питания конденсаторного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиоизотопные автономные источники питания (АИП): аналитический отчет / Н.В. Архангельский, А.В. Пономарев, Д.И. Сафиканов, П.Б. Птицын. – М.: ЦАИР, частное учреждение «Наука и инновации», 2021. – 101 с.
2. Наноструктурированные источники тока, возбуждаемые β -излучением, на основе углеродных нанотрубок / А.Н. Сауров, С.В. Булярский, В.Д. Рисованный и др. // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2015 – Т. 20 – № 5. – С. 474–480. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/nanostrukturirovannye-istochniki-toka-vozbuzhdaemye-izlucheniem-na-osnove-uglerodnyh-nanotrubok/viewer> (дата обращения 03.07.2023).
3. Шорникова О.Н., Максимова Н.В., Авдеев В.В. Связующие для полимерных композиционных материалов. – М.: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 2010. – 52 с. URL: <http://nano.msu.ru/files/master/I/materials/electrochemicalcapacitors.pdf> (дата обращения 16.06.2023).
4. P-doped hierarchical porous carbon aerogels derived from phenolic resins for high performance supercapacitor / Jia Guo, Dongling Wu, Tao Wang and et al. // Applied Surface Science. – 2019. – № 475. – P. 59–66.
5. High-capacitance KOH-activated nitrogen-containing porous carbon material from waste coffee grounds in supercapacitor / Chen-Hao Wang, Wei-Chen Wen, Hsin-Cheng Hsu and et al. // Advanced Powder Technology. – 2016. – Vol. 4. – P. 1387–1395.
6. Activated carbon xerogels derived from phenolic oil: basic catalysis synthesis and electrochemical performance / A. Sanchez-Sanchez, M.T. Izquierdo, S. Mathieu and et al. // Fuel Processing Technology. – 2020. – Vol. 205. – P. 1–12.
7. Facile preparation of water soluble phenol formaldehyde resin-derived activated carbon by Na_2CO_3 activation for high performance supercapacitor / Jinliang Zhang, Wenfeng Zhang, Hao Zhang and et al. // Materials Letters. – 2017. – Vol. 206. – P. 67–70.
8. Phenol-formaldehyde-resin-based activated carbons with controlled pore size distribution for high-performance supercapacitors / Neetu Talreja, Sung Hoon Jung, Le Thi Hai Yen and et al. // Chemical Engineering Journal. – 2020. – Vol. 379. – P. 1–10.
9. One-pot synthesis of monodisperse phenolic resin spheres with high thermal stability and its derived carbon spheres as supercapacitor electrodes / Zhongguan Liang, Hui Xia, Luomeng Zhang and et al. // Results in Physics. – 2020. – Vol. 16. – P. 1–8.
10. Highly ordered mesoporous phenol-formaldehyde carbon as supercapacitor electrode material / Tingwei Cai, Min Zhou, Dayong Ren and et al. // Journal of Power Sources. – 2013. – Vol. 231. – P. 197–202.
11. Rich nitrogen-doped ordered mesoporous phenolic resin-based carbon for supercapacitors / Hao Chen, Min Zhou, Zhao Wang and et al. // Electrochimica Acta. – 2014. – Vol. 148. – P. 187–194.
12. Preparation and electrochemical performance of activated carbon microspheres from recycled novolak phenol formaldehyde / Mingjie Guan, Hui Li, Xianwen Chen and et al. // Waste Management. – 2021. – Vol. 201. – P. 635–641.
13. A novel synthesis of hierarchical porous carbons from interpenetrating polymer networks / Dazhang Zhu, Yawei Wang, Wenjing Lu and et al. // Carbon. – 2017. – Vol. 111. – P. 667–674.
14. Hydrothermal preparation of carbon microspheres from mono-saccharides and phenolic compounds / J.H. Ryu, Y.W. Suh, D.J. Suh and et al. // Carbon. – 2010. – Vol. 48. – P. 1990–1998.
15. Physical and chemical activation of graphene-derived porous nanomaterials for post-combustion carbon dioxide capture / R. Mohd Firdaus, A. Desforges, M. Emo and et al. // Nanomaterials. – 2021. – Vol. 11. – P. 1–14.
16. Hierarchically Fe-doped porous carbon derived from phenolic resin for high performance supercapacitor / Xiaoxi Dong, Jingyue Wang, Meifang Yan and et al. // Ceramics International. – 2021. – Vol. 47. – P. 5998–6009.
17. Increase of porosity by combining semi-carbonization and KOH activation of formaldehyde resins to prepare high surface area carbons for supercapacitor applications / R. Heimböckel, S. Kraas, F. Hoffmann and et al. // Applied Surface Science. – 2018. – Vol. 427. – P. 1055–1064.
18. Biomass-derived porous carbons with tailored graphitization degree and pore size distribution for supercapacitors with ultra-high rate capability / Jingjing He, Deyi Zhang, Yulin Wang and et al. // Applied Surface Science. – 2020. – Vol. 515. – P. 1–12.
19. Activated carbons with well-developed mesoporosity prepared by activation with different alkali salts / Yuan Gao, Qinyan Yue, Shiping Xu and et al. // Materials Letters. – 2015. – Vol. 146. – P. 34–36.
20. Comparison studies on pore development mechanisms of activated hard carbons from polymeric resins and their applications for electrode materials / Hye-Min Lee, Kay-Hyeok An, Dong-Cul Chung and et al. // Renewable Energy. – 2019. – Vol. 144. – P. 116–122.
21. Díez N., Sevilla M., Fuertes A.B. Dense (non-hollow) carbon nanospheres: synthesis and electrochemical energy applications // Materials Today Nano. – 2021. – Vol. 16. – P. 1–32.

Информация об авторах

Анна Александровна Аскарова, инженер лаборатории радиоизотопных источников питания АО «Институт реакторных материалов», Россия, 624250, г. Заречный, askarova_aa@irmatom.ru

Виктор Николаевич Николкин, старший научный сотрудник лаборатории радиоизотопных источников питания АО «Институт реакторных материалов», Россия, 624250, г. Заречный, nikolkin_vn@irmatom.ru

Денис Сергеевич Бутаков, начальник лаборатории радиоизотопных источников питания АО «Институт реакторных материалов», Россия, 624250, г. Заречный, butakov_ds@irmatom.ru

Леонид Прокопьевич Синельников, кандидат технических наук, ученый секретарь, ведущий научный сотрудник АО «Институт реакторных материалов», Россия, 624250, г. Заречный, sinelnikov_lp@irmatom.ru

Владимир Николаевич Рычков, доктор химических наук, профессор кафедры редких металлов и наноматериалов Физико-технологического института, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620078, г. Екатеринбург, ул. Мира, 21. v.n.rychkov@urfu.ru

Поступила: 14.08.2023

Прошла рецензирование: 17.09.2023

Принята к публикации: 23.05.2024

REFERENCES

1. Arkhangelsky N.V., Ponomarev A.V., Safikanov D.I., Ptitsyn P.B. *Radioisotope Autonomous Power Sources (AIP). Analytical report*. Moscow, TSAIR, private institution "Science and Innovations" Publ., 2021. 101 p.
2. Saurov A.N., Bulyarskii S.V., Risovany V.D. Nanostructured current sources excited by β -radiation based on carbon nanotubes. *Electronics*, 2015, vol. 20, no. 5, pp. 474–480. (In Russ.) Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/nanostrukturirovannyye-istochniki-toka-vozbuzhdaemye-izlucheniem-na-osnove-uglerodnyh-nanotrubok/viewer> (accessed 3 July 2023).
3. Shornikova O.N., Maksimova N.V., Avdeev V.V. *Binders for polymer composite materials*. Moscow, State University named after M.V. Lomonosov Publ., 2010. 52 p. (In Russ.) Available at: http://nano.msu.ru/files/master/I/materials/electrochemical_capacitors.pdf (accessed 16 June 2023).
4. Jia Guo, Dongling Wu, Tao Wang. P-doped hierarchical porous carbon aerogels derived from phenolic resins for high performance supercapacitor. *Applied Surface Science*, 2019, vol. 475, pp. 59–66.
5. Chen-Hao Wang, Wei-Chen Wen, Hsin-Cheng Hsu. High-capacitance KOH-activated nitrogen-containing porous carbon material from waste coffee grounds in supercapacitor. *Advanced Powder Technology*, 2016, vol. 27, no. 4, pp. 1387–1395.
6. Sanchez-Sanchez A., Izquierdo M.T., Mathieu S. Activated carbon xerogels derived from phenolic oil: Basic catalysis synthesis and electrochemical performance. *Fuel Processing Technology*, 2020, vol. 205, pp. 1–12.
7. Jinliang Zhang, Wenfeng Zhang, HaoZhang. Facile preparation of water soluble phenol formaldehyde resin-derived activated carbon by Na_2CO_3 activation for high performance supercapacitor. *Materials Letters*, 2017, vol. 206, pp. 67–70.
8. Neetu Talreja, Sung Hoon Jung, Le Thi Hai Yen. Phenol-formaldehyde-resin-based activated carbons with controlled pore size distribution for high-performance supercapacitors. *Chemical Engineering Journal*, 2020, vol. 379, pp. 1–10.
9. Zhongguan Liang, Hui Xia, Luomeng Zhang. One-pot synthesis of monodisperse phenolic resin spheres with high thermal stability and its derived carbon spheres as supercapacitor electrodes. *Results in Physics*, 2020, vol. 16, pp. 1–8.
10. Tingwei Cai, Min Zhou, Dayong Ren. Highly ordered mesoporous phenol–formaldehyde carbon as supercapacitor electrode material. *Journal of Power Sources*, 2013, vol. 231, pp. 197–202.
11. Hao Chen, Min Zhou, Zhao Wang. Rich nitrogen-doped ordered mesoporous phenolic resin-based carbon for supercapacitors. *Electrochimica Acta*, 2014, vol. 148, pp. 187–194.
12. Mingjie Guan, Hui Li, Xianwen Chen. Preparation and electrochemical performance of activated carbon microspheres from recycled novolak phenol formaldehyde. *Waste Management*, 2021, vol. 120, pp. 635–641.
13. Dazhang Zhu, Yawei Wang, Wenjing Lu. A novel synthesis of hierarchical porous carbons from interpenetrating polymer networks. *Carbon*, 2017, vol. 111, pp. 667–674.
14. Ryu J.H., Suh Y.W., Suh D.J. Hydrothermal preparation of carbon microspheres from mono-saccharides and phenolic compounds. *Carbon*, 2010, vol. 48, no. 7, pp. 1990–1998.
15. Mohd Firdaus R., Desforges A., Emo M. Physical and chemical activation of graphene-derived porous nanomaterials for post-combustion carbon dioxide capture. *Nanomaterials*, 2021, vol. 11, no. 9, pp. 1–14.
16. Xiaoxi Dong, Jingyue Wang, Meifang Yan. Hierarchically Fe-doped porous carbon derived from phenolic resin for high performance supercapacitor. *Ceramics International*, 2021, vol. 47, no. 5, pp. 5998–6009.
17. Heimböckel R., Kraas S., Hoffmann F. Increase of porosity by combining semi-carbonization and KOH activation of formaldehyde resins to prepare high surface area carbons for supercapacitor applications. *Applied Surface Science*, 2018, vol. 427, pp. 1055–1064.
18. Jingjing He, Deyi Zhang, Yulin Wang. Biomass-derived porous carbons with tailored graphitization degree and pore size distribution for supercapacitors with ultra-high rate capability. *Applied Surface Science*, 2020, vol. 515, pp. 1–12.
19. Yuan Gao, Qinyan Yue, Shiping Xu. Activated carbons with well-developed mesoporosity prepared by activation with different alkali salts. *Materials Letters*, 2015, vol. 146, pp. 34–36.
20. Hye-Min Lee, Kay-Hyeok An, Dong-Cul Chung. Comparison studies on pore development mechanisms of activated hard carbons from polymeric resins and their applications for electrode materials. *Renewable Energy*, 2019, vol. 144, pp. 116–122.
21. Díez N., Sevilla M., Fuertes A.B. Dense (non-hollow) carbon nanospheres: synthesis and electrochemical energy applications. *Materials Today Nano*, 2021, vol. 16, pp. 1–32.

Information about the authors

Anna A. Askarova, Engineer, Institute of Reactor Materials, Zarechny, 624250, Russian Federation. askarova_aa@irmatom.ru

Viktor N. Nikolkin, Senior Researcher, Institute of Reactor Materials, Zarechny, 624250, Russian Federation. Nikolkin_vn@irmatom.ru

Denis S. Butakov, Head of the Laboratory, Institute of Reactor Materials, Zarechny, 624250, Russian Federation. butakov_ds@irmatom.ru

Leonid P. Sinelnikov, Dr. Sc., Leading Researcher, Institute of Reactor Materials, Zarechny, 624250, Russian Federation. sinelnikov_lp@irmatom.ru

Vladimir N. Rychkov, Dr. Sc., Professor, Ural Federal University, 21, Mira street, Yekaterinburg, 620078, Russian Federation. v.n.rychkov@urfu.ru

Received: 14.08.2023

Revised: 17.09.2023

Accepted: 23.05.2024

УДК 551.734:551.83:552.513:553.81

DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4369

Шифр специальности ВАК: 1.6.1 (25.00.01)

Результаты изучения разреза «Южная Рассольная» такатинской свиты на территории Полюдово-Колчимского антиклинория Западно-Уральской зоны складчатости (Красновишерский район Пермского края)

Ю.Г. Пактовский¹, А.В. Плюснин^{2✉}, Е.М. Томилина¹, Д.А. Староселец²,
И.В. Афонин³, Е.С. Рабцевич³, А.И. Сулима¹, В.А. Чуйко⁴

¹ Пермский Государственный национальный исследовательский университет им. А.М. Горького,
Россия, г. Пермь

² Тюменский Государственный университет, Россия, г. Тюмень

³ Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия, г. Томск

⁴ ООО «Алмайнинг», Россия, г. Пермь

✉ a.v.plyusnin@mail.ru

Аннотация. Актуальность. Заключается в связанности с такатинской свитой пород-коллекторов алмазов, ранее открытых, и наличии перспектив обнаружения новых месторождений в Западно-Уральской зоне внешней складчатости. **Цель:** реконструировать условия осадконакопления и состав пород, источник сноса терригенных пород такатинской свиты по результатам изучения разреза «Южная Рассольная». **Объекты:** терригенные породы такатинской свиты в разрезе «Южная Рассольная» (россыпное месторождение алмазов «Южная Рассольная») в Красновишерском районе Пермского края. **Методы:** литолого-фациальный анализ, петрографическое изучение шлифов в проходящем свете с использованием методов скрепленных николей, определение содержания порообразующих оксидов рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре S8 Tiger (Bruker), анализ порообразующих элементов на стеклообразных дисках. Определение примесных и микропримесных элементов (с содержанием <5 %) проведено с использованием аттестованной методики изучения элементов методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой согласно методике СТО ТГУ 048-2012. Анализ выполнен методом ICP-MS на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500cx (Agilent Technologies Inc., США) с использованием внутреннего (In Internal standard, Inorganic Ventures, США) и внешнего стандарта СГД-2А (ГСО 8670-2005). **Результаты.** Проведены литолого-фациальные, минералогические, петрографические, литогеохимические исследования такатинских терригенных отложений в разрезе «Южная Рассольная» в районе Полюдово-Колчимского антиклинория Западно-Уральской зоны складчатости, позволившие уточнить источники вещества и условия седиментации. Формирования отложений происходили в переходной обстановке осадконакопления. Снизу вверх наблюдается трансгрессивная последовательность. Терригенные породы такатинской свиты имеют в своем составе породы первого и второго циклов седиментации. Обрезались как за счет разрушения первично-магматических (кислого и основного составов) и метаморфических пород, так и за счет осадочных пород. Совокупность вещественных характеристик терригенных пород такатинской свиты, с учетом опубликованных данных, позволила предположить, что седиментация пород происходила на пассивной континентальной окраине, при поступлении обломочного материала за счет размыва внутренних приподнятых блоков фундамента Восточно-Европейской платформы, активизация которых произошла в эмское время при проявлении общеплитосферной складчатости. При этом водные потоки, несущие продукты выветривания с Восточно-Европейской платформы, эродировали осадочные породы рифея, венда, ордовика и силура, чьи обломки мы наблюдаем в небольшом количестве при описании шлифов.

Ключевые слова: Полюдово-Колчимский антиклинорий, такатинская свита, эмский ярус, россыпи, алмазы, петрография, литогеохимия, условия формирования, состав источника сноса, геодинамика

Для цитирования: Результаты изучения разреза «Южная Рассольная» такатинской свиты на территории Полюдово-Колчимского антиклинория Западно-Уральской зоны складчатости (Красновишерский район Пермского края) / Ю.Г. Пактовский, А.В. Плюснин, Е.М. Томилина, Д.А. Староселец, И.В. Афонин, Е.С. Рабцевич, А.И. Сулима, В.А. Чуйко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 6. – С. 143–159. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4369

UDC 551.734:551.83:552.513:553.81
DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4369

Results of the study of the section "Yuzhnaya Rassolnaya" of the Takata formation in the territory of the Poludovo-Kolchinsky anticlinorium of the Western-Ural folding zone (Krasnovishersky district, Perm territory)

Yu.G. Paktovsky¹, A.V. Plusnin^{2✉}, E.M. Tomilina¹, D.A. Staroselets²,
I.V. Afonin³, E.S. Rabtsevich³, A.I. Sulima¹, V.A. Chuiko⁴

¹ A.M. Gorky Perm State National Research University, Perm, Russian Federation

² University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

³ National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

⁴ Almayning LLC, Perm, Russian Federation

✉ a.v.plyusnin@mail.ru

Abstract. Relevance. Relationship with the Takata formation of diamond reservoir rocks and previously discovered deposits and the presence of prospects for discovering new ones in the zone of the forward folds of the Urals. **Aim.** To reconstruct the conditions of sedimentation and composition of rocks, the source of the removal of terrigenous rocks of the Takata formation based on the results of studying the "Yuzhnaya Rassolnaya" section. **Objects.** Terrigenous rocks of the Takata formation in the "Yuzhnaya Rassolnaya" section located in the western part of the alluvial diamond deposit "Yuzhnaya Rassolnaya" in the Krasnovishersky district of the Perm Territory. **Methods.** Lithofacies analysis, petrographic study of thin sections in transmitted light using crossed nicol methods, determination of the content of rock-forming oxides by X-ray fluorescence on an S8 Tiger (Bruker) spectrometer, analysis of rock-forming elements on glassy disks. Impurity and microimpurity elements (with a content of <5%) were determined using a certified method for defining elements by inductively coupled plasma mass spectrometry according to the method STO TGU 048-2012. The analysis was performed by ICP-MS on an Agilent 7500cx quadrupole mass spectrometer (Agilent Technologies Inc., USA) using an internal (In Internal standard, Inorganic Ventures, USA) and an external standard SGD-2A (GSO 8670-2005). **Results.** Lithological-facial, mineralogical, petrographic, lithogeochemical studies of Takata terrigenous deposits were carried out in the "Yuzhnaya Rassolnaya" section in the area of the Polyudovo-Kolchinskyy anticlinorium of the Western Ural folding zone, which made it possible to clarify the sources of matter and sedimentation conditions. The formation of sediments occurred in a transitional sedimentation environment. A transgressive sequence is observed from bottom to top. Terrigenous rocks of the Takata formation include rocks of the first and second sedimentation cycles. They were cut off due to the destruction of primary igneous (acidic and basic compositions) and metamorphic rocks, as well as sedimentary rocks. The totality of the material characteristics of the terrigenous rocks of the Takata formation, taking into account the published data, allowed us to assume that sedimentation of the rocks occurred on the passive continental margin, with the supply of clastic material due to the erosion of internal raised blocks of the foundation of the East European Platform. The activation of the latter occurred in the Emsian time with the manifestation of general lithospheric folding. At the same time, water flows carrying weathering products from the East European Platform eroded sedimentary rocks of the Riphean, Vendian, Ordovician and Silurian, which fragments we observe in small quantities when describing thin sections.

Keywords: Polyudovo-Kolchinsky anticlinorium, Takata formation, Emsian Stage, placers, diamonds, petrography, lithogeochemistry, formation conditions, source composition, geodynamics

For citation: Paktovsky Yu.G., Plusnin A.V., Tomilina E.M., Staroselets D.A., Afonin I.V., Rabtsevich E.S., Sulima A.I., Chuiko V.A. Results of the study of the section "Yuzhnaya Rassolnaya" of the Takata formation in the territory of the Poludovo-Kolchinsky anticlinorium of the Western-Ural folding zone (Krasnovishersky district, Perm territory). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 6, pp. 143–159. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4369

Введение

Базальными отложениями верхнепалеозойского комплекса осадочного чехла, востока Восточно-Европейской платформы (ВЕП), конкретно территории Пермского края, является терригенная толща – такатинская свита эмского яруса нижнего отдела девонской системы. Она залегает со стратиграфическим несогласием на породах верхнего протерозоя и

нижнего палеозоя. Начало ее накопления связано с новым циклом седиментации, раннегерцинским этапом развития ВЕП. В такатинское время внутри-платформенное сжатие начинает спадать, и это событие отмечается возникновением изолированных интракратонных впадин, в которые происходил снос материала со слабо расчлененной равнины, которой являлась ВЕП, под действием гидросети, формиру-

ющей конусы выноса и обширные дельтовые системы на краю пассивной континентальной окраины.

Изучение такатинской свиты актуально, поскольку её отложения являются породами-коллекторами алмазов. С ней связаны как ранее открытые месторождения, так и перспективы обнаружения новых, приуроченных к Западно-Уральской зоне складчатости (ЗУЗС).

Целью работы является реконструкция условий осадконакопления и состава пород, источника сноса терригенных пород такатинской свиты по результатам изучения разреза «Южная Рассольная». Для достижения цели авторами выполнен следующий комплекс анализов: литолого-фациальный, петрографический и литогеохимический.

Фактический материал и методы исследования

Основанием работы послужило опробование терригенных пород такатинской свиты в разрезе «Южная Рассольная», расположенном на восточном фланге россыпного месторождения алмазов «Южная Рассольная» (N 60°23'13.2", E 57°39'29.9") в Красновишерском районе Пермского края. Тектонически разрез приурочен к Полюдово-Колчимскому антиклинорию Западно-Уральской зоны складчатости. Разрез представляет собой искусственную экскаваторную выработку, выполненную в коренных породах такатинской свиты. Снизу вверх по разрезу отобрано пять проб, послуживших материалом для исследования. Подробное описание разреза представлено на рис. 1.

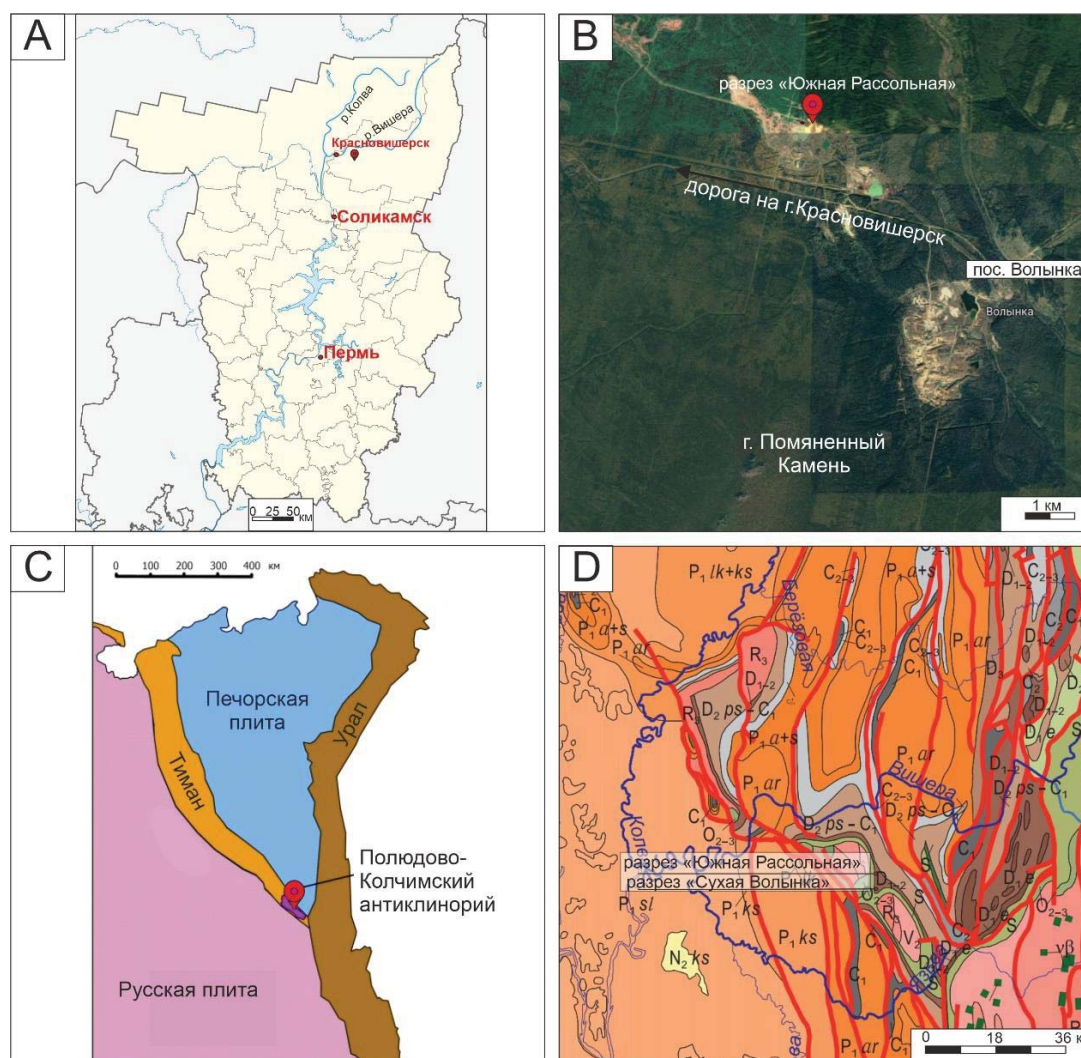


Рис. 1. Местоположение района исследований. Разрез «Южная Рассольная» на карте Пермского края (А); разрез «Южная Рассольная» на космоснимке (В); Полюдово-Колчимский антиклинорий в составе Тимано-Североуральского региона (С), разрез «Южная Рассольная» и «Сухая Волынка» на фрагменте геологической карты Пермского края (D), легенду смотри в [11]

Fig. 1. Location of the study area. Position of the "Yuzhnaya Rassolnaya" section on the map of the Perm Territory (A); the "Yuzhnaya Rassolnaya" section on the satellite image (B), location of the Polyudovo-Kolchinsky anticlinorium in the Timano-Severouralsk region (C), position of the section on a fragment of the geological map of the Perm Territory (D), see the legend in [11]

При литолого-фациальном анализе авторы руководствовались наработками О.С. Черновой [1] и Н.Е. Reading [2], а также подходами, представленным в [3–8].

Петрографическое изучение шлифов проведено на поляризационном микроскопе Olympus BX51 (Япония) в проходящем свете с использованием методов скрещенных николей. Кроме этого, сделаны снимки шлифов в проходящем свете и в скрещенных николях при увеличении 50х и 100х (аналитик Е.М. Томила).

Содержание порообразующих оксидов определено рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре S8 Tiger (Bruker) (аналитик И.С. Федотов) [9]. Для анализа порообразующих элементов изготавливались стеклообразные диски путем плавления гомогенизированной смеси порошка из прокаленного материала пробы с боратами лития при температуре 1100 °С в платиновых тиглях в печи индукционного плавления.

Выявление примесных и микропримесных элементов (с содержанием <5 %) проведено посредством аттестованной методики определения элементов методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой согласно подходу СТО ТГУ 048-2012 [10] (аналитик Е.С. Рабцевич). Пределы обнаружения следовых количеств элементов составляют 0,001 г/т. Анализ выполнен методом ICP-MS на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500cx (Agilent Technologies Inc., США) с использованием внутреннего (In Internal standard, Inorganic Ventures, США) и внешних стандартов СГД-2А (ГСО 8670-2005).

История изученности

В 1930-е гг. коллектив геологов Башкирского геологического управления (Г.В. Вахрушев, Э.Х. Алкснэ, А.П. Тяжева, А.И. Олли) закартировал на Южном Урале базальную толщу девонской системы, залегающую с угловым и стратиграфическим несогласием на комплексе более древних пород [12]. По сообщению Б.М. Келлера [13], именно А.П. Тяжева описывала разрез в нижнем течении р. Таката (левый приток р. Зилим), по названию которой позднее была названа терригенная свита, распространенная на всем западном склоне Урала в ЗУЗС. Б.М. Келлер ввел термин «такатинская свита» в геологическую литературу в 1935 г. Позднее термин «такатинская свита, слои» появился и в Стратиграфическом словаре СССР [14]. На Северном Урале, в Колво-Вишерском крае, во время работ экспедиции ВНИГРИ (1949–1955 гг.) термином «такатинская свита» пользовался Н.Г. Чочиа с коллегами [15], по своему опыту работы на Южном Урале. Сотрудники экспедиции впервые выделили тринадцать разрезов такатинской свиты, в которых базальные

отложения девона залегают на породах верхнего протерозоя – нижнего палеозоя. Особенное значение свита приобрела в первой половине 1960-х гг., когда в результате работ Съёмочно-тематической экспедиции Пермского геологоразведочного треста под руководством А.Д. Ишкова было доказано, что базальные отложения такатинской свиты являются промежуточным коллектором алмаза и определяют алмазоносность аллювия современных рек и мезокайнозойских депрессий [16, 17].

С этого времени начинается планомерное научное изучение такатинской свиты как ведущими и региональными геологическими институтами и университетами (ВСЕГЕИ, ЦНИГРИ, Пермский политехнический институт, Пермский государственный университет и др.), так и производственными геологическими коллективами (Вишергеология, Яйвагеология, Пермская геологоразведочная экспедиция и др.). Геологические сведения о такатинской свите, известные по фондовым и опубликованным работам, обобщены в статье. На этой основе проведено сопоставление уже известных фактов с новыми данными авторов, которые публикуются впервые.

Краткие сведения о такатинской свите

Такатинская свита эмского яруса нижнего отдела девонской системы развита в Бельско-Елецкой структурно-формационной зоне западного Урала. Свита трансгрессивно залегает на верхнерифейских, вендских, ордовикских, силурийских отложениях. Трансгрессивный цикл начинается с грубообломочной толщи в основании разреза, не выдержанной по мощности и простираению. Выделяются три типа такатинских отложений: западный, центральный (промежуточный) и восточный, различающиеся фациально. Заметим, что граница между западным (континентальным) и восточным (прибрежно-морским) типами разреза, по сути, фиксирует зоны высокой и низкой алмазоносности.

Палеогеографический план современного Красновишерского алмазоносного района в нижнем девоне следующий: 1) на северо-западе – крупная река с дельтовой субаэральной субаквальной частью, ориентированной на юго-восток; 2) фациальные переходы от аллювиальной равнины к морю таковы: субаэральная часть дельты – субаквальная часть дельты – осадки открытого шельфа, – эти фации прослеживаются на расстоянии первых десятков километров; 3) увеличение мощности осадков осуществляется по направлению с запада и северо-запада на восток и юго-восток, то есть от континентальной суши к палеобассейну такатинского времени. Алмазы тяготеют к базальным грубообломочным аллювиальным отложениям на палеоконтиненте или к самой кромке суши и моря. Отмечена аналогия с западным побережьем современной Намибии [18, 19].

Наиболее полный разрез такатинской свиты представлен на месторождении «Сухая Волынка», расположенном в 6 км юго-восточнее «Южной Рассольной». В этой же зоне расположено наиболее известное месторождение алмазов, приуроченное к базальной части такатинских отложений, – «Ишковский карьер», на котором в 2005 г. был получен самый крупный уральский алмаз – 35,4 карат. Разрез «Сухая Волынка» является типовым для всего Вишерского алмазоносного района, поэтому на нем следует остановиться несколько подробнее.

Типовой разрез такатинской свиты.

Месторождение «Сухая Волынка»

Впервые разрез такатинской свиты на месторождении «Сухая Волынка» (N 60°20'56.6", E 57°40'02.8") описан в 2007 г. и публикуется впервые. Он представляет собой типичный трансгрессивный цикл терригенных отложений – от базальных грубообломочных пород (конгломераты и гравелиты) до алевролитов и аргиллитов. Рассмотрим их снизу вверх (рис. 2).

Слой 1. Доломиты светло-серые, мелкокристаллические. Относятся к колчимской свите лландовери (S_1kl), подстилающей такатинскую свиту. Контакт с вышележащими терригенными отложениями нижнего девона отчетливый, резкий.

Слой 2. Конгломераты и гравелиты, частично расцементированные, общего желто-серого цвета, участками ожелезненные. Порода тектонически дезинтегрирована во фронтальной части надвига северо-восточной экспозиции, слабоглинистая, песчано-гравийно-галечная. Мощность 0,8 м.

Слой 3. Конгломераты, гравелиты, гравелито-песчаники светло-серые, кварцевые с редкими «окатышами» аргиллитов светло-зеленого цвета (0,5 м). Порода крепко сцементированная (рис. 2, В); гальки аллювиального генезиса. Матрикс пород мелкогравийно-песчаный кварцевый, сходный с петрографическим описанием вышележащих песчаников в этом же разрезе.

Слой 4. Песчаники светло-серые, мелкозернистые, кварцевые, средне-слоистые, очень крепкие (3,0 м).

Слой 5. Песчаники с примесью гравия, светло-желтовато-серые, кварцевые, тонкослоистые (1,0 м), частично дезинтегрированные.

Слой 6. Песчаники светло-серые, мелкозернистые, кварцевые, средне-тонко-слоистые, трещиноватые, в нижней половине слоя с линзами (0,4–0,6 м) слабосцементированных гравелитов и гравийных песчаников (3,0 м).

Слой 7. Песчаник красновато-серый, розовато-красный, мелкозернистый, кварцевый, тонкослоистый, трещиноватый, участками и по трещинам ожелезненный (2,5 м).

Слой 8. Аргиллит светло-зелёный, тонкослоистый, плотный, частично глинизированный, во влажном состоянии пластичный и вязкий, как глина (1,5 м).

Слой 9. Песчаники зеленоватые, мелкозернистые, кварцевые, тонкослоистые, трещиноватые, с прослоями зеленоватых алевролитов (2,5 м).

Слой 10. Элювий по песчаникам такатинской свиты, представленный щебнем и глыбками песчаников в песчаном, с гравием и галькой кварца, заполнителе; общий цвет породы желто-коричневый за счет пропитки гидроксидами железа; реликты тонкой слоистости сохраняются редко (0,5–1,5 м).

Слой 11. Глина делювиальная с песком, гравием, галькой, щебнем и глыбами коренных пород (0,5–1,5 м).

В 80-е гг. прошлого века базальные отложения такатинской свиты на участке «Сухая Волынка» были опробованы на алмазы геологоразведочным предприятием «Вишерагеология» (отв. исп. В.Я. Колобянин) [20, 21]. Результат оказался положительным, однако промышленное их значение установлено только в 2010 г. геологической службой ЗАО «Уралалмаз» (отв. исп. Н.Г. Калашников). Предшественники отмечали, что базальные конгломераты залегают в виде маломощных невыдержанных линз. Гранулометрический и минеральный состав конгломератов подтверждают наши собственные исследования, проведенные в последние годы. Грансостав конгломератов таков: галечного материала – 10–30 %, гальки средней и хорошей степени окатанности, эллипсоидные, яйцеобразные, реже изометричные; судя по морфологии, аллювиального генезиса. Петрографический состав галечного материала: белый непрозрачный жильный кварц, кварцевые песчаники, реже полевошпат-кварцевые песчаники. Галечный материал происходит из более древних толщ (верхнего рифея и венда, а также полудовской свиты верхнего ордовика). Матрикс конгломератов – гравийно-песчаный, цемент глинистый и гидрослюдисто-железистый. Наибольшая мощность конгломератов наблюдается в восточной части Колчимской антиклинали Полудово-Колчимского антиклинория, где расположены месторождения «Сухая Волынка» и «Южная Рассольная». Сравнительно хорошая окатанность галек сопоставлена с дальностью переноса 40–50 км [22]. Питающая провинция представляется там, откуда поступал обломочный материал, перенесенный такатинскими реками, то есть с Русской плиты к северо-западу от Полудово-Колчимского антиклинория (Волго-Уральский кратон Восточно-Европейской платформы). Примечательно, что предшественниками в базальных конгломератах такатинской свиты определены минералы кимберлитовых пород (минералы-спутники алмаза), встречающиеся очень редко. Минералы-спутники часто сильно изменены [23]; диагностика их в настоящее время требует заверки прецизионными методами.

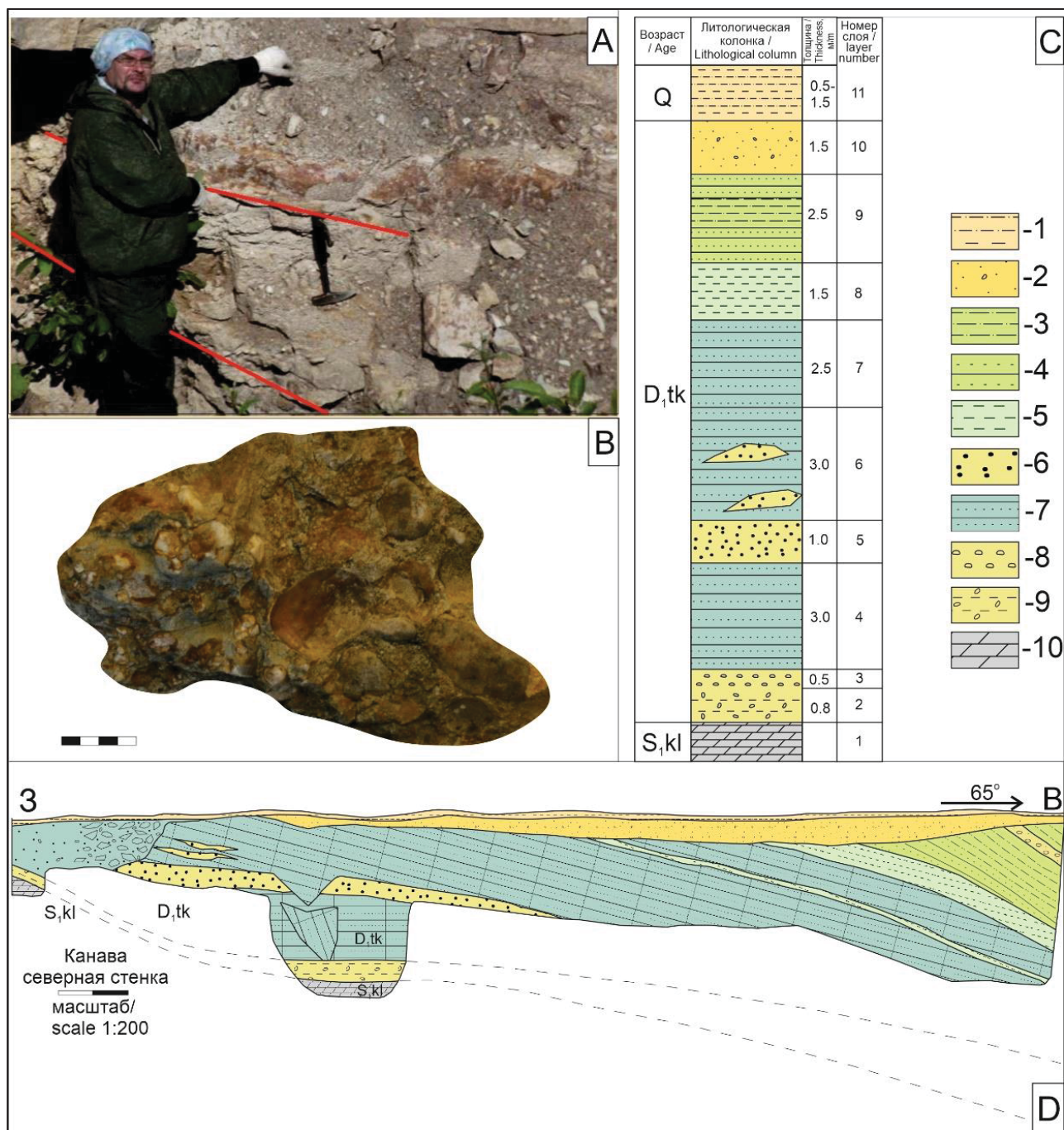


Рис. 2. Разрез «Сухая Волынка»: А – фото выхода горных пород на поверхность, базальные слои такатинской свиты; В – литифицированные конгломераты такатинской свиты, слой 3; С – литологическая колонка разреза; D – зарисовка разреза. Условные обозначения литологии: 1 – глина делювиальная с песком; 2 – песок с гравием и галькой; 3 – прослои зеленоватых алевролитов; 4 – песчаники зеленоватые; 5 – глина светло-зелёная; 6 – гравийный песок; 7 – песчаники светло-серые мелкозернистые; 8 – конгломераты, гравелиты, гравелито-песчаники светло-серые; 9 – дезинтегрированные конгломераты и гравелиты; 10 – доломиты светло-серые мелкокристаллические

Fig. 2. «Sukhaya Volynka» section: A – photo of the outcrop of rocks on the surface, basal layers of the Takata formation; B – lithified conglomerate of the Takata formation, layer 3; C – lithological column of the section; D – sketch of the section. Lithology symbols: 1 – deluvial clay with sand; 2 – sand with gravel and pebbles; 3 – interlayers of greenish siltstones; 4 – greenish sandstones; 5 – light green clay; 6 – gravel sand; 7 – light gray, fine-grained sandstones; 8 – light gray conglomerates, gravelstones, gravelite-sandstones; 9 – disintegrated conglomerates and gravelstones; 10 – light gray dolomites, finely crystalline

Расположенные выше по разрезу кварцевые плохо сортированные гравелиты также встречаются в виде прослоев и линз. Крупнообъемное опробование гравелитов в разрезе «Сухая Волянка», проведенное ЗАО «Уралалмаз» в 2007 г., дало отрицательные результаты.

Покрывающие конгломераты и гравелиты песчаники являются кварцевыми светло-серыми мелко-среднезернистыми, равномерно- и неравномернотекстурными. Цемент песчаников регенерационный кварцевый, реже поровый, железистый и гидрослюдистый. Кроме кварца в незначительных количествах присутствуют обломки аргиллитов, кремневых пород и кварцитов. Разнозернистые и гравийные песчаники нередко содержат плоскую гальку («окатыши») зеленоватых аргиллитов, предположительно, из нижележащих отложений. Отличительной чертой некоторых разновидностей песчаников западного типа разреза такатинской свиты является присутствие в них обломков щелочных эффузивов [24]. Из аллотигенных минералов в основном присутствуют исключительно устойчивые к выветриванию. Характеристика минералов тяжелой фракции в основных типах пород такатинских слоев (песчаников, гравелитов и конгломератов) показывает в аутигенной части преобладание лимонита (8,0–37,3 %), а в аллотигенной – циркона (30,1–62,0 %), турмалина (4,0–13,4 %), лейкоксена (4,6–18,2 %), рутила (1,2–6,0 %). Очень редки моноклинные и ромбические пироксены, гранат-альмандин и пироп, монацит [25].

Алевролиты в такатинском разрезе «Сухой Волянки» светло-серые кварцевые с глинисто-хлоритовым порово-пленочным, в сочетании с базальным, цементом.

Завершается разрез аргиллитами зеленовато-серыми, нередко выветрелыми до глины гидрослюдистого состава [20, 26]. Залегают, как и алевролиты, в виде линз мощностью около 2,0 м.

Алмазоносными породами в разрезе «Сухая Волянка» являются базальные конгломераты такатинской свиты, как и во многих других разрезах Полудово-Колчимского антиклинория: в Ишковском карьере и по р. Илья-Вож. Сюда же необходимо добавить разрезы в нижнем течении р. Большой Колчим, в верхнем течении р. Ефимовки и р. Северный Колчим [27]. Здесь они залегают со стратиграфическим и угловым несогласием, осложненным эпигерцинским тектоническим нарушением надвиговой природы, на доломитах колчимской свиты лландовери (нижнего отдела силура). Береговая линия размываемой палеосуши реконструируется по линии рр. Большой Колчим и Южная Рассольная (в современных координатах).

Такатинский возраст пород доказывается палинологическими данными, полученными по пробам из лигнитов базальной части такатинской свиты правобережья среднего течения р. Ухтым [28]. Здесь определен комплекс миоспор удовлетворительной сохранности: *Retusotriletes cf. sterlibasch-evensis* Tschibr., *R. stylifer* Tschibr., *Azonomonoletes tuberculatus* Tschibr. Помимо данных комплексов такатинская свита содержит спорово-пыльцевые комплексы с *Retusotriletes absurdus* Tschir b., *R. microaculeatus* Tschir b., *Hymenozonotriletes endemicus* var. *Vanjaschkiensis* Tschir b., характерные для такатинского горизонта Среднего и Северного Урала [29].

Описание разреза «Южная Рассольная»

Изучаемый разрез такатинской свиты вскрыт северо-западнее от посёлка Волянка, входящего в Красновишерский район Пермской области, где представлен в виде искусственной выработки (слив плотины), пройденной ЗАО «Уралалмаз». Местность, где породы выходят на поверхность, характеризуется значительной залесённостью и задернованностью (рис. 3). Геологическое описание составлено авторами в 2015 и 2022 гг., публикуется впервые.

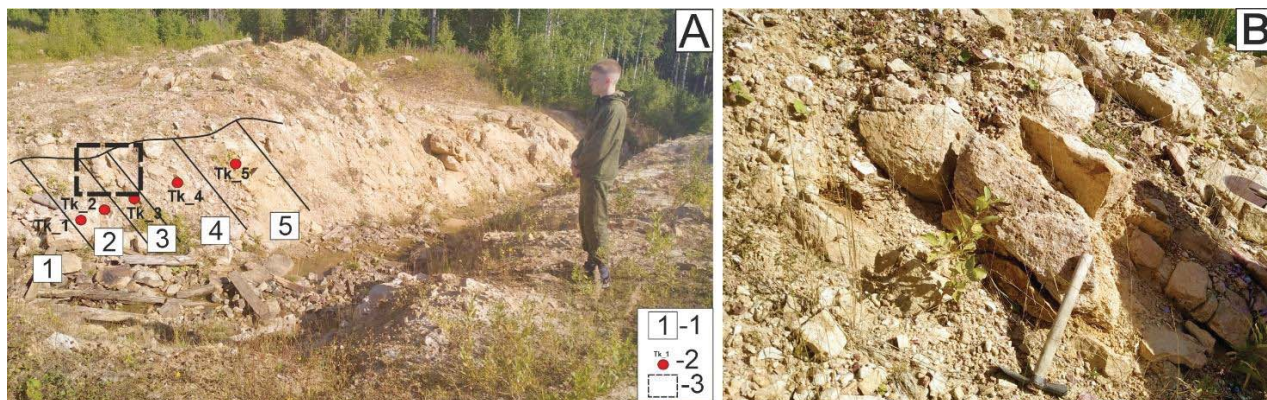


Рис. 3. Разрез «Южная Рассольная»: А, В – фото искусственного обнажения пород такатинской свиты. Условные обозначения: 1 – номер слоя; 2 – точка отбора пробы и ее номер; 3 – фрагмент обнажения (гравелиты такатинской свиты), увеличенный на рис. 2, В

Fig. 3. «Yuzhnaya Rassolnaya» section: А, В – photo of the outcrop of rocks on the surface. Legend: 1 – layer number; 2 – sampling point and its number; 3 – fragment corresponding to the Fig. 2, В

Экскаваторная траншея шириной по верху несколько метров прорезана на глубину до 2 м, заужаясь на конус до 0,5 м. Общая длина искусственного обнажения до 50 м, однако большая его часть представляет собой трудно разборные осыпи, затянутые делювиальной глиной, нанесенной дождевыми потоками. Однако наиболее важная базальная часть разреза, откуда отобраны образцы пород, достаточно хорошо обнажена. Азимут падения слоев – СВ 70–80°, угол падения – 39°. Разворот такатинских пластов достаточно круто на восток говорит о том, что это фрагмент северо-восточного периклинального замыкания Колчимской антиклинали. В обычном для района моноклинальном залегании слои падают в северо-восточных румбах (20–50°) и более полого. Базальные такатинские отложения в данном обнажении представлены кварцевыми песчаниками и гравелитами, в основном крепкими скальными разностями. Контакты между слоями такатинских пород ровные, четкие, без следов размыва и перерыва. По сравнению с типовым разрезом такатинских пород, приведенным выше, в разрезе «Южная Рассольная» наблюдаются два отличия: 1) базальные слои подстилаются здесь отложениями нижнего девона (нерасчлененный лохковский и пражский ярусы), которые выделены предшественниками условно; мощность этих отложений – первые метры, они отвечают времени перерыва в геологической летописи региона на границе позднего силура и раннего девона; подстилающими породами для них, по данным бурения, являются доломиты силурийской системы; 2) базальными породами являются песчаники и гравелиты, а не конгломераты, как на «Сухой Волынке»; различия эти фациальные, зависящие от соответствующих аллювиальных отложений, в основном русловых или пойменных.

Послойное описание разреза «Южная Рассольная» дается снизу вверх.

Слой 1. Аргиллиты светлоокрашенные зеленовато-серые, голубовато-светло-серые выветрелые до глинистого состояния. В толще рассеяны небольшие стяжения (бобовины) гидрогетита. В кровле слой ожелезнен и приобретает ржаво-желтые тона (1,0 м). Аргиллиты залегают согласно с вышележащими породами – редкогалечными, гравийно-мелкогалечными конгломератами (гравелитами) и песчаниками. Условно относятся к нижнему девону [26]. Эти условно нижнедевонские отложения описываются как пачка голубовато-серых и желтых глин с примесью алевроитового материала (от 10 до 50 %), а также пестроцветных и белых алевролитов, нередко содержащих овоиды гетита размером 1,5 см.

Слой 2. Песчаники кварцевые, светло-серые, желтовато-серые, тонкая слоистость подчеркнута ржаво-желтыми полосами ожелезнения (0,6 м).

Слой 3. Гравелиты (редкогалечные, мелкогалечно-гравийные конгломераты) кварцевые. В подошве (0,2 м) конгломераты частично дезинтегрированы. Каркас пород составляют редкие гальки кварцевых песчаников и жильного кварца гравийной и мелкогалечной размерности (около 30 %), окатанность галек по пятибалльной шкале средняя и хорошая. Наблюдаются характерные для древних конгломератов глубокие «ямки-вдавливания». Матрикс пород мелкогравийно-песчаный кварцевый, по петрографическому описанию, сходный с описанием песчаников этого же разреза. Мощность около 0,3 м.

Слой 4. Гравийные песчаники светло-серые, желтовато-серые, кварцевые, тонкослоистые, ожелезненные (1,0 м). Слой, по сути, является переходным от гравелитов к песчаникам.

Слой 5. Крепкие кварцевые песчаники светло-желтовато-серые мелко-среднезернистые, тонко-среднеслоистые. Элементы залегания нижележащего слоя гравелитов и вышележащего слоя песчаников пространственно совпадают, хотя и несколько «играют», учитывая, что они находятся в северо-восточном периклинальном замыкании Колчимской антиклинали (азимуты падения 70–80°, углы падения 25–39°). Мощность 0,7 м.

Литологическое описание разреза такатинской свиты в пределах Красновишерского района ранее выполнялось также Ю.Р. Беккером с соавторами [25]. Описанные ими разрезы в основании свиты представлены слоем песчаников тонкозернистых кварцевых с прослоями алевролитов, однако гравий и галька в составе отсутствуют, а сами породы залегают на темно-бурых глинах (1,6 м) – продуктах выветривания силурийских доломитов. Описанные Ю.Р. Беккером слои характеризуют еще одну фациальную разновидность пород такатинской свиты в ее основании. Данный разрез обладает значительно большей мощностью, чем сходные по литологии интервалы разреза «Южная Рассольная», что объясняется прибрежно-морскими и морскими условиями осадконакопления.

Петрографическая характеристика

Минеральный состав терригенных пород такатинской свиты в соответствии с классификацией по Н.В. Лонгвиненко отвечает полевошпат-кварцевым и граувакковым песчаникам (рис. 4). Для полевошпат-кварцевых песчаников характерна псаммитовая структура с размерами зерен 0,1–0,8 мм. Преобладают 0,2–0,26 мм (рис. 5, А). Степень сортировки средняя. Зерна неправильной, субизометричной, слабоудлиненной формы. Среди обломков различаются полуокатанные (70–80 %), окатанные обломки (15–20 %) отмечаются неокатанные (5 %) (рис. 5, В). Для пород характерен кварцевый регенерационный цемент (рис. 5, С).

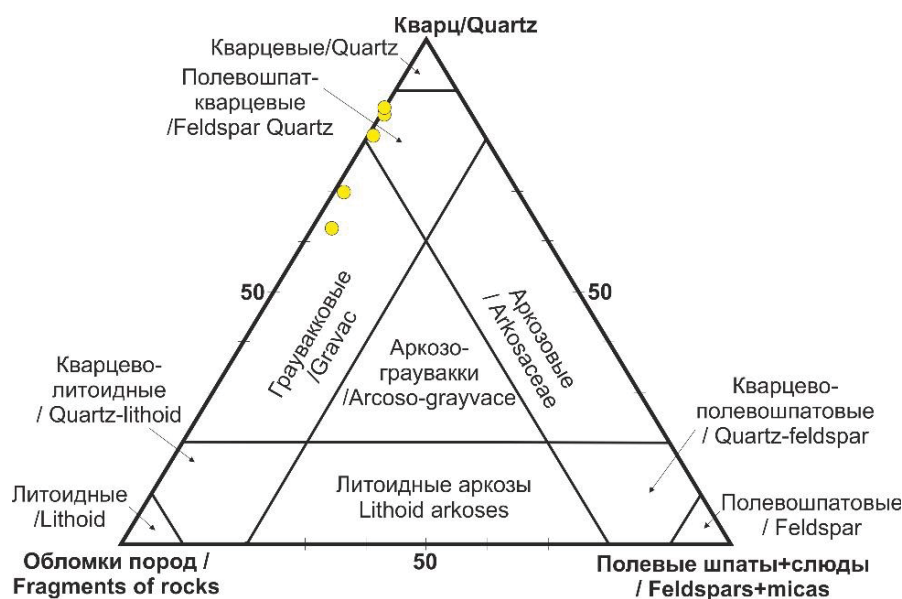


Рис. 4. Классификационная диаграмма для терригенных пород такатинской свиты, по [30]
Fig. 4. Classification diagram for terrigenous rocks of the Takata formation according to [30]

В единичных случаях в отдельных порах развивается каолинит, плохо раскристаллизованный, с примесью гидрослюда. Обломочный материал представлен зернами кварца (83 %), зернами полевых шпатов (1 %), обломками пород различного генезиса (16 %): преобладают обломки кварцитов, единичные обломки кремневых пород, алевролитов и пород глинистого состава. В породах диагностированы минералы, характерные для магматических пород кислого и среднего составов: циркон, сфен, лейкоксен (рис. 6). Аутигенные минералы: единичные чешуйки гидрослюда размером менее 0,05 мм, гематитизированный пирит размером 0,006–0,03 мм. Постседиментационные преобразования: структура вдавливания и образование конформных структур за счет регенерации кварца и уплотнения обломков.

Для граувакковых песчаников характерна псаммитовая структура с размерами зерен 0,1–0,8 мм. Единичные зерна размером 1,6–2,0 мм. Преобладают 0,2–0,25 мм. Зерна неправильной, субизометричной, слабоудлиненной формы. Среди обломков различаются полуокатанные (70–80 %), окатанные обломки (15–20 %) отмечаются неокатанные (5 %). Сортировка средняя. Для пород характерен смешанный тип цементации. Во-первых, регенерационный кварцевый цемент и бесцементное контактное соединение зерен кварца и обломков пород, которое характеризуется конформной структурой (рис. 5, D). Во-вторых, пленочно-поровый глинистый цемент, преимущественно гидрослюдистый (рис. 5, E). Неравномерно в отдельных порах развивается каолинит, плохо и средне- раскристаллизованный, с примесью гидрослюда. Обломочный

материал представлен зернами кварца (68 %), зернами полевых шпатов (1 %), обломками пород различного генезиса (31 %): обломки кварцитов (рис. 5), кремневых пород, единичные обломки алевролитов, глинистых пород и пород кремнисто-слюдистого состава. В породах диагностированы минералы, характерные для магматических пород кислого состава: циркон (рис. 6), титанит, лейкоксен. Аутигенные минералы: минералы цемента, изометричный пирит размером 0,01 мм и единичные неправильные скопления микрокристаллического пирита размером 0,25 мм, распределенные неравномерно по площади шлифа. Постседиментационные преобразования: редкие крустификационные каемки на обломках и на зернах, структура вдавливания и образование конформных структур за счет регенерации кварца и уплотнения обломков.

Петрогенные оксиды

Содержания петрогенных оксидов и рассчитанные значения основных химических индексов CIA [31] и ICV [32] приведены в таблице.

Такатинская свита. Содержания оксидов в терригенных породах варьируется в пределах: $\text{SiO}_2=94,0\text{--}96,6$, $\text{TiO}_2=\text{до } 0,08$, $\text{Al}_2\text{O}_3=0,7\text{--}1,1$, $\text{Fe}_2\text{O}_3=0,3\text{--}1,9$, $\text{MgO}=0,1\text{--}0,2$, $\text{CaO}=0,1\text{--}0,3$, $\text{Na}_2\text{O}=\text{до } 0,1$, $\text{K}_2\text{O}=\text{до } 0,2$ мас. % (таблица). На классификационной диаграмме Ф. Петтиджа фигуративные точки состава песчаников располагаются в поле кварцевых аренитов (рис. 7, А). На диаграмме (рис. 7, В) видно, что фигуративные точки составов песчаников расположены в поле значений характерных для незрелых слабо выветрелых пород CIA (53–65) и ICV (1,46–2,74).

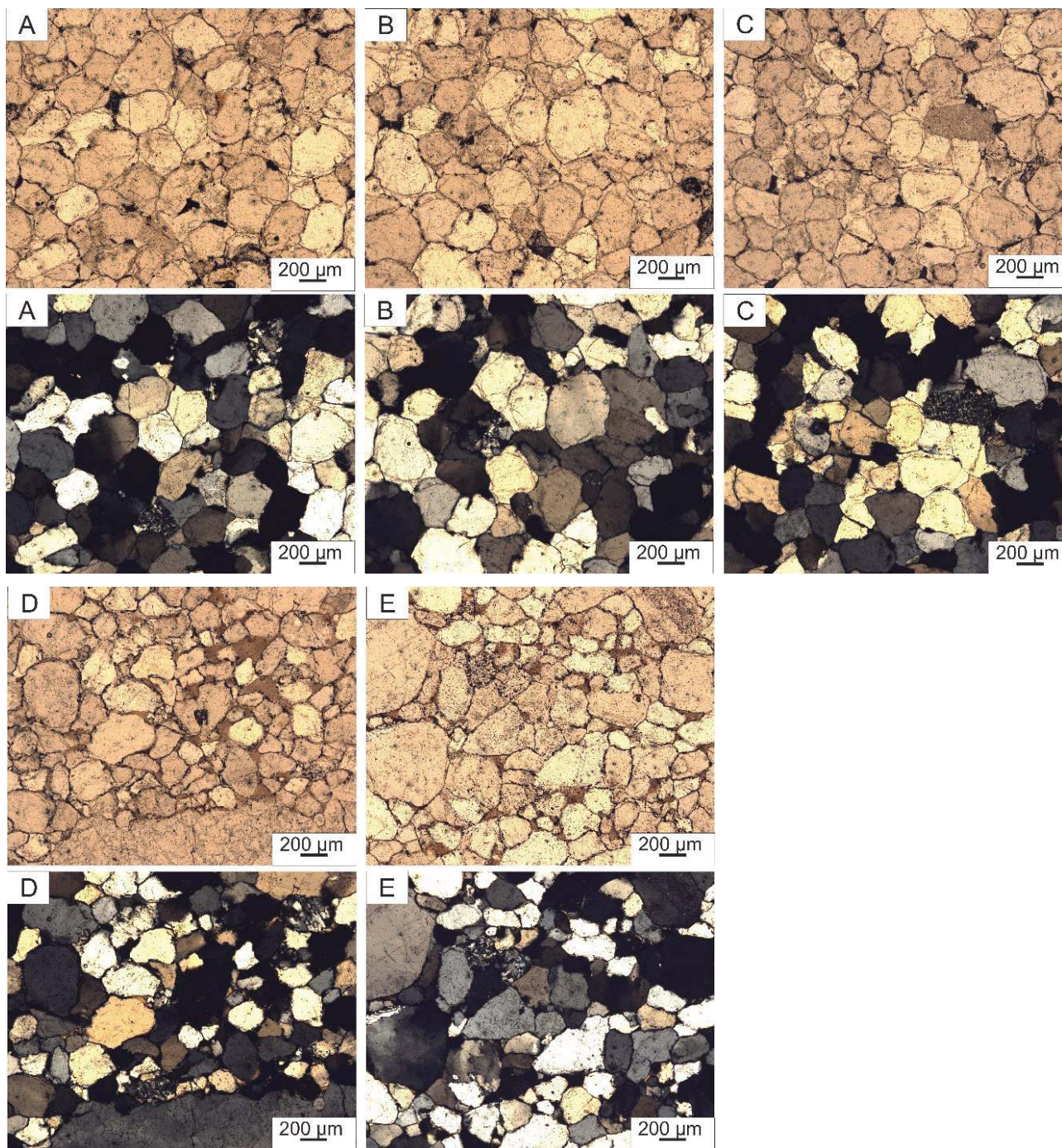


Рис. 5. Микрофотографии шлифов терригенных пород такатинской свиты: А – псаммитовая структура с преобладающими размерами зерен 0,2–0,26 мм, фрагмент шлифа без анализатора; В – песчаник разномзернистый с зернами кварца и обломками пород разной степени окатанности, преобладают полуокатанные, реже окатанные, неокатанные, фрагмент шлифа без анализатора; С – кварцевый регенерационный цемент, фрагмент шлифа без анализатора; D – бесцементное контактное соединение зерен кварца и обломков пород, которое характеризуется конформной структурой; единичное зерно циркона, фрагмент шлифа с анализатором; E – пленочно-поровый глинистый цемент, преимущественно гидрослюдястый; обломки кварцитов, фрагменты шлифов без анализатора. Первый ряд николи прямые, второй ряд николи скрещенные

Fig. 5. Micrographs of thin sections of terrigenous rocks of the Takata formation: A – psammite structure with prevailing grain sizes of 0.2–0.26 mm, section fragment without analyzer; B – inequigranular sandstone with quartz grains and fragments of rocks of different degrees of roundness; C – quartz regeneration cement, section fragment without analyzer; D – cementless contact connection of quartz grains and rock fragments, which is characterized by a conformal structure; a single grain of zircon, a fragment of a thin section with an analyzer; E – film-pore clayey cement, predominantly hydromicaceous; fragments of quartzites, fragments of thin sections without analyzer. The first row of nicolis are straight, the second row of nicolis are crossed

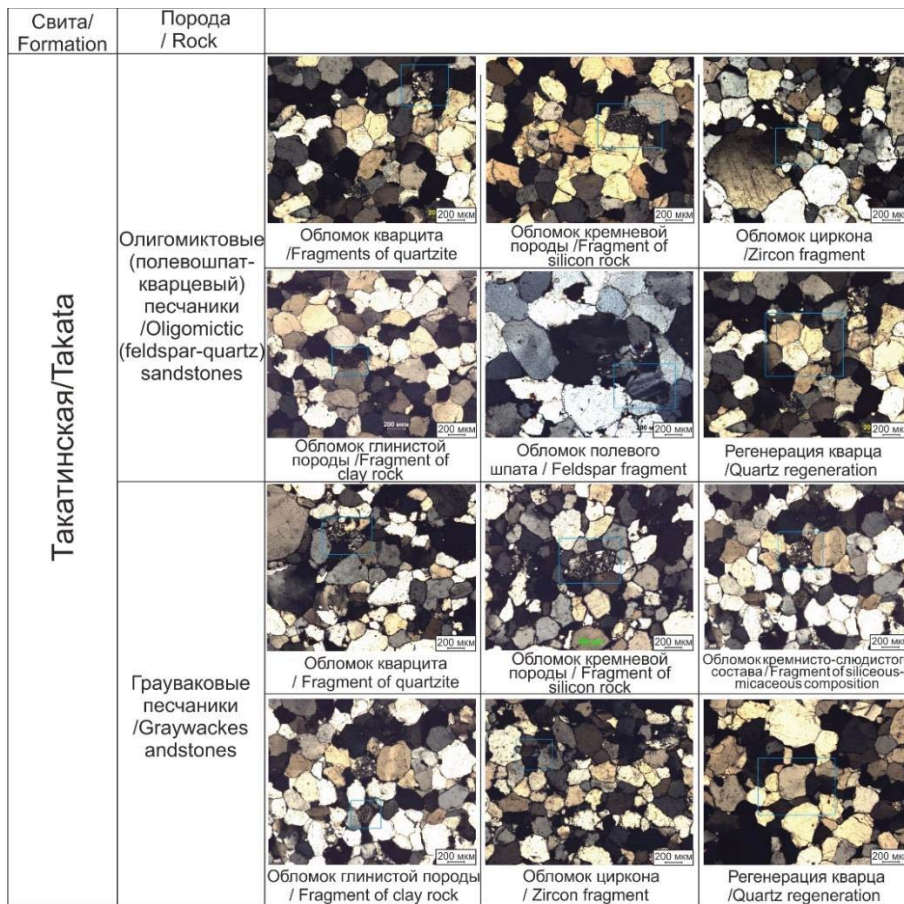


Рис. 6. Фототаблица микрофотографий шлифов терригенных пород такатинской свиты
Fig. 6. Phototable of micrographs of thin sections of terrigenous rocks of the Takata formation

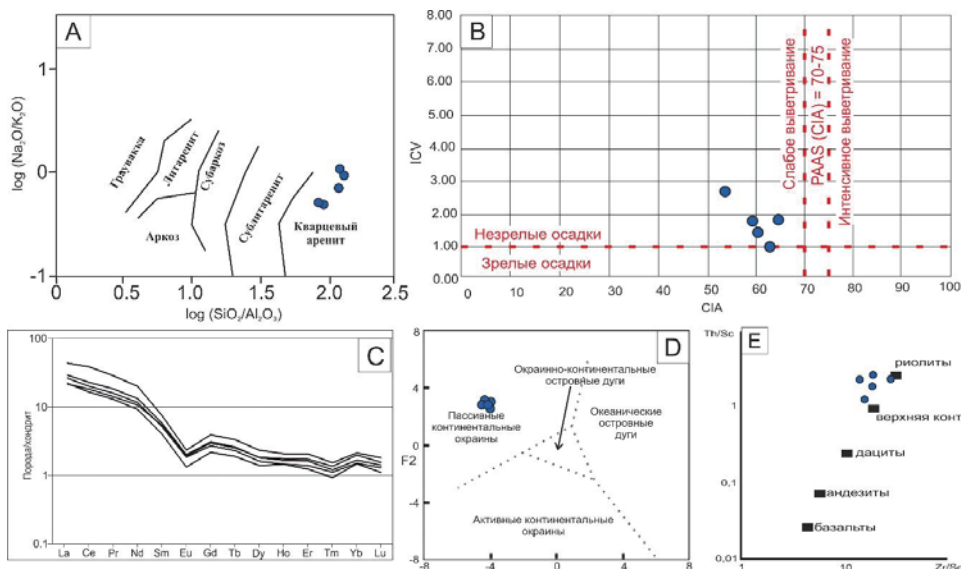


Рис. 7. Положение фигуративных точек на диаграммах Ф. Петтиджона (А) [34]; Диаграмма CIA (индекс химического выветривания) [31]/ICV (индекс зрелости осадков) (В) [32]; Спектры распределения РЗЭ (С), нормированные по хондриту [33]; Палеогеодинамическая дискриминационная диаграмма F1–F2 М. Бхатия (D) [35]; Дискриминационные диаграммы для определения состава источника сноса; (E) – диаграмма Zr/Sc–Th/Sc [36]
Fig. 7. Position of figurative points on F. Pettijohn's diagrams (A) [34]; Chart CIA (Chemical Weathering Index) [31]/ICV (Precipitation Maturity Index) (B) [32]; REE distribution spectra (C) normalized to chondrite [33]; Paleogeodynamic discrimination diagram F1–F2 of M. Bhatia (D) [35]; Discrimination diagrams for determining the composition of the drift source; (E) Zr/Sc–Th/Sc diagram [36]

Редкоземельные элементы

Содержание редких и редкоземельных элементов (РЗЭ) в изученных образцах такатинской свиты представлено в таблице. Для наглядного представления особенностей распределения этих элементов проведено их нормирование на хондрит [33].

Таблица. Петрохимический состав и содержания редких и редкоземельных элементов в терригенных породах такатинской свиты

Table. Petrochemical composition and content of rare and rare earth elements in terrigenous rocks of the Takata formation

№ пробы Sample no.	Tkt-1	Tkt-2	Tkt-3	Tkt-4	Tkt-5
Литология Lithology	Песчаник Sandstone				
Компонент, мас. % Component, wt %	Такатинская свита Takata formation				
SiO ₂	95,78	95,76	96,63	94,08	95,31
TiO ₂	0,05	0,06	0,05	0,09	0,08
Al ₂ O ₃	0,82	0,81	0,77	1,04	1,14
Fe ₂ O ₃	0,91	1,01	0,30	1,97	0,82
MnO	0,10	0,10	0,08	0,09	0,07
MgO	0,17	0,16	0,17	0,22	0,24
CaO	0,21	0,14	0,15	0,32	0,16
Na ₂ O	0,06	0,07	0,06	0,08	0,12
K ₂ O	0,09	0,07	0,07	0,17	0,24
P ₂ O ₅	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04
п.п.п./р.р.р.	0,58	0,64	0,40	0,71	0,55
Сумма/Sum	98,79	98,85	98,73	98,82	98,79
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	116,80	117,93	125,65	90,20	83,31
K ₂ O/Na ₂ O	1,47	0,99	1,14	2,10	2,04
CIA	59,18	64,58	62,68	53,50	60,18
ICV	1,80	1,86	1,05	2,74	1,46
ppm					
Sc	0,90	0,68	0,44	0,84	1,12
Zr	16,65	14,36	14,34	18,61	17,67
Th	1,13	1,26	1,06	2,30	2,66
La	9,28	8,42	7,08	6,81	13,67
Ce	18,45	16,14	13,38	14,72	31,14
Pr	2,23	1,94	1,58	1,71	3,48
Nd	7,88	6,93	5,50	6,35	11,95
Sm	1,13	1,01	0,79	1,05	1,46
Eu	0,15	0,14	0,10	0,14	0,17
Gd	0,80	0,70	0,56	0,77	1,01
Tb	0,12	0,11	0,09	0,12	0,16
Dy	0,58	0,52	0,45	0,59	0,75
Ho	0,12	0,11	0,10	0,13	0,15
Er	0,34	0,29	0,26	0,36	0,43
Tm	0,04	0,04	0,03	0,04	0,05
Yb	0,35	0,31	0,31	0,41	0,44
Lu	0,05	0,04	0,04	0,05	0,06
Eu/Eu*	0,48	0,49	0,45	0,48	0,43
(La/Yb) _n	17,96	18,04	15,48	11,09	20,72
(La/Sm) _n	5,18	5,26	5,67	4,08	5,90
(Gd/Yb) _n	1,85	1,80	1,47	1,49	1,84

Примечания/Notes:

$CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)] \times 100$;

$ICV = (TiO_2 + Fe_2O_3 + MnO + MgO + CaO + K_2O + Na_2O) / Al_2O_3$;

$Eu/Eu^* = (Eu_n) / ((Sm_n)(Gd_n)^{1/2})$;

$(La/Yb)_n, (La/Sm)_n, (Ga/Yb)_n$ – отношения,

нормированные по хондриту/ratios normalized

by chondrite [22].

Для пород такатинской свиты обнаруживаются фракционированные спектры распределения РЗЭ ($La_n/Yb_n = 11,09–20,72$) и обогащение легкими лантаноидами ($La_n/Sm_n = 4,08–5,09$) относительно тяжелых ($Gd_n/Yb_n = 1,47–1,85$). На спектрах распределения РЗЭ для пород такатинской свиты фиксируется ярко выраженная отрицательная европиевая аномалия ($Eu/Eu^* = 0,43–0,49$) (рис. 7, С).

Обсуждение результатов

Перед обсуждением результатов авторы работы считают необходимым изложить свою точку зрения на первоисточник алмазов.

Первоисточники алмазов на Урале не установлены, однако известно, что сами алмазы кимберлитового генезиса. По-прежнему актуальным остается вопрос о месте и времени кимберлитового магматизма. Вслед за большинством уральских геологов, начиная с А.Д. Ишкова [16], мы считаем, что гипотетические кимберлитовые трубки имеют докембрийский возраст и внедрялись на северо-восточной (в современных координатах) окраине Русской плиты. По материалам бурения параметрических скважин известно, что кристаллический фундамент Волго-Уральской кратонизированной части Восточно-Европейской платформы представлен разнообразными гранитами, амфиболитами, гнейсами, зеленокаменными породами основного состава (метабазальтами) и т. д. Именно эти горные породы размывались в позднем протерозое и в раннем палеозое, поставляя обломочный материал для формирующихся на стадии седиментогенеза палеозойских пород. По известному правилу Клиффорда, кратонизированные части древних платформ являются благоприятными областями для кимберлитового магматизма в периоды тектоно-магматической активизации. Устанавливая питающую провинцию для палеозойских осадочных комплексов, мы можем предполагать и первоисточники алмазов для уральских алмазоносных россыпей. Таким образом, можно констатировать, что кимберлитовый генезис уральских алмазов установлен по самим алмазам, а место и время кимберлитового магматизма предполагаются по косвенным данным, в число которых входит и изучение алмазоносных промежуточных коллекторов.

Генетическая типизация терригенных пород такатинской свиты, проведенная с использованием системы индексов CIA/ICV [31, 32, 37, 38], позволила аттестовать песчаники как незрелые осадки. При этом образец Tkt-3 с показаниями ICV (1,05) близок к оси разделения осадков на зрелые и не зрелые.

Песчаники такатинской свиты, которые характеризуются в целом средней степенью сортировки и окатанности, преимущественно полевошпат-

кварцевого и грауваккового состава, содержание обломков пород достигает 31 %. Помимо кварцитов и кремнисто-сланцевых пород присутствуют обломки алевролитов и кремнистых пород, что свидетельствует о поступлении продуктов выветривания нижележащих осадочных пород протерозоя и раннего палеозоя.

В публикации [39] авторами проведен количественный минералогический анализ тяжелой фракции пробы Тк_1, который выполнен по двум granulometric классам: 0,5–0,25 и 0,25–0,1 мм. Выход тяжелой фракции низкий: 0,09 и 0,56 мас. %, соответственно. Преобладающим минералом является лейкоксен 83,1/78,7 %, затем идет циркон 2,9/6,7 %, турмалин 7,2/2,5 %, ильменит 5/2,5 %, анатаз 0,4/8,3 % и др. минералы. Анализ обломочной части и аксессуарных минералов, полученных по результатам петрографии и количественного минералогического анализа, показал, что в области источника разрушались преимущественно метаморфические и магматические породы кислого состава, при этом существовал источник пород основного состава.

Для пород фиксируется наличие отрицательной европиевой аномалии. Характер распределения спектров РЗЭ подтверждает сделанные выводы по результатам петрографических и минералогических исследований о преимущественно кислом составе пород в области источника сноса.

Присущие в терригенных породах значения отношений Zr/Sc и Th/Sc указывают, в соответствии с представлениями [37], на то, что в их составе доминирует материал первого цикла седиментации, источником которого были магматические породы преимущественно кислого состава (рис. 7, Е).

Полученный результат не противоречит имеющимся представлениям о происхождении терригенных пород такатинской свиты. В настоящее время основным источником сноса терригенного материала считаются внутренние районы ВЕП.

В конце раннего девона в западноуральский бассейн сносился терригенный материал за счет разрушения древних ($>1,9$ млрд лет) комплексов магматических и метаморфических пород приподнятых блоков фундамента, в строении которых участвовали только архейские и палеопротерозойские кристаллические комплексы [40, 41]. Временной интервал между формированием пород такатинской свиты и $U-Pb$ изотопным возрастом самого молодого циркона, выделенного из них, составляет около 1,5 млрд лет [42].

Накопления пород шло в обстановках пассивной континентальной окраины, что подтверждается расположением фигуративных точек на палеогеодинамической диаграмме М. Бхатиа [35] (рис. 7, D).

Рассматриваемый стратиграфический интервал приурочен к тракту низкого стояния уровня моря такатинско-койвинского суперсеквенса. В такатинское время фиксируется региональный локальный минимум относительного уровня моря, сопряженный с континентальными и переходными обстановками осадконакопления [43, 44].

Заключение

В результате исследования авторами приведено детальное геологическое описание разреза «Южная Рассольная», который сопоставлен с типовым разрезом такатинских пород. В результате сопоставления отмечено, что базальными отложениями разреза «Южная Рассольная» являются гравелиты, а не конгломераты, как в типовом разрезе «Сухая Волынка». Оба разреза презентуются в печати впервые.

Формирование отложений происходило в переходной обстановке осадконакопления. Снизу вверх наблюдается трансгрессивная последовательность.

Терригенные породы такатинской свиты имеют в своем составе породы первого и второго циклов седиментации. Образовались за счет разрушения как первично-магматических (кислого и основного состава) и метаморфических, так и осадочных пород.

Совокупность вещественных характеристик терригенных пород такатинской свиты, с учетом опубликованных данных, позволила предположить, что седиментация пород происходила на пассивной континентальной окраине, при поступлении обломочного материала за счет размыва внутренних приподнятых блоков фундамента ВЕП, активизация которых произошла в эмское время при проявлении общелитосферной складчатости. Анализируемый песчаный материал преодолел значительное расстояние от источника сноса до бассейна седиментации. При его транспортировке водными потоками происходила эрозия в первую очередь осадочных пород дотакатинского времени, а именно верхнего протерозоя и раннего палеозоя. Именно в составе обломков конгломератов наблюдаются продукты разрушения «местных» осадочных пород.

Комплекс прецизионных исследований коренных пород такатинской свиты на месторождении «Южная Рассольная» выполнен авторами впервые.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернова О.С. Научные основы построения геостатических моделей и геометризации юрско-меловых природных резервуаров Западной Сибири на базе петрофизических и седиментологических исследований кернa: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск, 2018. – 522 с.
2. Reading H.G. Sedimentary environments and facies. – Boston: Blackwell, 1990. – 615 p.

3. Selim S.S. Sedimentology and stratigraphic evolution of fluvial-tidal transition reservoirs: an outcrop analog for the hydrocarbon-bearing Bahariya Formation, Western Desert, Egypt // *Journal of Sedimentary Research*. – 2023. – Vol. 93. – № 1. – P. 50–70.
4. Paleoenvironmental evolution of an Early Devonian section from Paraná Basin (South of Brazil) based on a multiproxy approach / R.M.A. Gama, K.B. Costa, D.E.S. dos Reis, E. Pereira // *J. Sediment. Environ.* – 2022. – Vol. 7. – P. 111–123.
5. Bonev N., Chiaradia M., Moritz R. Strontium isotopes reveal Early Devonian to Middle Triassic carbonate sedimentation in the Sakar-Strandzha Zone, SE Bulgaria // *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)*. – 2022. – Vol. 111. – P. 1307–1314.
6. The proto-type basin and tectono-paleogeographic evolution of the Tarim basin in the Late Paleozoic / J. Xia, Z. Zhong, S. Huang, C. Luo, H. Lou, H. Chang, X. Li, L. Wei // *Front. Earth Sci.* – 2023. – Vol. 11. – P. 1–17.
7. Proterozoic–Phanerozoic tectonic evolution of the Qilian Shan and Eastern Kunlun Range, northern Tibet / Ch. Wu, J. Li, A.V. Zuza, P.J. Hapf, X. Chen, L. Ding // *GSA Bulletin*. – 2021. – Vol. 134. – № 9–10. – P. 2179–2205.
8. Waters J., Ausich W. *Gennaeocrinus tariatensis*, a new Emsian (Devonian) monobathrid crinoid from the Tarvagatay Terrane of Mongolia // *Journal of Paleontology*. – 2022. – Vol. 96. – № 3. – P. 631–637.
9. Thomsen V. Basic fundamental parameters in X-ray fluorescence May Spectroscopy // *Springfield then Eugene then Duluth*. – 2007. – Vol. 22. – № 5. – P. 46–50.
10. Хрущева М.О., Тишин П.А., Чернышов А.И. Геохимическая характеристика рассолов и современных эвапоритов урочища Талое Озеро (Республика Хакасия) // *Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле*. – 2019. – № 30. – С. 130–140.
11. Атлас Пермского края / под ред. С.А. Бузмакова и др. – Пермь: ПГНИУ, 2012. – 124 с.
12. Олли А.И. Древние отложения западного склона Урала. – Саратов: Изд-во СГУ, 1948. – 413 с.
13. Келлер Б.М. Такатинская свита Башкирии // *Известия АН СССР. Серия геологическая*. – 1947. – № 2. – С. 137–139.
14. Марковский Б.П. Такатинские слои, свита. Стратиграфический словарь СССР. – М.: Гос. науч.-тех. изд-во литературы по геологии и охране недр, 1956. – 904 с.
15. Чочия Н.Г. Геологическое строение Колво-Вишерского края. – Л.: Госгеолтехиздат, 1955. – 407 с.
16. Ишков А.Д. Источники алмазов Уральских россыпей на примере Красновишерского района // *Совещание по геологии алмазных месторождений (тезисы докладов)*. – Пермь: Изд-во «Звезда», 1966. – С. 32–35.
17. Diamond accessory minerals in the Rassolninskoe and Volynka deposits (Perm' Oblast, Russia) / A.B. Makeev, B.M. Osovetskii, E.N. Cherepanov, V.A. Naumov // *Geology of Ore Deposits*. – 1999. – Vol. 41. – № 6. – P. 478–494.
18. Шмаков И.И. Геолого-генетические модели алмазных россыпей Африки (Намибия и Конго) и России (западного склона Урала): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – М., 2008. – 26 с.
19. Шмаков И.И., Божко Е.Н. Происхождение морских россыпей алмазов Намибии // *Вестник ВГУ, серия: Геология*. – 2008. – № 1. – С. 116–126.
20. Ветчанинов В.А. Такатинская свита среднего девона – источник алмазов уральских россыпей // *Геология и геофизика*. – 1987. – № 4. – С. 137–141.
21. Колобянин В.Я., Васильев С.И., Чумаков А.М. Отчет по поискам первоисточников алмазов на Колчимском поднятии в Красновишерском районе Пермской области за 1980–1984 гг. – Пермь, 1984. – Р-40-XXXIV.
22. Конев П.Н., Чалов Б.Я. Условия образования и продуктивность такатинской свиты Колво-Вишерского края // *Геология и полезные ископаемые Урала: Материалы к II уральской конференции молодых геологов. Ч. I*. – Свердловск, 1969. – С. 63–65.
23. Колобянин В.Я., Погорелов Ю.И., Васильев С.И. Отчет по поискам первоисточников алмазов в бассейне р. Большой Колчим Вишерского алмазоносного района (участки Больше-Колчимский и Буркочимский), проведенным в 1976–1979 гг. – Набережный, 1979. – 251 с.
24. Конев П.Н., Чалов Б.Я. Изучение обломочного кварца такатинской свиты Колво-Вишерского края для палеогеографических реконструкций // *Литология и полезные ископаемые*. – 1972. – № 5. – С. 21–25.
25. Беккер Ю.Р., Бекасова Н.Б., Ишков А.Д. Алмазоносные россыпи в девонских отложениях Северного Урала // *Литология и полезные ископаемые*. – 1970. – № 4. – С. 65–77.
26. Литология, условия образования и алмазоносность такатинской свиты Колво-Вишерского края (Отчет Эйфельского отряда Поисково-Прогнозной партии за 1966–1967 гг.) / П.Н. Конев, Б.Я. Чалов, Г.И. Лучников, В.П. Шуйский. – Набережный: ВГФ, УГФ, ВСЕГЕИ, 1968. – Р-40-XXVII–XXIX, XXXIII–XXXV.
27. Чуйко В.А., Синкин В.А. Путеводитель геологической экскурсии «Россыпные месторождения алмазов Красновишерского района». – Красновишерск; Пермь: Перм. ун-т; ЗАО «Уралалмаз», 2005. – 28 с.
28. Харитонов Т.В. О такатинской свите Пермского края. Проблемы минералогии, петрографии и металлогении // *Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского*. – 2021. – № 24. – С. 266–273.
29. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Уральская. Лист Р-40 – Североуральск. Объяснительная записка. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2005. – 332 с.
30. Логвиненко Н.В. Петрография осадочных пород (с основами методики исследования). – М.: Высшая школа, 1974. – 400 с.
31. Nesbitt H.W., Young G.M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites // *Nature*. – 1982. – Vol. 299. – P. 715–717.
32. Cox R., Lowe D.R.A. Conceptual review of regional-scale controls on the composition of clastic sediment and the co-evolution of continental blocks and their sedimentary cover // *Journal of Sedimentary Research*. – 1995. – Vol. 1. – P. 1–12.
33. Boynton W.V. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies // *Rare earth element geochemistry* / Ed. by P. Henderson. – New York: Elsevier, 1984. – P. 63–114.
34. Pettijohn F.I., Potter P.E., Siever R. Sand and sandstone. – New York: Springer, 1972. – 618 p.
35. Bhatia M.R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones // *J. Geol.* – 1983. – Vol. 91. – P. 611–627.
36. Cullers R.L. Implications of elemental concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, CO, USA // *Chem Geol.* – 2002. – Vol. 191. – P. 305–327.

37. Geochemical approaches to sedimentation, provenance and tectonics / S.M. McLennan, S. Hemming, D.K. McDaniel, G.N. Hanson // *Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments. Special Papers, Geological Society of America* / Eds. M.J. Johnsson, A. Basu. – Massachusetts: Geological Society of America, 1993. – Vol. 284. – P. 21–40.
38. Fedo C., Nesbitt H.W., Young G.M. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance // *Geology*. – 1995. – Vol. 23. – P. 921–924.
39. Пактовский Ю.Г., Томилина Е.М. Новые данные о базальных отложениях такатинской свиты на Южнорассольнинском месторождении алмазов (Пермский край) // *Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского*. – 2023. – № 26. – С. 207–214.
40. Первые U/Pb-данные о возрастах детритных цирконов из песчаников верхнеэмской такатинской свиты Западного Урала (в связи с проблемой коренных источников уральских алмазоносных россыпей) / Н.Б. Кузнецов, Т.В. Романюк, А.В. Шаццло, С.Ю. Орлов, В.М. Горожанин, Е.Н. Горожанина, Е.С. Серегина, Н.С. Иванова, Дж. Меерт // *Доклады Академии Наук*. – 2014. – Т. 455. – № 4. – С. 427–432.
41. Пыжова Е.С., Попова Н.С. Результаты изотопного (U/Pb) датирования обломочных (детритных) цирконов из песчаников алмазоносной эмской (нижний девон) такатинской свиты западного Урала // *Вестник РУДН. Инженерные исследования*. – 2015. – № 1. – С. 45–51.
42. О некоторых общих особенностях формирования терригенных отложений Западного Урала: синтез данных изотопного U–Pb датирования обломочных цирконов и геохимических исследований глинистых пород / А.В. Маслов, Г.А. Мизенс, Г.М. Вовна, В.И. Киселёв, Ю.Л. Ронкин // *Литосфера*. – 2016. – № 3. – С. 27–46.
43. Строение и этапы развития осадочного бассейна северо-востока Восточно-Европейской платформы в протерозое и палеозое на основе многолетних наблюдений геологических разрезов и исследований глубоких скважин / А.И. Сулима, А.В. Плюснин, Л.Д. Плешков, Я.С. Трубин, В.Д. Тимофеев // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 11. – С. 141–160.
44. Snedden J.W., Liu C. A compilation of Phanerozoic sea level change, coastal onlaps, and recommended sequence designations // *American Association of Petroleum Geologists Search and Discovery Article*. – 2010. – 3 p.

Информация об авторах

Юрий Германович Пактовский, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры минералогии и петрографии Пермского Государственного национального исследовательского университета им. А.М. Горького, Россия, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15. urijpaktovskij65@gmail.com

Алексей Владимирович Плюснин, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории седиментологии и эволюции палеобиосферы Тюменского Государственного университета, Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Ленина, 23. a.v.plyusnin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2386-0287>

Елена Михайловна Томилина, старший преподаватель кафедры минералогии и петрографии Пермского Государственного национального исследовательского университета им. А.М. Горького, Россия, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15. tomilinaelena.psu@yandex.ru

Дмитрий Андреевич Староселец, аспирант, лаборант-исследователь лаборатории седиментологии и эволюции палеобиосферы Тюменского Государственного университета, Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Ленина, 23. d_star1997@mail.ru

Игорь Викторович Афонин, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории структурной петрологии и минерации, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36. heaven05@list.ru

Евгения Сергеевна Рабцевич, кандидат химических наук, инженер-исследователь испытательного центра «Томский региональный центр коллективного пользования», Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36. evgenia882-a@mail.ru

Александр Иванович Сулима, соискатель кафедры региональной и нефтегазовой геологии, Пермский государственный национальный исследовательский университет им. А.М. Горького, Россия, 614000, г. Пермь, ул. Букирева, 15. super.sulima2013@yandex.ru

Виталий Анатольевич Чуйко, главный геолог ООО «Алмайнинг», Россия, 614081, г. Пермь, ул. Кронштадтская, 35. vchujko@mail.ru

Поступила: 01.09.2023

Прошла рецензирование: 20.09.2023

Принята к публикации: 23.05.2024

REFERENCE

1. Chernova O.S. *Scientific bases of construction of geostatic models and geometry of Jurassic-Cretaceous natural reservoirs of Western Siberia on the basis of petrophysical and sedimentological researches of core*. Dr. Diss. Tomsk, 2018. 522 p. (In Russ.)
2. Reading H.G. *Sedimentary environments and facies*. Boston, Blackwell, 1990. 615 p.

3. Selim S.S. Sedimentology and stratigraphic evolution of fluvial–tidal transition reservoirs: an outcrop analog for the hydrocarbon-bearing Bahariya Formation, Western Desert, Egypt. *Journal of Sedimentary Research*, 2023, vol. 93, no. 1, pp. 50–70.
4. Gama R.M.A., Costa K.B., Dos Reis D.E.S., Pereira E. Paleoenvironmental evolution of an Early Devonian section from Paraná Basin (South of Brazil) based on a multiproxy approach. *J. Sediment. Environ*, 2022, vol. 7, pp. 111–123.
5. Bonev N., Chiaradia M., Moritz R. Strontium isotopes reveal Early Devonian to Middle Triassic carbonate sedimentation in the Sakar-Strandzha Zone, SE Bulgaria. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)*, 2022, vol. 111, pp. 1307–1314.
6. Xia J., Zhong Z., Huang S., Luo C., Lou H., Chang H., Li X., Wei L. The proto-type basin and tectono-paleogeographic evolution of the Tarim basin in the Late Paleozoic. *Front. Earth Sci*, 2023, vol. 11, pp. 1–17.
7. Wu Ch., Li J., Zuza A.V., Haproff P.J., Chen X., Ding L. Proterozoic–Phanerozoic tectonic evolution of the Qilian Shan and Eastern Kunlun Range, northern Tibet. *GSA Bulletin*, 2021, vol. 134, no. 9–10, pp. 2179–2205.
8. Waters J., Ausich W. *Gennaeocrinus tariatensis*, a new Emsian (Devonian) monobathrid crinoid from the Tarvagatay Terrane of Mongolia. *Journal of Paleontology*, 2022, vol. 96, no. 3, pp. 631–637.
9. Thomsen V. Basic fundamental parameters in X-ray fluorescence May Spectroscopy. *Springfield then Eugene then Duluth*, 2007, vol. 22, no. 5, pp. 46–50.
10. Khrushcheva M.O., Tishin P.A., Chernyshov A.I. Geochemical characteristics of brines and modern evaporites of the Taloe Ozero tract (Republic of Khakassia). *Bulletin of the Irkutsk State University. Earth Science Series*, 2019, no. 30, pp. 130–140. (In Russ.)
11. *Atlas of the Perm Territory*. Ed. by S.A. Buzmakov. Perm, PGNIU Publ., 2012. 124 p.
12. Ollie A.I. *Ancient deposits of the western slope of the Urals*. Saratov, SGU Publ., 1948. 413 p. (In Russ.)
13. Keller B.M. Takata Formation of Bashkiria. *News of the Academy of Sciences of the USSR. Geological series*, 1947, no. 2, pp. 137–139. (In Russ.)
14. Markovsky B.P. *Takata layers, suite. Stratigraphic Dictionary of the USSR*. Moscow, State sci.-tech. publishing house of literature on geology and protection of mineral resources, 1956. 904 p. (In Russ.)
15. Chochia N.G. *Geological structure of the Kolvo-Vishera region*. Leningrad, Gosgeoltekhizdat Publ., 1955. 407 p. (In Russ.)
16. Ishkov A.D. Sources of diamonds in the Ural placers on the example of the Krasnovishersky region. *Meeting on the geology of diamond deposits (abstracts)*. Perm, Zvezda Publ. House, 1966. pp. 32–35. (In Russ.)
17. Makeev A.B., Osovetskii B.M., Cherepanov E.N., Naumov V.A. Diamond Accessory Minerals in the Rassolninskoe and Volynka Deposits (Perm' Oblast, Russia). *Geology of Ore Deposits*, 1999, vol. 41, no. 6, pp. 478–494.
18. Shmakov I.I. *Geological and genetic models of diamond placers in Africa (Namibia and Congo) and Russia (western slope of the Urals)*. Cand. Diss. Abstract. Moscow, 2008. 26 p. (In Russ.)
19. Shmakov I.I., Bozhko E.N. Origin of marine diamond placers in Namibia. *Bulletin of VSU, series: Geology*, 2008, no. 1, pp. 116–126. (In Russ.)
20. Vetchaninov V.A. Middle Devonian Takatin Formation as a source of diamonds in the Ural placers. *Geology and geophysics*, 1987, no. 4, pp. 137–141. (In Russ.)
21. Kolobyani V.Ya., Vasiliev S.I., Chumakov A.M. *Report on the search for primary sources of diamonds on the Kolchim uplift in the Krasnovishersky district of the Perm region for 1980–1984*. Perm, 1984. R-40-XXXIV. (In Russ.)
22. Konev P.N., Chalov B.Ya. Conditions of formation and productivity of the Takatin Formation of the Kolvo-Vishera Territory. *Geology and Minerals of the Urals. Materials for the II Ural Conference of Young Geologists. Part I*. Sverdlovsk, 1969. pp. 63–65. (In Russ.)
23. Kolobyani V.Ya., Pogorelov Yu.I., Vasiliev S.I. *Report on the search for primary sources of diamonds in the basin of the river. Bolshoi Kolchim of the Vishera diamondiferous region (Bolshekolchimsky and Burkochimsky sections), carried out in 1976–1979*. Naberezhny, 1979. 251 p. (In Russ.)
24. Konev P.N., Chalov B.Ya. Study of detrital quartz of the Takatinsky formation of the Kolvo-Vishera region for paleogeographic reconstructions. *Lithology and minerals*, 1972, no. 5, pp. 21–25. (In Russ.)
25. Becker Yu.R., Bekasova N.B., Ishkov A.D. Diamond-bearing placers in the Devonian deposits of the Northern Urals. *Lithology and minerals*, 1970, no. 4, pp. 65–77. (In Russ.)
26. Konev P.N., Chalov B.Ya., Luchnikov G.I., Shuisky V.P. *Lithology, conditions of formation and diamond content of the Takatinskaya suite of the Kolvo-Vishera region (Report of the Eifel team of the Poiskovoprognoznoy party for 1966–1967)*. Naberezhny, VGF, UGF, VSEGEI Publ., 1968. P-40-XXVII–XXIX, XXXIII–XXXV. (In Russ.)
27. Chuiko V.A., Sinkin V.A. *Guide of the geological excursion "Alluvial diamond deposits of the Krasnovishersky district"*. Krasnovishersk, Perm, Perm University Publ.; CJSC "Uralalmaz" Publ., 2005. 28 p. (In Russ.)
28. Kharitonov T.V. On the Takata Formation of the Perm Territory. Problems of mineralogy, petrography and metallogeny. *Scientific readings in memory of P.N. Chirvinsky*, 2021, no. 24, pp. 266–273. (In Russ.)
29. *State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). Ural series. Sheet P-40 – Severouralsk. Explanatory letter*. St. Petersburg, Cartographic factory VSEGEI Publ., 2005. 332 p. (In Russ.)
30. Logvinenko N.V. *Petrography of sedimentary rocks (with the basics of research methodology)*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1974. 400 p. (In Russ.)
31. Nesbitt H.W., Young G.M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 1982, vol. 299, pp. 715–717.
32. Cox R., Lowe D.R.A. Conceptual review of regional-scale controls on the composition of clastic sediment and the co-evolution of continental blocks and their sedimentary cover. *Journal of Sedimentary Research*, 1995, vol. 1, pp. 1–12.
33. Boynton W.V. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. *Rare earth element geochemistry*. Ed. by P. Henderson. New York, Elsevier, 1984. pp. 63–114.
34. Pettijohn F.I., Potter P.E., Siever R. *Sand and sandstone*. New York, Springer, 1972. 618 p.
35. Bhatia M.R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. *J. Geol*, 1983, vol. 91, pp. 611–627.

36. Cullers R.L. Implications of elemental concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, CO, USA. *Chem Geol*, 2002, vol. 191, pp. 305–327.
37. McLennan S.M., Hemming S., McDaniel D.K., Hanson G.N. Geochemical approaches to sedimentation, provenance and tectonics. *Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments. Special Papers, Geological Society of America*. Eds. M.J. Johnsson, A. Basu. Massachusetts, Geological Society of America, 1993. Vol. 284, pp. 21–40.
38. Fedo C., Nesbitt H.W., Young G.M. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, 1995, vol. 23, pp. 921–924.
39. Paktovsky Yu.G., Tomilina E.M. New data on the basal deposits of the Takatin Formation at the Yuzhnorassolninskoye diamond deposit (Perm Territory). *Problems of mineralogy, petrography and metallogeny. Scientific readings in memory of P.N. Chirvinsky*, 2023, no. 26, pp. 207–214. (In Russ.)
40. Kuznetsov N.B., Romanyuk T.V., Shatsillo A.V., Orlov S.Yu., V.M., Gorozhanina E.N., Seregina E.S., Ivanova N.S., Meert J.J. The first U/Pb data on the ages of detrital zircons from sandstones of the Upper Emskaya Takatin Formation of the Western Urals (in connection with the problem of primary sources of Ural diamondiferous placers). *Reports of the Academy of Sciences*, 2014, vol. 455, no. 4, pp. 427–432. (In Russ.)
41. Pyzhova E.S., Popova N.S. Results of isotope (U/Pb) dating of clastic (detrital) zircons from sandstones of the diamond-bearing Ems (Lower Devonian) Takatin Formation of the Western Urals. *Bulletin of RUDN University. Engineering research*, 2015, no. 1, pp. 45–51. (In Russ.)
42. Maslov A.V., Mizens G.A., Vovna G.M., Kiselev V.I., Ronkin Yu.L. On some general features of the formation of terrigenous deposits of the Western Urals: synthesis of U–Pb isotopic dating of detrital zircons and geochemical studies of clayey rocks. *Lithosphere*, 2016, no. 3, pp. 27–46. (In Russ.)
43. Sulima A.I., Plyusnin A.V., Pleshkov L.D., Trubin Ya.S., Timofeev V.D. The structure and stages of development of the sedimentary basin of the northeast of the East European Platform in the Proterozoic and Paleozoic based on long-term observations of geological sections and research of deep wells. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 11, pp. 141–160. (In Russ.)
44. Snedden J.W., Liu C. A compilation of Phanerozoic sea level change, coastal onlaps, and recommended sequence designations. *American Association of Petroleum Geologists Search and Discovery Article*, 2010, 3 p.

Information about the authors

Yury G. Paktovsky, Cand. Sc., Associate Professor, A.M. Gorky Perm State National Research University, 15, Bukirev street, Perm, 614990, Russian Federation. urijpaktovskij65@gmail.com

Aleksey V. Plusnin, Cand. Sc., Senior Researcher, University of Tyumen, 23, Lenin street, Tyumen, 625003, Russian Federation. a.v.plyusnin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2386-0287>

Elena M. Tomilina, Senior Lecturer, A.M. Gorky Perm State National Research University, 15, Bukirev street, Perm, 614990, Russian Federation. tomilinaelena.psu@yandex.ru

Dmitry A. Staroselets, Postgraduate Student, University of Tyumen, 23, Lenin street, Tyumen, 625003, Russian Federation. d_star1997@mail.ru

Igor V. Afonin, Cand. Sc., Senior Researcher, National Research Tomsk State University, 36, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. heaven05@list.ru

Evgenia S. Rabtsevich, Cand. Sc., Research Engineer, National Research Tomsk State University, 36, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. evgenia882-a@mail.ru

Alexander I. Sulima, Applicant, A.M. Gorky Perm State National Research University, 15, Bukirev street, Perm, 614990, Russian Federation. super.sulima2013@yandex.ru

Vitaly A. Chuiko, Chief Geologist, Almayning LLC, 35, Kronstadtskaya street, Perm, 614081, Russian Federation. vchujko@mail.ru

Received: 01.09.2023

Revised: 20.09.2023

Accepted: 23.05.2024

УДК 552.52:552.552:552.14
DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4699
Шифр специальности ВАК: 1.6.11, 1.6.5

Кора выветривания доюрского комплекса Калинового месторождения углеводородов Томской области: особенности состава и строения

Л.А. Краснощекова^{1✉}, И.В. Вологодина², А.С. Гарсия Бальса¹

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

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

✉ krasnl@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена возможностью прироста ресурсов углеводородов в образованиях доюрского фундамента Западной Сибири, отложения которого продуктивны и рассматриваются как перспективные объекты для открытия месторождений углеводородов. Кора выветривания, развитые по породам палеозойского фундамента в пределах Томской области, характеризуются сложным вещественным составом и строением, представляют собой продукт суммарного взаимодействия множества факторов – первичных седиментогенных и эпигенетических процессов, трещинного флюидного метасоматоза. *Цель.* Установить особенности минералогического состава и строения палеозойских образований коры выветривания, развитой на Калиновом нефтегазоконденсатном месторождении. *Методы.* Кристаллооптический, рентгеноструктурный, сканирующая электронная микроскопия. *Результаты и выводы.* Детально изучены состав и строение пород зоны контакта мезозойских отложений и палеозойского фундамента в разрезе одной из скважин Калинового нефтегазоконденсатного месторождения. Фактический материал для исследований представлен керном и шлифами отложений коры выветривания. Основными компонентами, слагающими породы, являются минералы группы кремнезема (кварц, халцедон и опал) и глинистые минералы при подчиненной роли карбонатов (сидерита). В зависимости от содержания минералов и органических остатков (радиолярий и спикул губок) выделены литотипы пород, указывающие на их формирование в бассейновых условиях. Протолитами измененных пород являлись кремнисто-глинисто-карбонатные породы, кремнеаргиллиты, радиоляриты, которые в результате стадийных и вторичных гидротермально-метасоматических процессов преобразованы в глинисто-кремнистые породы. В последних при интенсивном развитии постстадийных изменений могут проявляться хорошие коллекторские свойства. В этом случае пустотное пространство представлено биопустотами и микрокавернами, микропорами и раскрытыми трещинами.

Ключевые слова: глинисто-кремнистые породы, кора выветривания, фундамент, палеозой (доюрский комплекс), нефтегазоносный горизонт зоны контакта

Для цитирования: Краснощекова Л.А., Вологодина И.В., Гарсия Бальса А.С. Кора выветривания доюрского комплекса Калинового месторождения углеводородов Томской области: особенности состава и строения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 6. – С. 160–174. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4699

UDC 552.52:552.552:552.14
DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4699

Pre-Jurassic weathering crust of the Kalinovie hydrocarbon deposit, Tomsk region: composition and structure characteristics

L.A. Krasnoshchekova^{1✉}, I.V. Vologdina², A.S. Garcia Balca¹

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

² National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

✉ krasnl@yandex.ru

Abstract. The study of pre-Jurassic deposits in the southwestern part of Western Siberia is highly relevant due to their potential of increasing hydrocarbon resources. These deposits are considered as prospective targets for the discovery of hydrocarbon accumulations. Weathering crusts developed on the upper part of the Paleozoic rocks in the Tomsk region exhibit a complex composition and structure, reflecting the interplay of various factors, including primary sedimentary processes and later alteration processes, including fracture-controlled fluid flow and metasomatism. **Aim.** To establish the characteristics of the mineralogical composition and structure of the Paleozoic weathering crust formations developed at the Kalinovoe oil-gas-condensate field. **Methods.** Optical microscopy, X-ray diffraction, scanning electron microscopy. **Results and conclusions.** The composition and structure of the deposits at the boundary zone between the Paleozoic and Mesozoic successions have been studied in detail in the section of one of the wells at the Kalinovoe oil-gas-condensate field. The factual material is represented by core and thin sections of weathering crust deposits. The primary rock-forming minerals are silica minerals (quartz, chalcedony and opal) and clay minerals, with a lesser amount of carbonate minerals (siderite). Different lithological units were identified based on the content of minerals and bioclast (radiolarians and sponge spicules), indicating their formation under marine conditions. The protoliths of the altered rocks were carbonate-siliceous rocks, argillaceous limestones, and radiolarian cherts, which as a result of multiple stages of hydrothermal alteration and metasomatic processes were transformed into argillaceous-silicified rocks. In these rocks, with intense post-alteration overprinting, good reservoir quality porosity can develop. This porosity includes biogenic voids, microcavities, micropores, and open fractures.

Keywords: argillaceous-silicified rocks, weathering crust, upper part of the Paleozoic, Paleozoic (pre-Jurassic complex), hydrocarbon horizon of the boundary zone

For citation: Krasnoshchekova L.A., Vologdina I.V., Garcia Balca A.S. Pre-Jurassic weathering crust of the Kalinovoe hydrocarbon deposit, Tomsk region: composition and structure characteristics. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 6, pp. 160–174. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4699

Введение

В палеозойских (доюрских) отложениях Западной Сибири (ЗС) залежи углеводородов локализуются преимущественно в трех основных типах пород: 1) кислых магматических, включая плутониты и вулканиты; 2) глинисто-кремнистых образованиях коры выветривания (КВ), развивающихся по кремнистым известнякам и кремнеаргиллитам; 3) известняках коренного палеозоя [1–4].

Продуктивные отложения зоны контакта мезозойских и доюрских коренных пород фундамента ЗС и сформировавшиеся по ним коры выветривания выделяют в качестве самостоятельного объекта поиска углеводородов – нефтегазоносного горизонта зоны контакта (НГТЗК) [3, 5]. Соответственно, нефтеперспективным объектом в НГТЗК является пласт М, в кровельной части палеозойского фундамента – пласт М₁, в глубинном палеозое – пласты М₂, М₃ и далее.

Зона контакта мезозойского чехла и палеозойского (доюрского) фундамента ЗС характеризуется чрезвычайно сложным внутренним строением, что обусловлено не только длительной эпохой поверхностного выветривания, но и сложной продолжительной историей существования данной поверхности в погребенном состоянии, в условиях тектонической дезинтеграции и воздействия флюидов. В связи с тем, что измененные породы в кровле палеозоя служат часто резервуарами нефти и газа, вопрос о строении зоны имеет не только региональное, но и огромное практическое значение [6].

В Томской области первые скважины, пробуренные до кровли палеозоя, вскрыли магматические породы и известняки, интенсивно замещенные глинистыми минералами, объединенные и описан-

ные как коры выветривания [7] и обобщенные позже в монографии по месторождениям Сибири [8]. Строение КВ с выделением геохимической, минералогической и петрофизической неоднородности фундамента нефтегазоносных бассейнов приведено в работах [9–13 и др.]. Корреляция отложений КВ и доюрского основания в ЗС, особенности развития зоны контакта, стратификация КВ, вторичные преобразования материнских пород подробно изучались в [6, 14–19 и др.].

Свойства коренных пород, типичные профили, основные процессы и контролирующие факторы резервуаров КВ в различных регионах мира исследовали [20–31 и др.].

Признаки нефтеносности и промышленные скопления нефти и газа, помимо традиционных осадочных песчаных и карбонатных отложений, в настоящее время установлены в магматических и метаморфических породах и КВ, ранее относившихся к неперспективным образованиям на УВ, а сейчас рассматриваемых как новый нефтеносных этаж и глобальный объект земной коры [32].

Таким образом, «нефтегазоносность фундамента различных регионов мира из чисто теоретической проблемы нефтегазовой геологии переходит в практическую, требующую целенаправленных комплексных геолого-геофизических исследований, учитывающих специфику объекта» [33. С. 102].

Целью работы являлось детальное литолого-петрографическое изучение отложений КВ (пласт М) опорного разреза одной из скважин Калинового нефтегазоконденсатного (НГК) месторождения с выделением вторичных изменений пород, влияющих на их фильтрационно-емкостные характеристики.

Краткая геологическая характеристика исследуемого объекта

Калиновое НГК месторождение находится в пределах Чузикско-Чижапской зоны нефтегазоаккумуляции, расположенной на юго-востоке ЗС в Парабельском районе Томской области. Чузикско-Чижапская мезоседловина, являясь зоной сочленения Лавровского мезовала и Пудинского мезоподнятия, осложнена значительным количеством локальных поднятий, в отложениях которых открыты месторождения нефти и газа в НГГЗК (рис. 1). Нефтяная залежь в выветрелых отложениях Калинового локального поднятия развита только на западном куполе и представлена интенсивно измененными породами глинисто-кремнистого состава [34].

Изучение вещественного состава и палеогеографических условий формирования доюрских образований рассматриваемой территории позволили [3] выделить в Чузикско-Чижапской мезоседловине юго-западную зону преобладающего развития органогенных известняков и северо-восточную и во-

сточную зону кремнисто-глинисто-карбонатных пород (рис. 2).



Рис. 1. Территориально-административная приуроченность Калинового месторождения
Fig. 1. Regional and administrative location of the Kalinovo field

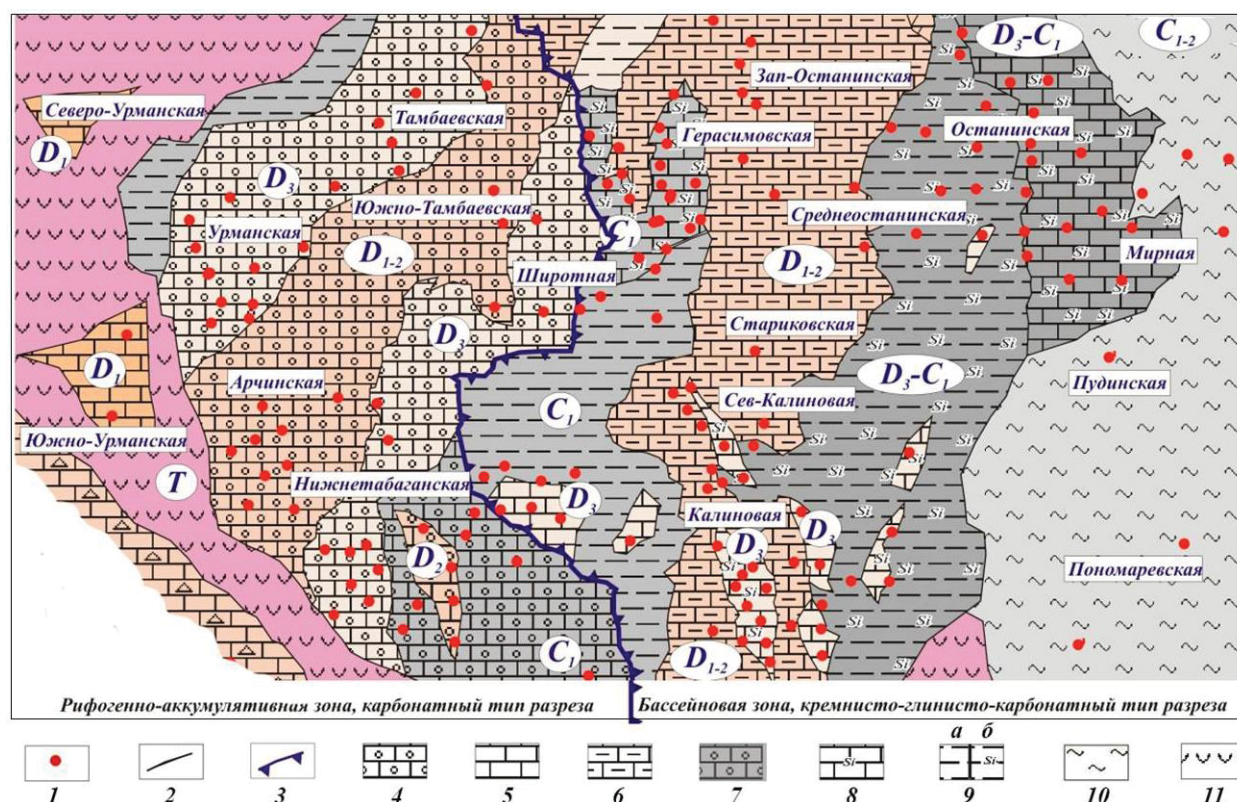


Рис. 2. Карта вещественного состава коренных пород доюрского основания (Чузикско-Чижапская зона) [3]. 1 – скважины; 2 – границы блоков; 3 – граница рифогенно-аккумулятивной и бассейновой зон; известняки: 4 – нижнего девона; 5, 6 – нижнего-среднего девона: 5 – органогенные; 6 – глинистые; 7 – органогенный известняк верхнего девона – нижнего карбона; 8 – кремнистые известняки верхнего девона – нижнего карбона; 9 – породы верхнего девона – нижнего карбона: а – терригенные, б – кремнистые терригенные; 10 – глинистые сланцы нижнего – среднего карбона; 11 – раннетриасовые вулканиды

Fig. 2. Lithological map of Paleozoic deposits (pre-Jurassic deposits) in Chuzhik-Chizhapa zone [3]: 1 – wells; 2 – block boundaries; 3 – boundary of reef and basin environments of oil generation; limestones: 4 – Early Devonian; 5, 6 – Early-Middle Devonian: 5 – organogenic; 6 – argillaceous; 7 – Late Devonian – Early Carboniferous organic; 8 – Late Devonian – Early Carboniferous siliceous limestones; 9 – terrigenous (a) and siliceous-terrigenous (b) Late Devonian – Early Carboniferous rocks; 10 – Early-Middle Carboniferous clay shales; 11 – Early Triassic volcanics

Последние являются более глубоководными отложениями и указывают на увеличение глубины морского бассейна в направлении их развития. Проявившаяся позднее герцинская складчатость и дезинтеграция пород в перерывах осадконакопления в предъюрский период приводит к образованию КВ отложений палеозоя: брекчированных КВ глинисто-известкового состава по органогенным известнякам, по кремнеаргиллитам и кремнистым известнякам развиваются глинисто-кремнистые КВ.

В пределах наиболее контрастных эрозионно-тектонических выступов доюрского основания (Герасимовской, Калиновой и Останинской площадях), сложенных кремнистыми известняками, отмечаются наибольшие по толщине глинисто-кремнистые КВ (пласт М) (рис. 3) [3]. При интенсивности проработки таких отложений гипергенными и метасоматическими процессами могут формироваться пласты с хорошими коллекторскими свойствами [35].

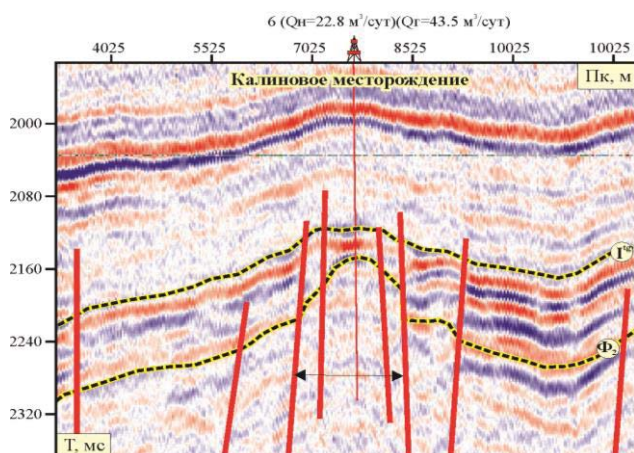


Рис. 3. Эрозионно-тектонические выступы доюрского основания Калинового месторождения, сложенные кремнистыми известняками [3]

Fig. 3. Erosional-tectonic uplifts of the pre-Jurassic deposits at the Kalinovo field, composed of carbonate-siliceous rocks [3]

Материалы и методы исследования

Изучался разрез доюрского комплекса отложений (50,96 м керна) одной из скважин Калинового месторождения, из которых были изготовлены 109 прокрашенных синей эпоксидной смолой шлифов. Детальное исследование состава и особенностей микростроения пород проводилось на петрографическом микроскопе Olympus BX53F с камерой DP23 и программой изображений cellSens Entry.

Рентгеновский дифрактометр ДРОН-7 с твердотельным энергодисперсионным детектором использовался для определения минералогического состава глинистой фракции образцов горных пород

методом полуколичественного рентгенофазового анализа.

Для уточнения фазового, химического состава и морфологических характеристик минералов пород применялся сканирующий электронный микроскоп JEOL JSM-6510 с детектором X-MAX^N (Oxford Instruments) и диапазоном измерений линейных размеров 0,003–1000 мкм.

Результаты исследования и их обсуждение

Петрография пород Калинового месторождения

Отложения скважины охарактеризованы керном в интервалах глубин 2887–2946,6 м, в верхней части разреза (~6 м) при макроскопическом описании определяются светло-серые алевролиты разномерные, глинистые и/или с обломками гравийной размерности и гравелиты разнообломочные с алевроитовым цементом.

С глубины 2893 м породы представлены глинисто-кремнистыми разновидностями, преимущественно массивными или с участками пологоволнистой слоистости, нарушенной деформацией (оползанием), пятнисто ожелезненные, с открытыми или залеченными трещинами. Именно указанный интервал глинисто-кремнистых пород и являлся целевым объектом микроскопического изучения в данной работе.

Для большей части исследуемого разреза в интервале 2893–2946,6 м характерно слоистое и микрослоистое строение, обусловленное чередованием прослоев с разным содержанием тех или иных составляющих компонентов. По данным рентгенофазового анализа в породах преобладают минералы кремнезема с содержанием 48–97 % (в единичных образцах – 19 %); остальная часть приходится на глинистые (2–35 % и фрагментарно 69 %) и карбонатные (0–19 %) минералы, что позволяет выделять разновидности пород в зависимости от минералогического состава: кремнистого, глинистого, железистого, карбонатного материала и органогенных остатков.

Учитывая, что минералогический состав и органические остатки в породах изучаемого разреза одни и те же, и меняется только их процентное соотношение в определенных литотипах, выделение последних основано на преобладающем компонентном составе с последующей детализацией в подтипах пород.

В изучаемой толще по микроскопическому определению выделены литотипы с детализацией на разновидности по составу пород (таблица).

Структурно-текстурные особенности строения пород

Для всех изученных образцов пород характерна реликтовая органогенная структура, что обусловлено присутствием реликтов радиолярий с фрагментарным появлением примеси спикул губок.

Таблица. Типизация пород по составу в разрезе скважины Калиновое месторождения

Table. Lithological classification of rocks in the well section of the Kalinovie field

Тип пород Rock types	Литотип Lithotype
Глинисто-кремнистый Argillaceous-siliceous	Глинисто-кремнистый с примесью радиолярий Argillaceous-siliceous with a mixture of radiolarians; Глинисто-кремнистый радиоляриевый Argillaceous-siliceous radiolarian; Глинисто-кремнистый гидрослюдистый с примесью радиолярий Argillaceous-siliceous hydromicaceous with a mixture of radiolarians; Глинисто-кремнистый сидеритизированный, окремненный Argillaceous-siliceous sideritized hydromicaceous with a mixture of radiolarians; Глинисто-кремнистый, метасоматически измененный Argillaceous-siliceous metasomatically altered
Кремнисто-глинистый Siliceous-argillaceous	Кремнисто-глинистый (кремнеаргиллит) Siliceous-argillaceous
Радиолярит Radiolarite	Радиолярит глинисто-кварц-халцедоновый Radiolarite argillic-quartz-chalcedonous; Радиолярит глинисто-халцедон-кварцевый Radiolarite argillic-calcedony-quartz
Туфопелитолит Tuffaceous pelitic	Туфопелитолит гидрослюдистый, кремнистый, радиоляриевый Tuffaceous pelitic hydromicaceous, silicious, radiolarian

В *кластолитовых* прослоях глинисто-кремнистых пород структура неравномернозернистая с преобладанием неокатанных и слабоокатанных обломков псефитов с размерами 2–10–22 мм и реже обломочных зерен псаммитовой размерности от 0,1 до 0,5 мм (рис. 4, *a*). Структура цементирующей массы скрыто- и микрокристаллическая, тонкочешуйчатая ориентированная. Тип цемента поровый открытый, коррозионный. Ориентированная текстура формируется в результате субпараллельного расположения уплощенных обломков.

В глинисто-кремнистых прослоях структура неравномернозернистая и варьирует от пелитовой, скрыто- и микрозернистой до тонко- и мелкозернистой. Отмечается сгустковое и комковатое скопление агрегатов вещества. В прослоях, обогащенных микрокристаллическими и тонкочешуйчатыми выделениями гидрослюдой, проявляются участки с ориентированным строением.

Сеть трещин залечена неравномернозернистыми агрегатами кварца, сидерита и колломорфными агрегатами гидроксидов железа. Выделяются участки с гранобластовыми зёрнами и агрегатами кварца крупно- и грубозернистой размерности, с мелко-крупнозернистым сидеритом и микрозернистым каолинитом.

Текстура микро-, тонкослоистая, обусловленная чередованием прослоев с разным содержанием пелитоморфного глинистого материала и наличием более кремнистых прослоев, часто пятнистая, связанная с развитием участков метасоматического замещения с агрегатами сидерита, кварца и каолинита, а также наличием участков с разным количеством бурого глинистого, гидрослюдистого, кремнистого материала.

В кремнисто-глинистых прослоях структура скрыто-микрозернистая, пелитовая, тонкочешуйчатая ориентированная. В связи с наличием органических остатков – реликтовая органогенная. Текстура линзовидная и пятнистая микротекстура обусловлены с образованием агрегатов глинистого, карбонатного и железистого вещества (рис. 4, *b*). В верхних частях разреза наблюдаются деформационные текстуры, выражающиеся в смятии в небольшие складки еще не отвердевшего осадка (текстуры оползания) или же вдавливания кремнистых радиоляритов в менее плотные глинисто-кремнистые прослои. В нижних частях разреза выделяются участки с биогенными текстурами, возникшими в результате жизнедеятельности илоедов (рис. 4, *c*).

В кремнистых и глинисто-кремнистых радиоляритах структура неравномернозернистая. По форме агрегатов сферолитовая (радиально-лучистые агрегаты халцедона замещают скелеты радиолярий) и шароагрегатная (агрегаты микрозернистого кварца замещают скелеты радиолярий). Наличие прослоев в породах с разным содержанием железистого, гидрослюдистого и карбонатного материала обуславливает их слоистую текстуру.

В туфопелитолитах структура пепловая (обломки менее 2 мм), скрытокристаллическая, пелитовая; по составу обломков кристалловитрокластическая. Текстура тонкослоистая, ориентированная, образуемая однонаправленным расположением удлиненных обломков лито- и витрокластов.

В участках метасоматической минерализации структура неравномернозернистая – от микрозернистой до крупнозернистой (0,5–1 мм) и грубозернистой (>1 мм), размер отдельных зерен кварца достигает 3 мм. В отдельных участках гранобластовая. Текстура слойчатая, обусловленная наличием кремнеаргиллитовых, железистых прослоев, зон окремнения и сидеритизации, нередко деформационная (рис. 4, *d*). Неоднородность и пятнистость пород обусловлена развитием участков метасоматического замещения с агрегатами сидерита, кварца и каолинита, а также наличием участков с разным количеством бурого глинистого, гидрослюдистого, кремнистого материала

В трещинах структура неравномернозернистая, местами гранобластовая, оолитовая, сферолитовая.

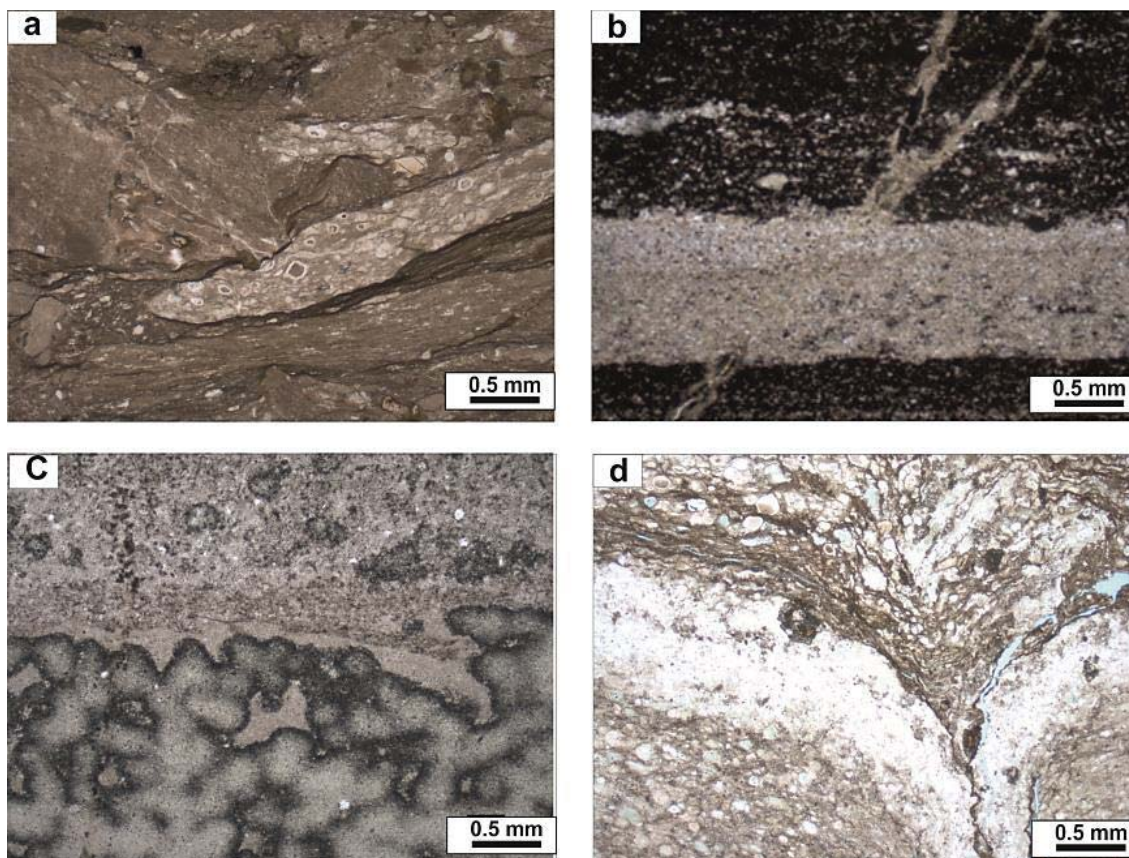


Рис. 4. Структурно-текстурные особенности пород Калинового месторождения (без анализатора): а) гравелито-древяная мелкозернистая структура; б) слоистая текстура. Туфопелитовый окремненный прослой в глинисто-кремнистой породе; в) биотурбитовая текстура, ходы илоедов, заполненные глинисто-кремнистым материалом с примесью органического вещества; д) деформационная текстура в зоне окремнения и сидеритизации

Fig. 4. Textural features of rocks from the Kalinovoe field (without analyzer): a) gravelite-gravel fine-grained structure; b) laminated texture. Tuffaceous pelitic silicified interlayer in argillaceous-siliceous rock; c) bioturbated texture, burrows filled with argillaceous-siliceous material with an admixture of organic matter; d) deformational texture in the zone of silicification and sideritization

Вещественный состав

Минералы кремнезема представлены опалом, кварцем, халцедоном. Скрытокристаллический кремнистый материал составляет основу глинисто-кремнистых пород. При больших увеличениях отмечается поляризация вещества, имеющего оптические характеристики кварца, характеризуется микрозернистыми размерами до 0,005 мм и менее. Скрытокристаллический кремнезем образуется в диагенетическую, раннюю катагенетическую стадию в результате раскристаллизации седиментогенного аморфного кремнезема. В скрытокристаллической массе выделяются микрозернистый кварц и единичные тонкие чешуйки гидрослюда.

Кварц встречается в виде зерен и агрегатов, имеет аутигенную и аллотигенную природу. Аутигенный кварц в виде зерен образуется в результате раскристаллизации седиментогенного кремнезема, формирует удлиненно-призматические дипирамидальные кристаллы (рис. 5, а) и идиоморфные зер-

на – гранобласты (рис. 5, б), в трещинах и зонах метасоматического замещения (трещинный метасоматоз). В некоторых трещинах и пустотах шестоватые кристаллики кварца нарастают на стенки, формируя оторочки (рис. 5, с, д)

Агрегаты микрозернистого аутигенного кварца составляют основу глинисто-халцедон-кварцевых радиоляритов, замещают скелеты радиолярий (рис. 5, е), спикул губок и выполняют трещины.

Аллотигенный кварц – туфогенный и терригенный – наблюдается в туфопелитолитовых прослоях или в качестве примеси практически во всех образцах. Кроме кварца в туфогенных прослоях присутствуют слабокристаллизованные (окремненные) обломки вулканического стекла (витрокласты) таблитчатой, оскольчатой формы или встречаются тонкие, удлиненные обломки изогнутой формы, окремненные (скрытокристаллический кремнистый материал) витрокласты или литокласты.

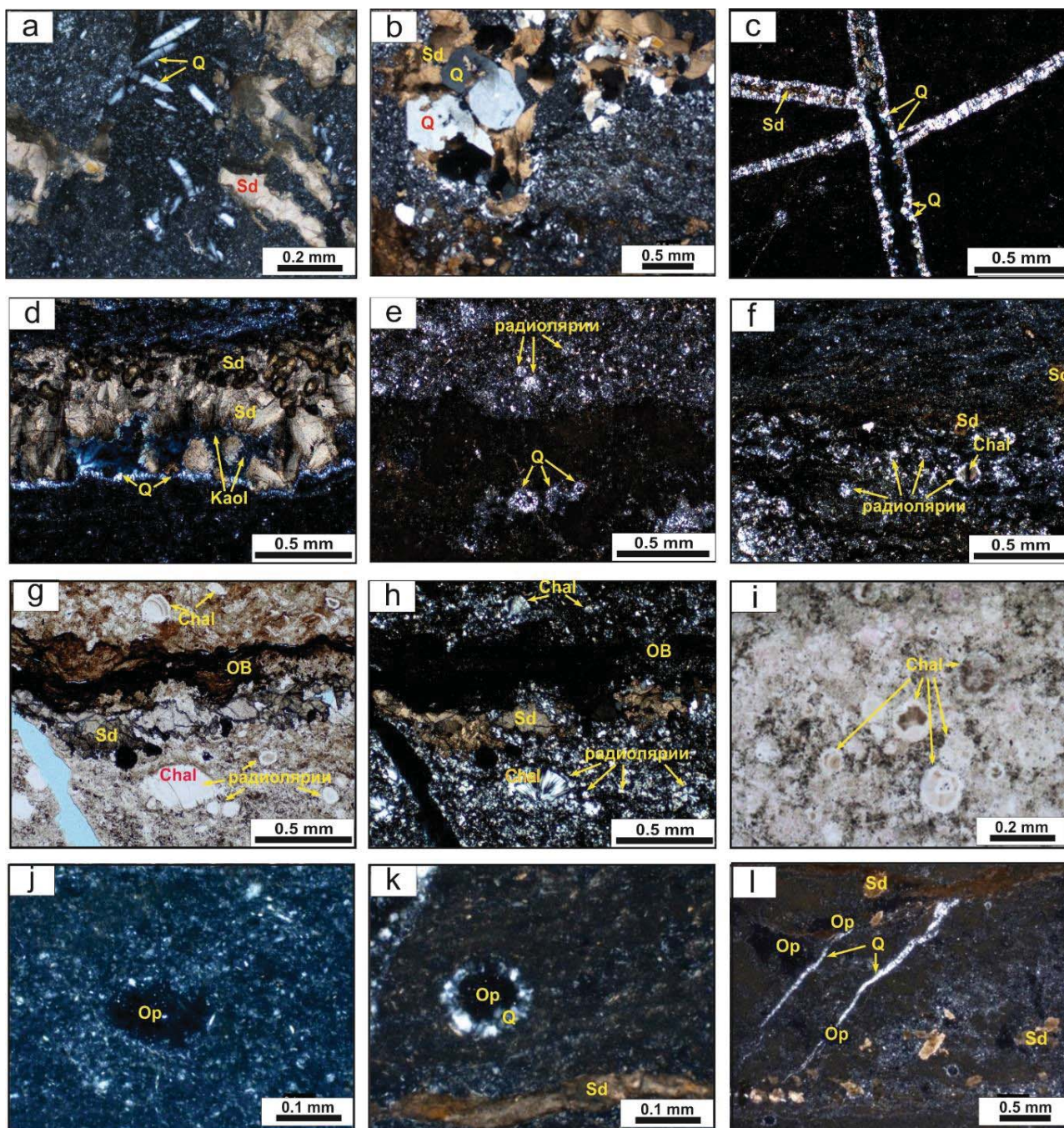


Рис. 5. Минералы группы кремнезема в породах пласта М Калиновое месторождения: а) удлиненные призмы кристаллов кварца; б) гранобластовый агрегат кварца; с, д) шестоватые кристаллы кварца по периферии трещин; е) микрозернистый аутигенный кварц в раковинах радиолярий; ф-и) агрегаты радиально-лучистого халцедона, частично ожелезненного; ж) опал в реликтах радиолярий; к) замещение радиолярии опалом и оторочкой микрокристаллов кварца; л) опал в пустотах выщелачивания, в трещинах – кварц. Условные обозначения: Q – кварц, Chal – халцедон, Op – опал, Sd – сидерит, Kaol – каолинит, OB – органическое вещество. Стрелками указаны остатки радиолярий. Фотографии а-ф, ж, л – с анализатором, г-и – без анализатора

Fig. 5. Silicate group minerals in the M reservoir rocks of the Kalinovoe field: а) elongated prisms of quartz crystals; б) grano-blastic quartz aggregate; с, д) columnar quartz crystals along fracture margins; е) microcrystalline authigenic quartz in radiolarian tests; ф-и) radial-fibrous chalcedony aggregates, partially ferruginous; ж) opal in radiolarian relicts; к) radiolarian replaced by opal and rimmed by microcrystalline quartz; л) opal in dissolution voids, quartz in fractures. Legend: Q – quartz, Chal – chalcedony, Op – opal, Sd – siderite, Kaol – kaolinite, OB – organic matter. Arrows indicate radiolarian remains. Photographs а-ф, ж, л – with analyzer, г-и – without analyzer

Халцедон составляет основу в глинисто-кварц-халцедоновых радиоляритах, в виде радиально-лучистых агрегатов, замещает скелеты радиолярий, часто бывает ожелезнен (рис. 5, *f–h*). В крупных ядрах радиолярий иногда формируется по два–три сферолитовых агрегата халцедона.

Опал встречается не во всех образцах, выполняет ядра радиолярий (рис. 5, *j*), в некоторых радиоляриях опал наблюдается вместе с кварцем, микростеатовые кристаллы которого образуют оторочки в ядрах (рис. 5, *k*), а также заполняет выщелоченное пустотное пространство (рис. 5, *l*). По всей видимости, формирование опала происходило в поздние, наложенные стадии (трещинного метасоматоза) с привнесом в породу кремнезема с гидротермальными флюидами. После процессов выщелачивания – растворения биогенного кремнезема и других компонентов – началась минерализация пустот выщелачивания.

Глинистые минералы аутигенные, представлены гидрослюдой и каолинитом, также в образцах присутствует трудно диагностируемое пелитоморфное железисто-глинистое вещество. Согласно данным полуколичественного рентгенофазового анализа преобладающим глинистым минералом в большинстве образцов является гидрослюда (до 83 %).

Гидрослюда присутствует в виде единичных разнонаправленных тонких чешуек в скрытокристаллической кремнистой массе или в виде агрегатов из однонаправленных чешуек, с одновременным погасанием, придающих породе аргиллитоподобный облик (рис. 6, *a*).

Каолинит также является аутигенным минералом и образуется в результате действия наложенных процессов трещинного метасоматоза. Каолинит заполняет выщелоченные пустоты раковин радиолярий, из которых был вынесен биогенный кремнезем, трещины и кавернозные полости, т. е. является продуктом вторичной минерализации (рис. 6, *b*).

В участках метасоматического замещения каолинит всегда находится совместно с агрегатами сидерита и кварца (рис. 6, *c, d*), отмечается коррозия зерен кварца каолинитом.

Практически по всему изучаемому разрезу наблюдается развитие агрегатов бурого, скрытокристаллического, пелитоморфного вещества железисто-глинистого, глинистого, карбонатно-глинистого состава. Наименьшее количество бурого вещества отмечается в существенно кремнистых радиоляритах, наибольшее – в кремнисто-глинистых прослоях с небольшим количеством радиолярий (рис. 6, *b*).

Карбонатный компонент представлен сидеритом, являющимся продуктом наложенной минерализации, связан с процессами метасоматического

замещения. Глинисто-кремнистые породы во всем изученном интервале в разной степени сидеритизированы. В отдельных частях разреза сидерит встречается только в трещинах и околотрещинном пространстве (рис. 6, *e*), замещает радиолярии (рис. 6, *e, f*) и формирует агрегаты в глинисто-кремнистой массе породы, вплоть до формирования сидеритовых прослоев. Сидерит выполняет роль цемента в брекчированных и кластогенных породах.

Сидеритизация отмечается также и в кремнистых радиоляритовых прослоях. Кроме того, агрегаты сидерита составляет основу в участках метасоматического замещения (рис. 6, *i*).

Формы выделения сидерита разнообразны – единичные удлиненные, ромбовидные (рис. 6, *g*) и таблитчатые зерна, в виде мельчайшей сыпи в околотрещинном пространстве, сфероагрегаты, округлые агрегаты в радиоляриях, округлые агрегаты с крустификационной оторочкой из шестоватых кристалликов (рис. 6, *h*), сноповидные агрегаты, оолитовые образования, часто с отслоившимися скорлупками, с образованием пустот. Сидерит бывает окислен с образованием железистых тонких полосок и пятен внутри агрегатов. Встречаются округлые, звездчатые агрегаты пелитоморфного сидерита, выделяющиеся на светлом фоне породы темно-серой окраской и высоким рельефом без анализатора, с анализатором агрегаты бурые.

Для всего разреза характерно ожелезнение в той или иной степени: гидроксиды железа чаще всего развиваются в трещинах и околотрещинном пространстве.

Поровое пространство формируется за счет развития трещин и процессов выщелачивания и проявляется в растворении биогенного кремнезема, глинисто-кремнистого и карбонатного материала (рис. 7).

Трещины развиты практически во всем интервале. Большинство трещин секущие, субвертикальные, реже послойные. По некоторым субвертикальным трещинам отмечается перемещение пород относительно трещины до 1 см. Послойные трещины часто возникают на границе кремнистых радиоляритов и глинисто-кремнистых прослоев (рис. 7, *f*). Следует отметить, что зачастую на границе формируется зона трещиноватости, трещины тонкие – 0,01–0,1 мм, большей частью открытые. К трещинам приурочены участки ожелезнения, сидеритизации и выщелачивания. Породы по абсолютной проницаемости считаются низко- и среднепроницаемыми.

Наиболее высокие значения пористости и проницаемости отмечаются в образцах с раскрытыми трещинами, с растворенными скелетами радиолярий и открытыми полостями кавернозного типа.

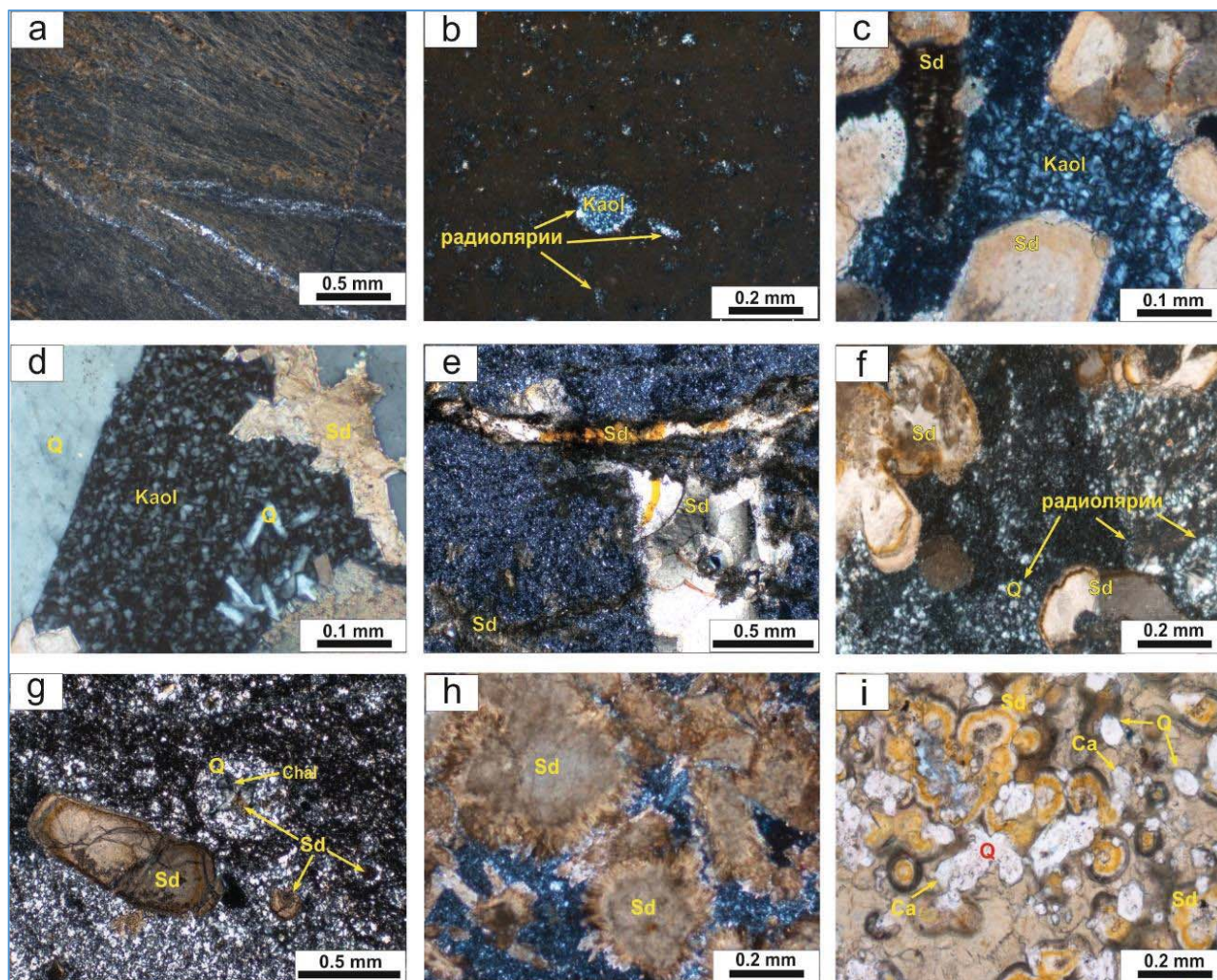


Рис. 6. Глинистые и карбонатные минералы в породах коры выветривания Калиновое месторождения: а) агрегаты тонкочешуйчатой однонаправленной гидрослюда; б) чешуйчатый каолинит в остатке радиолярии; с, d) пакеты каолинита с сидеритом и кварцем в зонах метасоматоза; е, f) развитие сидерита в раковинах радиолярий и трещинах; g) удлиненные кристаллы сидерита с зональностью, частично ожелезненные; h) агрегаты сферосидерита с крустификационной оторочкой; i) оолитовые окисленные агрегаты и ксеноморфные зерна сидерита. Условные обозначения – на рис. 5. Фотографии а–h – с анализатором, i – без анализатора

Fig. 6. Clay and carbonate minerals in weathering crust rocks of the Kalinovoe field: a) aggregates of fine scaly unidirectional hydrous mica; b) scaly kaolinite in radiolarian relict; c, d) kaolinite packets with siderite and quartz in metasomatic zones; e, f) siderite development in radiolarian tests and fractures; g) elongated zoned siderite crystals, partially ferruginous; h) spherosiderite aggregates with crustification rim; i) oolitic oxidized aggregates and xenomorphic siderite grains. Legend is in Fig. 5. Photographs a–h with analyzer, i without analyzer

Постседиментационные преобразования пород

Породы глинисто-кремнистой толщи, составляющие разрез скважины, подверглись как стадийным, так и постстадийным (наложенным) преобразованиям.

Стадийные изменения не превышают позднего катагенеза и выражаются в раскристаллизации глинистого и кремнистого седиментогенного и биогенного материала. Халцедон, кварц и гидрослюда являются продуктами диа- и катагенетических преобразований. Изначально эти породы характеризуются низкими коллекторскими свойствами, первичных пор не наблюдается. Все изме-

нения, повлиявшие на фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС), связаны с развитием наложенных эпигенетических процессов в результате движения флюидов по трещинам. Множество тонких трещин, секущих, субвертикальных и послойных рассекают породы глинисто-кремнистой толщи. Большинство из них залечено сидеритом, микрозернистым кварцем и гидроксидами железа, однако имеются и полностью или частично открытые. То, что трещины явились проводниками гидротермальных флюидов, подтверждается развитием участков метасоматического замещения в околотрещинном пространстве.

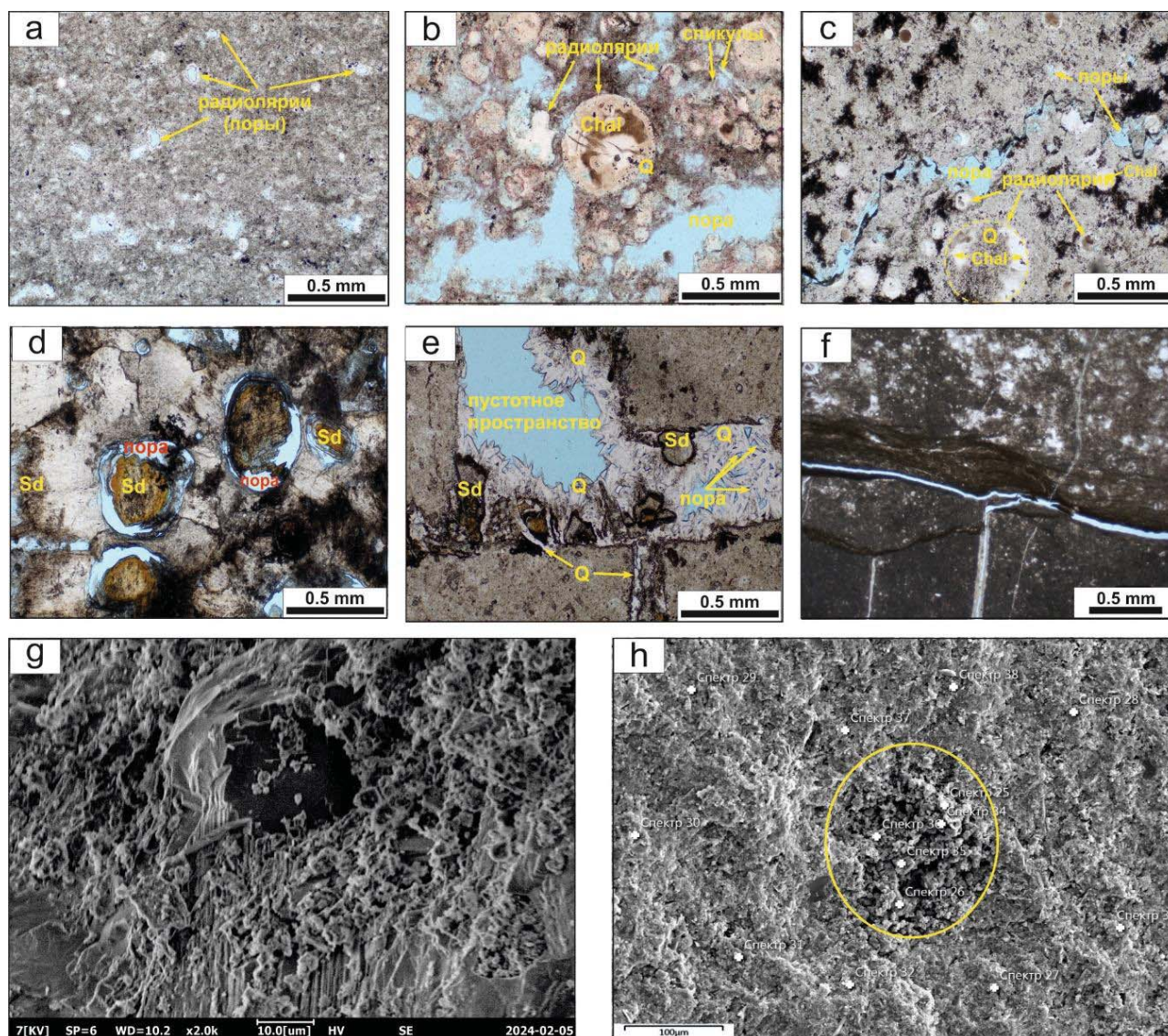


Рис. 7. Пустотно-поровое пространство в породах коры выветривания Калиновое месторождения: а–с) растворение радиолярий с образованием пустот; d) пустоты выщелачивания радиолярий с заполнением кристаллическим сидеритом; e) микрокаверна в трещинах, частичная минерализация трещин по периферии кристаллами кварца и сидеритом; f) bedding-parallel open fracture at boundary of interlayers with different composition; g, h) СЭМ снимки глинисто-кремнистых пород, режим SE. Развитие глинистых минералов в породах, выщелачивание радиолярий (g) и метасоматическое развитие каолинита в участке породы (выделено желтым) (h). Фотографии шлифов а–f без анализатора. Усл. обозначения – на рис. 5

Fig. 7. Void-pore space in weathering crust rocks of the Kalinovoe field: a–c) radiolarian dissolution forming voids; d) radiolarian dissolution voids filled with crystalline siderite; e) microcavern in fractures, partial fracture mineralization along margins by quartz and siderite crystals; f) bedding-parallel open fracture at boundary of interlayers with different composition; g, h) SEM images of argillaceous-siliceous rocks, SE mode. Development of clay minerals in rocks, radiolarian dissolution (g) and metasomatic kaolinite development in rock portion (highlighted yellow) (h). Thin section photographs a–f without analyzer. Legend is in Fig. 5

Можно выделить два противоположно направленных процесса – флюидное выщелачивание и флюидная минерализация (гидротермальное метасоматическое замещение). Флюидное выщелачивание приводит к растворению биогенного кремнезема в радиоляриях, а также к формированию пустот в матрице породы и в трещинах и, соответственно, к улучшению ФЕС пород. Гидротермальное мета-

соматическое замещение приводит к заполнению пустот опалом, сидеритом, микрозернистым кварцем и ведет к уменьшению путей миграции флюидов и углеводородов в породах. В то же время идет образование агрегатов каолинита, который, как известно, обладает межкристаллитной и межагрегатной пористостью. В оолитовых агрегатах сидерита проявляется вторичная пористость вследствие от-

слаивания «скорлупок». Оба эти процесса, возможно, идут одновременно, т. к. кислые растворы приводят к растворению карбонатных минералов, а щелочные – к растворению минералов кремнезема. Очевидно, что процессы флюидного воздействия с привносом и выносом вещества были многократные, что отражается на сложном строении участков метасоматического замещения.

Основным процессом вторичной гидротермальной минерализации является сидеритизация, связанная с привносом уголекислоты и гидроксидов железа. Сидерит заполняет большинство трещин, развивается в околотрещинном пространстве, замещает участки, иногда почти полностью, особенно в нижней части разреза.

Часто зоны метасоматического замещения формируются на границе кремнистых радиоляритов и глинисто-кремнистых прослоев. Вдоль границы практически всегда формируется трещина или же серия трещин, что, очевидно, связано с разной плотностью пород и их устойчивостью к стрессу. Состав этих зон сидеритовый, гидрослюдисто-сидеритовый, кварц-каолинит-сидеритовый. Практически всегда к этим зонам приурочено ожелезнение.

Зоны метасоматического замещения могут быть довольно обширными, формируясь на участках пересечения трещин. Практически всегда в зонах вторичной минерализации выделяются зоны выщелачивания.

Заключение

Породы в изученном разрезе Калинового НГК месторождения представляют собой коры выветривания глинисто-кремнистого, кремнисто-глинистого составов, но относятся к разным зонам профилей коры выветривания. Считается, что «наиболее перспективными в отношении нефтегазоносности коры выветривания являются контрастные эрозионно-тектонические выступы, сложенные силикатосодержащими породами, подвергавшиеся процессам дезинтеграции, в пределах которых сформировались коры выветривания глинисто-кремнистого состава» [3. С. 545].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геологические условия нефтегазоносности верхней части палеозойского разреза Западной Сибири / А.Э. Конторович, И.А. Иванов, А.Е. Ковешников, В.И. Краснов, Г.Н. Перозин // Теоретические и региональные проблемы геологии нефти и газа: сб. науч. трудов. – Новосибирск, 1991. – С. 152–171.
2. Модель геологического строения и нефтегазоносность зоны контакта палеозойских и мезозойских отложений в Чузиско-Чижапской зоны нефтегазоаккумуляции / В.А. Конторович, С.А. Бердникова, Л.М. Калинина, В.В. Лапковский, А.А. Поляков, М.В. Соловьев // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2006. – № 5–6. – С. 91–102.
3. Конторович В.А. Сейсмогеологические критерии нефтегазоносности зоны контакта палеозойских и мезозойских отложений Западной Сибири // Геология и геофизика. – 2007. – Т. 48. – № 5. – С. 538–547.
4. Нефтегазоперспективные объекты палеозоя Западной Сибири, сейсмогеологические модели эталонных месторождений / В.А. Конторович, Л.М. Калинина, А.Ю. Калинин, М.В. Соловьев // Геология нефти и газа. – 2018. – № 4. – С. 5–15. DOI: 10.31087/0016-7894-2018-4-5-15.

Отложения в разрезе скважины сопоставимы с зоной начальной дезинтеграции, в которой породы сохранили свой первичный облик, осложненный впоследствии процессами метасоматического замещения.

В целевом изучаемом интервале скважины установлены глинисто-кремнистые органогенные породы, чередующиеся с несколькими прослоями туфопелитолитов. Глинисто-кремнистые разновидности отложений сложены кварцем, халцедоном, опалом, гидрослюдой, как отдельными чешуйками, так и агрегатами в кремнеаргиллитах, редкими чешуйками серицита. В туфопелитолитах выделяются кислая по составу пирокластическая – кристаллокласты (кварц) и окремненные витрокласты. В целом для разреза характерно присутствие примеси туфогенного материала.

С метасоматическими процессами связано образование сидерита, реже кальцита, кварца, каолинита, гидроксидов железа. Органогенные остатки представлены преимущественно радиоляриями, в меньшем количестве в отдельных прослоях присутствуют спиккулы губок. Структура пород скрытокристаллическая, микро- и мелкозернистая, тонкочешуйчатая, реликтовая органогенная, сферолитовая, оолитовая и др. Текстура практически по всему разрезу слоистая, микротекстуры – пятнистая, неяснослоистая, слойчатая.

Встречаются деформационные текстуры, в нижней части разреза отмечается биотурбитовая текстура – видны ходы илоедов, оконтуренные углистым органическим веществом. В верхней части разреза в небольшом интервале наблюдаются обломочные и брекчированные породы. Породы трещиноватые, трещины частично или полностью залечены агрегатами сидерита, кварца, в меньшей степени каолинита. Именно с интенсивной трещиноватостью связаны процессы трещинного метасоматоза, которые оказали неоднозначное влияние на фильтрационно-емкостные свойства пород. С одной стороны, метасоматическая минерализация привела к залечиванию трещин и пустот, с другой – глинисто-кремнистая матрица подверглась процессам выщелачивания с образованием вторичной пористости.

5. Скузоватов М.Ю., Миляев Д.В., Душенин Д.И. Особенности геологического изучения и освоения залежей с трудноизвлекаемыми запасами в доюрском комплексе Западной Сибири применительно к опыту геолого-экономической оценки // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2021. – № 3 (47). – С. 94–105. DOI: 10.20403/2078-0575-2021-3-94-105.
6. Исаев Г.Д. Стратификация и состав пород зоны контакта мезозой-палеозой // Вестник Томского государственного университета. – 2010. – № 331. – С. 203–209.
7. Казаринов В.П. Мезозойские и кайнозойские отложения Западной Сибири / под ред. В.Г. Васильева. – М.: Гостоптехиздат, 1958. – 323 с.
8. Кора выветривания Сибири. В 2-х кн. Кн. 1. Формации кор выветривания Западно-Сибирской плиты и Алтае-Саянской складчатой области / под ред. В.П. Казаринова. – М.: Недра, 1979. – 221 с.
9. Журавлев Е.Г. Кора выветривания кристаллического фундамента северной части Волго-Уральской области // Литология и полезные ископаемые. – 1963. – № 1. – С. 130–134.
10. Лапинская Т.А., Журавлев Е.Г. Линейно-трещинные коры выветривания Волго-Уральской области и их геологическое значение // Известия вузов. Нефть и газ. – 1966. – № 6. – С. 3–6.
11. Журавлев Е.Г., Лапинская Т.А., Файн Ю.Б. Газонефтеносность коры выветривания фундамента Шаимского района // Геология нефти и газа. – 1973. – № 6. – С. 9–14.
12. Журавлев Е.Г., Лапинская Т.А. Кора выветривания фундамента и ее влияние на формирование нефтегазоносных горизонтов Западной Сибири. – М.: Недра, 1976. – 173 с.
13. Журавлев Е.Г. Залежи нефти и газа в корях выветривания фундамента осадочных бассейнов // Литология и полезные ископаемые. – 2009. – № 3. – С. 329–334.
14. Сынгаевский П.Е., Хафизов С.Ф. Формация коры выветривания в осадочном цикле Западно-Сибирского бассейна // Геология нефти и газа. – 1999. – № 11–12. – С. 22–30.
15. Ежова А.В. Глиноземистые и железистые породы из продуктивной толщи юго-востока Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции (Томская область) // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 1. – С. 111–121.
16. Ковешников А.Е., Недоливко Н.М. Кора выветривания доюрских отложений Западно-Сибирской геосинеклизы // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – № 1. – С. 77–81.
17. Коробов А.Д., Коробова Л.А. Нефтегазоносные фации вторичных кварцитов и пропилитов Западно-Сибирской плиты // Геология нефти и газа. – 2013. – № 1. – С. 23–32.
18. Особенности корреляции отложений коры выветривания и доюрского основания / И.С. Гутман, Г.П. Кузнецова, А.А. Обголец, М.И. Саакян, А.В. Скоробогатько, Г.В. Кузнецова, С.Ф. Панов, Т.К. Кажмулинов // Геология нефти и газа. – 2018. – № 4. – С. 69–87. DOI: 10.31087/0016-7894-2018-4-69-87.
19. Гейст И.В., Исмаилова А.М., Зайцев А.В. Применение комплексного подхода к моделированию нетрадиционного объекта – коры выветривания Западной Сибири // Геология нефти и газа. – 2019. – № 6. – С. 67–74. DOI: 10.31087/0016-7894-2019-6-67-74.
20. A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering / B. Dewandel, P. Lachassagne, R. Wyns, J.C. Marechal, N.S. Krishnamurthy // Journal of hydrology. – 2006. – Vol. 330. – № 1–2. – P. 260–284. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2006.03.026.
21. Vertical zonation of weathered crust ancient karst and reservoir evaluation and prediction – a case study of M55–M51 sub-members of Majiagou Formation in gas fields, central Ordos Basin, NW China / J. He, Sh. Fang, F. Hou, R. Yan, Zh. Zhao, J. Yao, X. Tang, G. Wu // Petroleum Exploration and Development. – 2013. – Vol. 40. – № 5. – P. 572–581. DOI: 10.1016/S1876-3804(13)60075-0.
22. Weathered volcanic crust and its petroleum geological significance: a case study of the Carboniferous volcanic crust in northern Xinjiang, NW China / L. Hou, X. Luo, J. Wang, F. Yang, X. Zhao, Zh. Mao // Petroleum Exploration and Development. – 2013. – Vol. 40. – № 3. – P. 277–286. DOI: 10.1016/S1876-3804(13)60034-8.
23. New insights into the carbonate karstic fault system and reservoir formation in the Southern Tahe area of the Tarim Basin / X. Lu, Y. Wang, F. Tian, X. Li, D. Yang, T. Li, Y. Lv, X. He // Marine and Petroleum Geology. – 2017. – Vol. 86. – P. 587–605. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2017.06.023
24. Different formation mechanism of quartz in siliceous and argillaceous shales: A case study of Longmaxi Formation in South China / Y. Xiang-Rong, Y. De-Tian, W. Xiao-Song, Z. Li-Wei, Z. Bao, X. HanWen, G. Yin, H. Jie // Marine and Petroleum Geology. – 2018. – Vol. 94. – P. 80–94. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2018.03.036.
25. Characteristics and controlling factors of deep buried-hill reservoirs in the BZ19-6 structural belt, Bohai sea area / M. Hou, H. Cao, H. Li, A. Chen, A. Wei, Y. Chen, A. Wei, Y. Chen, Y. Wang, X. Zhou, T. Ye // Natural Gas Industry B. – 2019. – Vol. 6. – № 4. – P. 305–316. DOI: 10.1016/j.ngib.2019.01.011.
26. Characteristics and formation mechanisms of the unconformity-related paleokarst reservoirs in the Upper Sinian, Northwestern Tarim Basin, China / L. Chen, H. Zhang, Z. Cai, F. Cong, S. Huang, P. Tang // Marine and Petroleum Geology. – 2020. – Vol. 120. – P. 104559. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2020.104559
27. Sedimentary environment and petrological features of organic-rich fine sediments in shallow water overlapping deposits: a case study of Cambrian Yuertus Formation in northwestern Tarim Basin, NW China / Zh. Jin, X. Tan, H. Tang, A. Shen, Zh. Qiao, J. Zheng, F. Li, Sh. Zhang, L. Chen, Ch. Zhou // Petroleum exploration and development. – 2020. – Vol. 47. – № 3. – P. 513–526. DOI: 10.1016/S1876-3804(20)60069-6.
28. Constraints upon fault zone properties by combined structural analysis of virtual outcrop models and discrete fracture network modelling / A. Ceccato, G. Viola, M. Antonellini, G. Tartaglia, E. J. Ryan // Journal of Structural Geology. – 2021. – Vol. 152. – P. 104444. DOI: 10.1016/j.jsg.2021.104444
29. Types of biogenic quartz and its coupling storage mechanism in organic-rich shales: a case study of the Upper Ordovician Wufeng Formation to Lower Silurian Longmaxi Formation in the Sichuan Basin, SW China / Q. Guan, D. Dong, H. Zhang,

- S. Sun, S. Zhang, W. Guo // *Petroleum Exploration and Development*. – 2021. – Vol. 48. – № 4. – P. 813–823. DOI: 10.1016/S1876-3804(21)60068-X.
30. Quartz types, silica sources and their implications for porosity evolution and rock mechanics in the Paleozoic Longmaxi Formation shale, Sichuan Basin / H. Xu, W. Zhou, Q. Hu, T. Yi, J. Ke, A. Zhao, L. Zihui, Y. Yu // *Marine and Petroleum Geology*. – 2021. – Vol. 128. – P. 105036. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2021.105036.
31. Ordovician reservoirs in Fuxian area: gas accumulation patterns and their implications for the exploration of lower Paleozoic carbonates in the southern Ordos Basin/Ordovician reservoirs in Fuxian area: Gas accumulation patterns and their implications for the exploration of lower Paleozoic carbonates in the southern Ordos Basin / Ning Gu, Juntao Zhang, Xiaohui Jin, Fei Yang, Lu Liu // *Energy Geoscience*. – 2024. – Vol. 5. – № 1. – P. 100225. DOI: 10.1016/j.engeos.2023.100225.
32. Гурбанов В.Ш., Нариманов Н.Р. Прогноз перспектив нефтегазоносности выступов фундамента Южно-Каспийской мегавпадины // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. – 2016. – Т. 15. – № 19. – С. 132–144. DOI: 10.15593/2224-9923/2016.19.4.
33. Нефтегазоносность кристаллического фундамента шельфа Вьетнама: Белый Тигр и Дракон / В.И. Богоявленский, А.Д. Дзюбю, А.Н. Иванов, И.В. Богоявленский, Р.А. Никонов // *Геология нефти и газа*. – 2016. – № 5. – С. 102–115.
34. Конторович В.А. Тектоника и нефтегазоносность мезозойско-кайнозойских отложений юго-восточных районов Западной Сибири. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. – 253 с.
35. Белозёров В.Б., Силкин Г.Е. Критерии переоценки перспектив нефтегазоносности коллекторных зон фундамента юго-востока Западной Сибири // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 2. – С. 7–16. DOI: 10.18799/24131830/2022/2/3559.

Информация об авторах

Любовь Афанасьевна Краснощекова, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. Krasnl@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6444-9494>

Ирина Валентиновна Вологодина, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры петрографии геолого-географического факультета, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36. ivv@mail.tsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8106-2195>

Аура Самид Гарсия Бальса, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Исследовательской школы химических и биомедицинских технологий, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. samid16@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3681-7250>

Поступила в редакцию: 12.02.2024

Поступила после рецензирования: 23.05.2024

Принята к публикации: 24.05.2024

REFERENCES

1. Kontorovich A.E., Ivanov I.A., Koveshnikov A.E., Krasnov V.I., Perozio G.N. Geological conditions of oil and gas potential in the upper part of the Paleozoic section of Western Siberia. *Theoretical and Regional Problems of Oil and Gas Geology: Collection of Scientific Papers*. Novosibirsk, 1991. pp. 152–171. (In Russ.)
2. Kontorovich V.A., Berdnikova S.A., Kalinina L.M., Lapkovsky V.V., Polyakov A.A., Soloviev M.V. Geological structure model and oil and gas potential of the contact zone of Paleozoic and Mesozoic deposits in the Chuzik-Chizhapka oil and gas accumulation zone. *Geology, Geophysics, and Development of Oil and Gas Fields*, 2006, no. 5–6, pp. 91–102. (In Russ.)
3. Kontorovich V.A. Petroleum potential of reservoirs at the Paleozoic-Mesozoic boundary in West Siberia: seismogeological criteria (example of the Chuzik-Chizhapka regional oil-gas accumulation). *Russian Geology and Geophysics*, 2007, vol. 48, no. 5, pp. 538–547. DOI: 10.1016/j.rgg.2007.05.002. (In Russ.)
4. Kontorovich V.A., Kalinina L.M., Kalinin A.Yu., Soloviev M.V. Petroleum prospects of the West Siberian Palaeozoic, geoseismic models of reference fields. *Oil and Gas Geology*, 2018, no. 4, pp. 5–15. (In Russ.) DOI: 10.31087/0016-7894-2018-4-5-15.
5. Skuzovatov M.Yu., Milyaev D.V., Dushenin D.I. Features of geological study and development of deposits with hard-to-recover reserves in the pre-Jurassic complex of Western Siberia based on the experience of geological and economic assessment. *Geology and Mineral Resources of Siberia*, 2021, no. 3 (47), pp. 94–105. (In Russ.) DOI: 10.20403/2078-0575-2021-3-94-105.
6. Isaev, G.D. Stratification and composition of rocks in the Mesozoic-Paleozoic contact zone. *Bulletin of Tomsk State University*, 2010, no. 331, pp. 203–209. (In Russ.)
7. Kazarinov V.P. *Mesozoic and Cenozoic deposits of Western Siberia*. Moscow, Gostoptekhizdat Publ., 1958. 315 p. (In Russ.)
8. Kazarinov V.P. *Weathering Crusts of Siberia*. In 2 books. B. 1. *Formations of Weathering Crusts of the West Siberian Plate and the Altai-Sayan Folded Area*. Ed. by V.P. Kazarinov. Moscow, Nedra Publ., 1979. 221 p. (In Russ.)
9. Zhuravlev E.G. Weathering crust of the crystalline basement of the northern part of the Volga-Ural region. *Lithology and Mineral Resources*, 1963, no. 1, pp. 130–134. (In Russ.)
10. Lapinskaya T.A., Zhuravlev E.G. Linear-fracture weathering crusts of the Volga-Ural region and their geological significance. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Oil and Gas*, 1966, no. 6, pp. 3–6. (In Russ.)

11. Zhuravlev E.G., Lapinskaya T.A., Fain Yu.B. Oil and gas potential of the weathering crust of the basement in the Shaim region. *Oil and Gas Geology*, 1973, no. 6, pp. 9–14. (In Russ.)
12. Zhuravlev E.G., Lapinskaya T.A. *Weathering crust of the basement and its influence on the formation of oil and gas-bearing horizons in Western Siberia*. Moscow, Nedra Publ., 1976. 173 p. (In Russ.)
13. Zhuravlev E.G. Oil and gas deposits in the weathering crusts of the basement of sedimentary basins. *Lithology and Mineral Resources*, 2009, no. 3, pp. 329–334. (In Russ.)
14. Syngaevsky P.E., Khafizov S.F. Formation of the weathering crust in the sedimentary cycle of the West Siberian Basin. *Oil and Gas Geology*, 1999, no. 11–12, pp. 22–30. (In Russ.)
15. Ezhova A.V. Alumina and iron-rich rocks from the productive strata of the southeast of the West Siberian oil and gas province (Tomsk region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 1, pp. 111–121. (In Russ.)
16. Koveshnikov A.E., Nedolivko N.M. Weathering crusts of pre-Jurassic deposits in the West Siberian geosyncline. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no. 1, pp. 77–81. (In Russ.)
17. Korobov A.D., Korobova L.A. Oil and gas-bearing facies of secondary quartzites and propylites in the West Siberian Plate. *Oil and Gas Geology*, 2013, no. 1, pp. 23–32. (In Russ.)
18. Gutman I.S., Kuznetsova G.P., Obgolts A.A., Saakyan M.I., Skorobogatko A.V., Kuznetsova G.V., Panov S.F., Kazhmulinov T.K. Features of correlation of weathering crust deposits and pre-Jurassic basement. *Oil and Gas Geology*, 2018, no. 4, pp. 69–87. (In Russ.) DOI: 10.31087/0016-7894-2018-4-69-87.
19. Geist I.V., Ismagilova A.M., Zaitsev A.V. Application of a comprehensive approach to modeling an unconventional object – the weathering crust of Western Siberia. *Oil and Gas Geology*, 2019, no. 6, pp. 67–74. (In Russ.) DOI: 10.31087/0016-7894-2019-6-67-74.
20. Dewandel B., Lachassagne P., Wyns R., Marechal J.C., Krishnamurthy N.S. A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. *Journal of hydrology*, 2006, vol. 330, no. 1–2, pp. 260–284. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2006.03.026.
21. He J., Fang Sh., Hou F., Yan R., Zhao Zh., Yao J., Tang X., Wu G. Vertical zonation of weathered crust ancient karst and reservoir evaluation and prediction – a case study of M55–M51 sub-members of Majiagou Formation in gas fields, central Ordos Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, vol. 40, no. 5, pp. 572–581. DOI: 10.1016/S1876-3804(13)60075-0.
22. Hou L., Luo X., Wang J., Yang F., Zhao X., Mao Zh. Weathered volcanic crust and its petroleum geological significance: A case study of the Carboniferous volcanic crust in northern Xinjiang, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, vol. 40, no. 3, pp. 277–286. DOI: 10.1016/S1876-3804(13)60034-8.
23. Lu X., Wang Y., Tian F., Li X., Yang D., Li T., Lv Y., He X. New insights into the carbonate karstic fault system and reservoir formation in the Southern Tahe area of the Tarim Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, vol. 86, pp. 587–605. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2017.06.023.
24. Xiang-Rong Y., De-Tian Y., Xiao-Song W., Li-Wei Z., Bao Z., HanWen X., Yin G., Jie H. Different formation mechanism of quartz in siliceous and argillaceous shales: a case study of Longmaxi Formation in South China. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, vol. 94, pp. 80–94. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2018.03.036.
25. Hou M., Cao H., Li H., Chen A., Wei A., Chen Y., Wei A., Chen Y., Wang Y., Zhou X., Ye T. Characteristics and controlling factors of deep buried-hill reservoirs in the BZ19-6 structural belt, Bohai sea area. *Natural Gas Industry B*, 2019, vol. 6, no. 4, pp. 305–316. DOI: 10.1016/j.ngib.2019.01.011.
26. Chen L., Zhang H., Cai Z., Cong F., Huang S., Tang P. Characteristics and formation mechanisms of the unconformity-related paleokarst reservoirs in the Upper Sinian, Northwestern Tarim Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, vol. 120, pp. 104559. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2020.104559.
27. Jin Zh., Tan X., Tang H., Shen A., Qiao Zh., Zheng J., Li F., Zhang Sh., Chen L., Zhou Ch. Sedimentary environment and petrological features of organic-rich fine sediments in shallow water overlapping deposits: a case study of Cambrian Yuertus Formation in northwestern Tarim Basin, NW China. *Petroleum exploration and development*, 2020, vol. 47, no. 3, pp. 513–526. DOI: 10.1016/S1876-3804(20)60069-6.
28. Ceccato A., Viola G., Antonellini M., Tartaglia G., Ryan E.J. Constraints upon fault zone properties by combined structural analysis of virtual outcrop models and discrete fracture network modelling. *Journal of Structural Geology*, 2021, vol. 152, pp. 104444. DOI: 10.1016/j.jsg.2021.104444.
29. Guan Q., Dong D., Zhang H., Sun S., Zhang S., Guo W. Types of biogenic quartz and its coupling storage mechanism in organic-rich shales: a case study of the Upper Ordovician Wufeng Formation to Lower Silurian Longmaxi Formation in the Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, vol. 48, no. 4, pp. 813–823. DOI: 10.1016/S1876-3804(21)60068-X.
30. Xu H., Zhou W., Hu Q., Yi T., Ke J., Zhao A., Zihui L., Yu Y. Quartz types, silica sources and their implications for porosity evolution and rock mechanics in the Paleozoic Longmaxi Formation shale, Sichuan Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, vol. 128, pp. 105036. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2021.105036.
31. Ning Gu, Juntao Zhang, Xiaohui Jin, Fei Yang, Lu Liu. Ordovician reservoirs in Fuxian area: gas accumulation patterns and their implications for the exploration of lower Paleozoic carbonates in the southern Ordos Basin. *Energy Geoscience*, 2024, vol. 5, no. 1, pp. 100225. DOI: 10.1016/j.engeos.2023.100225.
32. Gurbanov V.S., Narimanov N.R. Forecast of oil and gas potential of basement outcrops of the South Caspian Megatrough. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil and Gas Engineering*, 2016, vol. 15, no. 19, pp. 132–144. (In Russ.) DOI: 10.15593/2224-9923/2016.19.4.
33. Bogoyavlensky V.I., Dzyublo A.D., Ivanov A.N., Bogoyavlensky I.V., Nikonov R.A. Oil and gas potential of the crystalline basement of the Vietnam Shelf: White Tiger and Dragon. *Oil and Gas Geology*, 2016, no. 5, pp. 102–116. (In Russ.)
34. Kontorovich V.A. *Tectonics and oil-and-gas bearing of the Mesozoic-Cenozoic deposits in southeastern of the Western Siberia*. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2002. 253 p. (In Russ.)

35. Belozеров 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 Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2022/2/3559.

Information about the authors

Lyubov A. Krasnoshchekova, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; Krasnl@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6444-9494>

Irina V. Vologdina, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk State University, 36, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; ivv@mail.tsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8106-2195>

Aura S. Garcia Balca, Cand. Sc., Researcher, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; samid16@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3681-7250>

Received: 12.02.2024

Revised: 23.05.2024

Accepted: 24.05.2024

УДК 532.546

DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4385

Шифр специальности ВАК: 1.3.14

Диагностика технического состояния скважин, пересекающих пресноводные горизонты, методом активной термометрии

Р.З. Акчурина, Ф.Ф. Давлетшин, А.Ш. Рамазанов,
Р.А. Валиуллин, Р.Ф. Шарафутдинов, Д.Ф. Исламов✉

Уфимский университет науки и технологий, Россия, г. Уфа

✉islamovden@rambler.ru

Аннотация. Актуальность. В последнее время в повестке нефтегазовых компаний важная роль уделяется ESG (Environment, Social, Governance) принципам – это активно развивающийся глобальный тренд в современной бизнес-среде. Одним из его ключевых аспектов является ответственное отношение к окружающей среде, повышение приоритета решения экологических проблем, возникающих при добыче углеводородов. Значимой экологической проблемой является, в частности, загрязнение пресноводных горизонтов в процессе добычи нефти вследствие их некачественной изоляции при цементировании скважин. При этом в пространстве скважины за обсадной колонной возникает переток скважинной жидкости к пресноводным горизонтам, оказывающий негативное влияние на экологическую обстановку в данном регионе. В этой связи контроль за техническим состоянием скважин, пересекающих пресноводные горизонты, является важной и актуальной задачей. **Объект:** эксплуатационная скважина, пересекающая пресноводный горизонт, в которой проводятся геофизические исследования методом активной термометрии – осуществляется локальный нагрев участка обсадной колонны и исследуется динамика температурного поля в ней. **Цель:** выявление качественных закономерностей и получение количественных оценок влияния потока жидкости в пространстве за обсадной колонной (заколонном пространстве) на температурное поле в обсадной колонне в процессе ее индукционного нагрева. **Методы.** Численное математическое моделирование тепловых и гидродинамических процессов в скважине с использованием программного комплекса Ansys Fluent. **Результаты.** Изучено влияние плоскопараллельного горизонтального потока жидкости пресноводного горизонта, обтекающего скважину, на азимутальное распределение температуры обсадной колонны в процессе индукционного нагрева. Показано, что в случае негерметичности цементного кольца в интервале пресноводного горизонта отмечается неоднородность азимутального распределения температуры колонны, достигающая по величине нескольких градусов Кельвина (К). Выполнено моделирование индукционного нагрева в скважине при наличии заколонного перетока жидкости к вышележащему интервалу пресноводного горизонта. Показано, что признаком, указывающим на переток, является возникновение области температурного возмущения по вертикали над интервалом индукционного нагрева протяженностью более 1 м. В целом результаты выполненных исследований показывают информативность метода активной термометрии применительно к диагностике технического состояния скважин, пересекающих пресноводные горизонты.

Ключевые слова: пресноводные горизонты, экология, заколонный переток, активная термометрия, индукционный нагрев, температура обсадной колонны, моделирование

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда по теме «Разработка инновационной технологии на основе метода активной термометрии для решения задач экологии пресноводных горизонтов», соглашение № 23-17-20017 от 20 апреля 2023 г.

Для цитирования: Диагностика технического состояния скважин, пересекающих пресноводные горизонты, методом активной термометрии / Р.З. Акчурина, Ф.Ф. Давлетшин, А.Ш. Рамазанов, Р.А. Валиуллин, Р.Ф. Шарафутдинов, Д.Ф. Исламов // Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 6. – С. 175–188. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4385

UDC 532.542

DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4385

Diagnostics of the technical condition of wells drilled through freshwater horizons using active thermometry

R.Z. Akchurin, F.F. Davletshin, A.Sh. Ramazanov,
R.A. Valiullin, R.F. Sharafutdinov, D.F. Islamov✉

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation

✉islamovden@rambler.ru

Abstract. Relevance. Recently, ESG (Environment, Social, Governance) principles have been given an important role in the agenda of oil and gas companies – this is an actively developing global trend in the modern business environment. One of its key aspects is a responsible attitude to the environment, increasing the priority of solving environmental problems arising from the extraction of hydrocarbons. A significant environmental problem is, in particular, pollution of freshwater horizons during oil production due to their poor-quality insulation when well cementing. At the same time, in the space of the well behind the casing, there is a flow of borehole fluid to freshwater horizons, which has a negative impact on the environmental situation in this region. In this regard, monitoring the technical condition of wells crossing freshwater horizons is an important and urgent task. **Object.** An operational well drilled through freshwater horizon, in which geophysical studies are carried out by the method of active thermometry – local heating of the casing section is carried out and the dynamics of the temperature field in it is studied. **Aim.** To identify qualitative patterns and obtain quantitative estimates of the effect of the fluid flow in the space behind the casing (column space) on the temperature field in the casing. **Methods.** Numerical mathematical modeling of thermal and hydrodynamic processes in a well using the software package Ansys Fluent (ANSYS Academic Research CFD license, agreement with Bashkir State University dated 06/15/2020). **Results.** The authors have studied the effect of a plane-parallel horizontal fluid flow of the freshwater horizon on the azimuthal temperature distribution of the casing string during induction heating. It is shown that in the case of leakiness of the cement ring in the interval of the freshwater horizon, an inhomogeneity of the azimuthal temperature distribution of the column is observed, reaching a value of few more K. The authors carried out the simulation of induction heating in the well with liquid column flow to the interval of the freshwater horizon. It is shown that the sign indicating the overflow is the occurrence of a temperature disturbance area vertically above the induction heating interval with a length of more than 1 m. In general, the results of the performed studies show the informativeness of the active thermometry method in relation to the diagnosis of the technical condition of wells drilled through freshwater horizons.

Keywords: freshwater horizons, ecology, column flow, active thermometry, induction heating, casing temperature, modeling

Acknowledgements: The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation on the topic "Development of innovative technology based on the method of active thermometry for solving problems of ecology of freshwater horizons", Agreement no. 23-17-20017 of April 20, 2023

For citation: Akchurin R.Z., Davletshin F.F., Ramazanov A.Sh., Valiullin R.A., Sharafutdinov R.F., Islamov D.F. Diagnostics of the technical condition of wells drilled through freshwater horizons using active thermometry. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 6, pp. 175–188. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4385

Введение

Для нефтяных регионов с большим количеством пробуренных добывающих и нагнетательных скважин контроль за состоянием пресноводных горизонтов является актуальной задачей с точки зрения экологического мониторинга состояния недр [1, 2]. Загрязнение пресноводных горизонтов может происходить как на стадии бурения скважины вследствие проникновения фильтрата промывочной жидкости в водоносные пласты, так и на стадии эксплуатации скважины [3]. Во втором случае загрязнение водоносных горизонтов происходит в результате перето-

ка пластовых и закачиваемых в пласты вод через негерметичное заколонное пространство скважин [4]. Негерметичность заколонного пространства обусловлена некачественным цементированием скважины, выполняемым для укрепления стенок скважины и изоляции нецелевых пластов. В этой связи своевременное выявление негерметичности цементного кольца (кольцевой области между обсадной колонной и горными породами) играет важную роль для оперативного принятия решения по ликвидации перетоков и предупреждения загрязнения пресноводных горизонтов [5].

Одним из основных методов, используемых для определения заколонных перетоков, является метод скважинной термометрии [6–8]. Однако традиционный подход, основанный на анализе естественных тепловых полей, регистрируемых в стволе скважины, не позволяет решить задачу по выявлению заколонных перетоков, если естественные температурные аномалии составляют малую величину: сотые или десятые доли градуса. Для устранения недостатков традиционной термометрии предлагается метод активной термометрии, основанный на создании искусственных температурных полей в результате индукционного теплового воздействия на металлическую обсадную колонну в стволе скважины. Кратковременное индукционное воздействие приводит к локальному разогреву металлической обсадной колонны и одновременно с этим к изменению температуры жидкости в заколонном пространстве скважины, контактирующем с нагреваемым участком металла. В потоке жидкости в заколонном пространстве возникает тепловое возмущение (искусственная температурная аномалия) и происходит перенос тепла по направлению движения потока жидкости от нагреваемого участка, при этом характер теплового поля зависит от интенсивности и направления потока флюида за обсадной колонной. Информативность активной термометрии применительно к оценке интенсивности заколонного движения жидкости основывается на регистрации и анализе динамики температуры обсадной колонны на участке индукционного нагрева [9]. Существующие работы в области применения индукционного воздействия в скважинах посвящены решению таких задач, как применение электромагнитного воздействия для нагрева прискважинной зоны продуктивных пластов с целью снижения вязкости пластового флюида, использование индукционного нагрева для оценки расхода жидкости в стволе скважины, выявление заколонных перетоков с выходом жидкости в ствол скважины, приводящих к обводнению скважинной продукции [10–14]. В данной работе на основе математического моделирования анализируются особенности теплового поля в скважине, пересекающей пресноводный горизонт, в процессе индукционного нагрева участка обсадной колонны. Применительно к диагностике технического состояния скважины рассматривается три сценария:

- I. Горизонтальный плоскопараллельный поток жидкости пресноводного горизонта, обтекающий скважину, при герметичном цементном кольце.*
- II. Горизонтальный плоскопараллельный поток жидкости пресноводного горизонта, обтекающий скважину, при наличии локальной негерметичности цементного кольца в интервале пресноводного горизонта.*

III. Вертикальный поток жидкости в заколонном пространстве к интервалу пресноводного горизонта вследствие некачественного цементирования скважины.

Для моделирования первых двух сценариев используется двумерная x - y модель, для моделирования третьего сценария – двумерная r - z модель, далее приведем описание каждой из моделей.

Модель индукционного нагрева обсадной колонны в скважине при ее поперечном обтекании горизонтальным потоком жидкости (x - y модель)

Рассматривается задача расчета динамики температуры обсадной колонны в процессе ее индукционного нагрева, причем на моделируемом участке скважину пересекает пресноводный горизонт – пористый водонасыщенный пласт – 1 (рис. 1, *a*). В пласте имеется горизонтальный плоскопараллельный поток жидкости, обтекающий скважину. Скважина состоит из следующих концентрично расположенных зон: цементное кольцо – 2, металлическая обсадная колонна – 3, жидкость в обсадной колонне – 4, в центре скважины находится индукционный нагреватель – 5. На рис. 1, *б* показаны анализируемые в работе точки регистрации температуры на внутренней поверхности (стенке) обсадной колонны (при помощи распределенных и прижатых к колонне датчиков). Принятые допущения:

- пресноводный горизонт рассматривается как однородный изотропный пористый пласт, фильтрация однофазной жидкости происходит с постоянной скоростью;
- двумерная x - y модель, толщина пресноводного горизонта достаточно большая, так что теплообменом на верхней и нижней границах пласта можно пренебречь;
- равномерное тепловыделение в теле обсадной колонны на участке нагрева, вертикальной теплопроводностью в колонне, а также изменением температуры в теле колонны в радиальном направлении пренебрегаем вследствие ее малой толщины;
- изменением температуры потока жидкости T_f в обсадной колонне по сравнению с изменением температуры колонны T пренебрегается (течение флюида в зоне 4 изотермическое); корпус индуктора (область 5 на рис. 1) выполнен из непроводящего материала (карбон), изменение его температуры также не учитывается. Таким образом, в рамках принятых допущений тепловые процессы в областях 4 и 5 не моделируются.
- теплообмен между обсадной колонной – 3 и потоком жидкости в стволе скважины – 4 происходит по закону Ньютона [15]

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r}(r=r_c) = \alpha(T_w - T_{fl}) = \alpha(T_w - T_0), \quad (1)$$

где λ – теплопроводность металла; r_c – внутренний радиус обсадной колонны; α – коэффициент теплопередачи; T_{fl} – среднemasовая температура потока жидкости в стволе скважины (принята как постоянная величина T_0); $T_w = T(r=r_c)$ – температура внутренней поверхности обсадной колонны.

В области 1 решается двумерное уравнение теплопроводности с учетом вынужденной конвекции, обусловленной фильтрационным потоком в пресноводном горизонте [16]

$$\begin{aligned} (mc_r \rho_r + (1-m)c_f \rho_f) \frac{\partial T}{\partial t} + c_f \rho_f v_x \frac{\partial T}{\partial x} + \\ + c_f \rho_f v_y \frac{\partial T}{\partial y} = \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь m – пористость пласта; c , ρ – удельная теплоемкость и плотность соответственно; v – скорость фильтрации; индекс r (rock) соответствует скелету породы, слагающей пресноводный горизонт, индекс f (fluid) – пластовому флюиду (воде); $\lambda_x = \lambda_y$ – теплопроводность пласта. Скорость фильтрации рассчитывается по закону Дарси

$$v = -\frac{k}{\mu} \nabla p, \quad (3)$$

где k – проницаемость пласта; μ – динамическая вязкость жидкости.

В областях 2 и 3 решается уравнение теплопроводности [17]

$$c_i \rho_i \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_{xi} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_{yi} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + q_i; i = m, c, \quad (4)$$

где индекс i соответствует области металла m или цемента c ; q_i – удельная мощность тепловыделения, не равная нулю для обсадной колонны:

$$q_m = \frac{W}{HS}, \quad (5)$$

где W – мощность тепловыделения в обсадной колонне; H – длина участка индукционного нагрева; S – площадь поперечного сечения колонны.

Тепловые процессы в зоне 4 не моделируются, вместо этого на границе зон 3 и 4 задается условие теплообмена (1).

На внешних границах модели задаются скорости и температуры. На входе (правая граница) заданы условия постоянной температуры и скорости фильтрации жидкости:

$$\begin{cases} v(x=L, y) = v_{inlet}; \\ T(x=L, y) = T_{inlet}. \end{cases} \quad (6)$$

Здесь L – линейный размер области моделирования; v_{inlet} – скорость потока в пористой среде, которая является варьируемой величиной; $T_{inlet} = T_0 = 293,15$ К – начальная температура в модели.

На верхней и нижней границах заданы условия равенства нулю скорости и теплового потока:

$$\begin{cases} v(x, y=0) = 0; \\ \frac{\partial T}{\partial y}(x, y=0) = 0; \end{cases} \quad \begin{cases} v(x, y=L) = 0; \\ \frac{\partial T}{\partial y}(x, y=L) = 0. \end{cases} \quad (7)$$

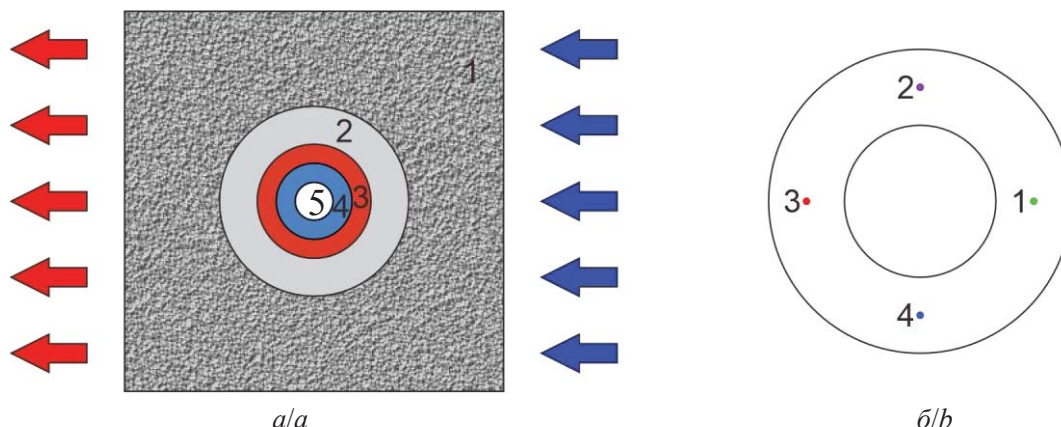


Рис. 1. Геометрия модели (горизонтальное сечение скважины и пласта): а) области: 1 – пресноводный горизонт; 2 – цементное кольцо; 3 – металлическая обсадная колонна; 4 – жидкость в обсадной колонне; 5 – индукционный нагреватель; б) точки 1–4 – регистрации температуры на внутренней поверхности обсадной колонны

Fig. 1. Model geometry (horizontal section of the well and reservoir): а) areas: 1 – freshwater horizon; 2 – cement ring; 3 – metal casing; 4 – liquid in the casing; 5 – induction heater; б) points 1–4 are the temperature registrations on the inner surface of the casing

На выходе модели (левая граница) задаются постоянное давление и условие отсутствия теплового потока (кондуктивного) через границу.

Теплообмен на границах твердых тел (горные породы 1 – цементное кольцо 2, цементное кольцо 2 – обсадная колонна 3) обусловлен теплопроводностью, на границах различных зон i и j выполняются условия равенства температур и тепловых потоков

$$\begin{aligned} T_i &= T_j; \\ \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial r} &= \lambda_j \frac{\partial T_j}{\partial r}. \end{aligned} \quad (8)$$

Применительно к моделированию фильтрационных процессов в пласте внешняя поверхность герметичного цементного кольца принимается как непроницаемая стенка.

Начальное условие для всех областей модели одинаково:

$$\begin{cases} v(t=0) = 0; \\ T(t=0) = T_{inlet}. \end{cases} \quad (9)$$

Влияние расхода жидкости в обсадной колонне (область 4) на температуру колонны (область 3) определяется коэффициентом теплообмена между стенкой металлической обсадной колонны и потоком жидкости [18]

$$\alpha = \frac{\lambda Nu}{d}, \quad (10)$$

где λ – теплопроводность жидкости; d – гидравлический диаметр потока; Nu – число Нуссельта, которое зависит от типа потока и определяется как

$$Nu = \begin{cases} Nu_1, Re \leq Re_1; \\ Nu_1 + \frac{Nu_2 - Nu_1}{Re_2 - Re_1} (Re - Re_1), Re_1 \leq Re \leq Re_2; \\ 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}, Re \geq Re_2, \end{cases} \quad (11)$$

где Nu , Re , Pr – числа Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля соответственно. Здесь первое выражение соответствует ламинарному типу движения ($Re_1 < 2300$), третье – турбулентному ($Re_2 > 10000$), второе – переходному; Nu_1 , Nu_2 – граничные значения чисел Нуссельта для режимов (4,36 и $0,023 \cdot 10000^{0.8} Pr^{0.4}$ соответственно).

Числа Рейнольдса и Прандтля определяются как [19]

$$\begin{aligned} Re &= \frac{\rho v d}{\mu}; \\ Pr &= \frac{\rho \mu}{\lambda}, \end{aligned} \quad (12)$$

где ρ – плотность жидкости; v – скорость потока; μ – динамическая вязкость.

Ввиду простоты принятых допущений о характере теплообмена колонны и потока жидкости внутри нее, соответствующих стабилизированному режиму течения, x -у модель в данной работе используется не для количественной оценки величины тепловых возмущений в обсадной колонне, ее основной задачей является установление качественных закономерностей, отражающих влияние горизонтального потока жидкости, обтекающего колонну, на характер теплового поля в ней при герметичном/негерметичном цементном кольце в процессе индукционного нагрева.

Принятые при моделировании параметры: внешний диаметр индукционного нагревателя 42 мм, внутренний диаметр обсадной колонны 126 мм, внешний диаметр 146 мм, толщина цементного кольца 35 мм, соответственно внешний диаметр скважины 216 мм. В табл. 1 приведены теплофизические свойства материалов модели

Таблица 1. Теплофизические параметры модели
Table 1. Thermophysical parameters of the model

Материал (зона) Material (zone)	λ , Вт/(м·К) W/(m·K)	c , Дж/(кг·К) J/(kg·K)	ρ , кг/м ³ kg/m ³
Жидкость, вода (1, 4) Liquid, water (1, 4)	0,65	4200	1000
Горные породы (1) Rocks (1)	2	1000	2000
Цемент (2)/Cement (2)	2	1000	2000
Металл, сталь (3) Metal, steel (3)	50	500	7800

Вязкость жидкости (воды) составляет 1 мПа·с, пористость пресноводного горизонта равна 0,2. Длительность цикла нагрева, после которого индукционный нагреватель отключается, составляет 10 мин. Рассмотрено три варианта объемного расхода жидкости в скважине: 10, 30, 120 м³/сут (принятая в нефтегазовой области единица измерения расхода) и три варианта скорости фильтрации жидкости в пресноводном горизонте: 10^{-4} , 10^{-3} , 10^{-2} м/с. В табл. 2 представлены значения коэффициента теплообмена α на внутренней стенке обсадной колонны в зависимости от расхода потока в ней.

Таблица 2. Расчет коэффициента теплообмена α
Table 2. Calculation of the heat transfer coefficient α

Q , м ³ /сут m ³ /day	v , м/с m/s	Re	Режим потока Flow mode	Pr	Nu	α
10	0,01	877	Ламинарный Laminar	6,46	4,36	22,5
30	0,03	2632	Переходный Transitional	6,46	7,48	38,6
120	0,125	10526	Турбулентный Turbulent	6,46	80,11	413,3

Система уравнений (1), (2), (4) с учетом граничных и начальных условий (6)–(9), а также вспомогательных выражений (5), (10)–(12) решается в Ansys Fluent. В качестве схемы аппроксимации уравнений используется схема SIMPLE. Для пространственной дискретизации конвективных членов была выбрана схема QUICK (Quadratic Upwind Interpolation). При расчете градиентов для вычисления диффузионных членов и производных скоростей используется способ Green-Gauss Node Based. Для вычисления градиента давления выбрана схема PRESTO! [20]. Другие особенности численного моделирования описаны в [21].

Модель индукционного нагрева обсадной колонны в скважине при наличии вертикального перетока жидкости в заколонном пространстве к пресноводному горизонту (r - z модель)

Рассматривается задача расчета поля температуры в теле обсадной колонны в процессе индукционного нагрева ее участка при наличии заколонного перетока – потока жидкости в пространстве между обсадной колонной и негерметичным цементным кольцом к пресноводному горизонту (рис. 2, исследования проводятся ниже по глубине пресноводного горизонта). Расчетная область состоит из пяти различных зон со свойствами, отличающимися от внутренней к внешней границе модели: индукционный нагреватель, жидкость в стволе скважины, металлическая обсадная колонна, жидкость в кольцевом заколонном пространстве, цементное кольцо и горные породы (теплофизические свойства областей приведены в табл. 1).

Допущения, принятые при моделировании:

- вертикальная скважина, однофазный восходящий поток вязкой несжимаемой жидкости в обсадной колонне и заколонном пространстве, силами инерции при движении жидкости пренебрегается;
- скважинный прибор с индуктором представлен в виде однородного сплошного цилиндра из углеродистого пластика, активная часть с индукционным нагревателем имеет длину H .

На рис. 2 показаны также радиусы элементов модели: внешний радиус индуктора r_1 , внутренний и внешний радиусы обсадной колонны r_2 и r_3 соответственно, внешний радиус скважины r_4 с учетом наличия заколонного перетока толщиной 1 мм (в расчетах принято $r_1=21$ мм, $r_2=63,5$ мм, $r_3=73,5$ мм, $r_4=74,5$ мм, $H=0,4$ м). Интервал нагрева располагается в диапазоне глубин 2,8–3,2 м (середина области моделирования).

Движение жидкости в скважине описывается уравнениями Навье–Стокса в приближении Буссинеска [22]

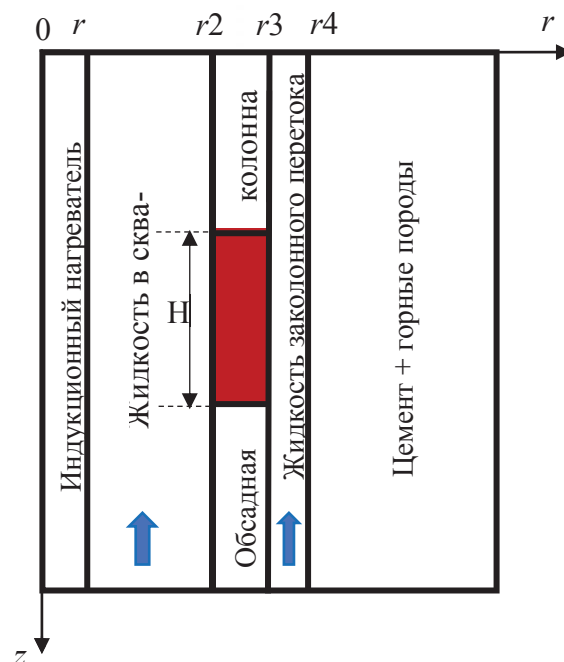


Рис. 2. Геометрия r - z модели (H – длина участка индукционного нагрева, r_1 – r_4 – радиусы элементов модели)

Fig. 2. Geometry of the r - z model (H is the length of the induction heating section, r_1 – r_4 are the radii of the model elements)

$$\rho_0 \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right) = -\nabla p + \mu \Delta \vec{v} + \rho(T) \vec{g};$$

$$\nabla(\vec{v}) = 0;$$

$$\rho(T) = \rho_0 (1 - \beta(T - T_0)),$$
(13)

где \vec{v} – скорость течения; ρ_0 – плотность жидкости при начальной температуре T_0 ; p – давление; μ – динамическая вязкость; \vec{g} – ускорение силы тяжести; β – коэффициент термического расширения.

Передача теплоты в жидкости осуществляется за счет конвективного теплопереноса и теплопроводности, распределение температуры T в индукторе, обсадной колонне, горных породах и цементном кольце определяется нестационарным уравнением теплопроводности:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \Delta T + w(z),$$
(14)

где λ – теплопроводность; c – удельная теплоемкость; $w(z)$ – удельная мощность тепловыделения (слагаемое для расчета температуры колонны). Граничные и начальные условия, а также детальное описание численного решения системы уравнений (13), (14) представлено в [21]. В частности, граничные условия для жидкости: на входе (нижняя граница, рис. 2) задается постоянная скорость потока v и температура T_0 , на

выходе (верхняя граница) задается граничное условие по давлению p и условие равенства нулю производной температуры по вертикальной координате z . На оси симметрии (левая граница $r=0$ на рис. 2) задается условие равенства нулю производной температуры по радиальной координате r . На правой границе задается ($r=1$ м) использовано условие постоянства температуры горных пород $T=T_0$. На верхней и нижней границах в области индуктора, обсадной колонны и горных пород задается условие равенства нулю производной температуры по вертикальной координате z . Теплообмен на внутренних границах моделируемых областей обусловлен теплопроводностью и описывается условиями (8).

Для моделирования турбулентных течений в обсадной колонне были рассмотрены модель турбулентности Спаларта–Аллмараса (SA) и модель переноса сдвиговых напряжений (SST $k-\omega$) [23]. Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными показало, что наилучшей сходимостью с экспериментальными данными обладает модель SST $k-\omega$, принятая в дальнейших расчетах (подробное описание представлено в [23]). Задача решается численно в Ansys Fluent в осесимметричной постановке [21, 23].

Анализ результатов моделирования

Основной задачей моделирования является исследование влияния потока жидкости в пространстве за обсадной колонной на особенности теплового поля в ней. На первом этапе рассматривается индукционный нагрев обсадной колонны на участке скважины, пересекающей пресноводный горизонт, и исследуется чувствительность температуры колонны к горизонтальному плоскопараллельному движению воды в пресноводном горизонте при герметичном цементном кольце (сценарий 1). На рис. 3 показана динамика изменения во времени температуры внутренней поверхности колонны (здесь и далее приведена разность между текущей и начальной температурой колонны $\Delta T = T - T_{inlet}$ в точках 1–4 (рис. 1), характеризующая ее разогрев) при различном расходе жидкости в стволе скважины. Скорость жидкости в пресноводном горизонте принята 10^{-4} м/с. Ввиду симметрии модели температура в точках 2 и 4 совпадает.

С увеличением расхода жидкости в скважине с 10 до $120 \text{ м}^3/\text{сут}$ режим течения потока переходит от ламинарного к турбулентному (табл. 2), при этом увеличивается интенсивность теплообмена колонны с потоком, а максимальный разогрев колонны снижается с 37,0 до 12,8 К. Благодаря наличию герметичного цементного кольца в пространстве за обсадной колонной (рис. 1), экранирующего влияние плоскопараллельного потока в пласте, значения температуры внутренней поверхности колонны в точках 1–4 близки между собой, макси-

мальная разница температур в точках 1–4 за 20-минутный цикл исследований при всех трех расходах $10\text{--}120 \text{ м}^3/\text{сут}$ не превышает 0,5 К.

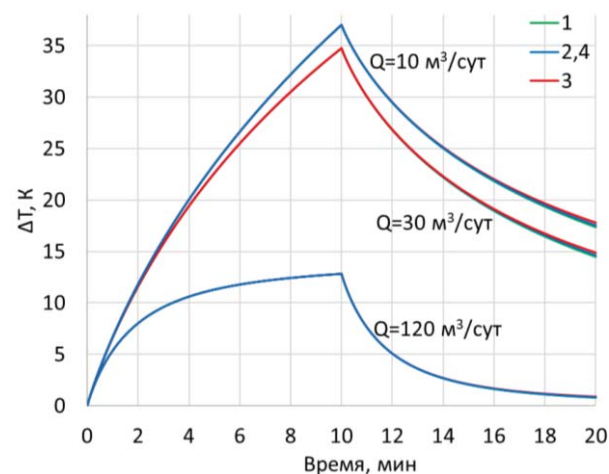


Рис. 3. Динамика температуры колонны в точках 1–4 при различном расходе жидкости в стволе скважины (шифр кривых)

Fig. 3. Column temperature dynamics at points 1–4 with different fluid flow in the borehole (curve key)

Изменение скорости потока в пресноводном горизонте в диапазоне $10^{-4}\text{--}10^{-2}$ м/с (расход жидкости в скважине принят $30 \text{ м}^3/\text{сут}$) практически не оказывает влияния на характер разогрева колонны в цикле нагрева, разница температур в точках 1–4 не превышает 0,1 К (рис. 4). Это связано с тем, что при герметичном цементном кольце теплообмен потока, фильтрующегося в пресноводном горизонте, с обсадной колонной происходит опосредованно, через цементное кольцо. Благодаря его низкой тепло- и теплопроводности (порядка $10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$) скорость распространения тепловых возмущений является достаточно небольшой, например, за 10-минутный цикл индукционного нагрева тепловое возмущение по цементу проходит расстояние только порядка толщины цементного кольца $r = \sqrt{\pi a t} \approx 40 \text{ мм}$.

Различие в показаниях датчиков отмечается только после отключения индукционного нагревателя (рис. 4, б). Из кривых азимутального распределения температуры в колонне (где нулевой азимут соответствует ориентации точки 1 и противоположен направлению фильтрационного потока в пласте) через 20 мин после начала исследования (или 10 мин после отключения нагревателя) следует, что при увеличении скорости потока в пресноводном горизонте с 10^{-4} до 10^{-2} м/с максимальный разогрев колонны снижается с 14,9 до 12,9 К (в точке 3). Разница температур между точками 1–4 варьируется в диапазоне 0,4–1 К в зависимости от скорости потока в пресноводном горизонте.

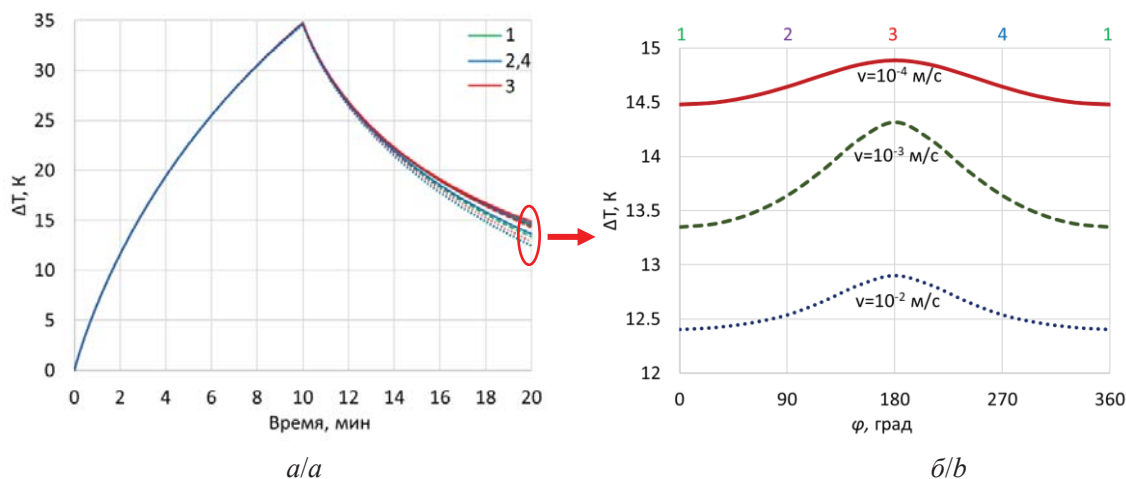


Рис. 4. а) динамика температуры колонны в точках 1–4 при различной скорости жидкости в пресноводном горизонте; б) азимутальное распределение температуры в колонне через 20 мин после начала исследований (сплошная линия – скорость потока в пресноводном горизонте 10^{-4} м/с, штриховая – 10^{-3} м/с, точки – 10^{-2} м/с)

Fig. 4. а) column temperature dynamics at points 1–4 at different fluid velocities in the freshwater horizon; б) azimuthal temperature distribution in the column 20 minutes after the start of the study (solid line – flow velocity in the freshwater horizon 10^{-4} m/s, dashed – 10^{-3} m/s, points – 10^{-2} m/s)

При цементировании скважин наибольшее распространение получил прямой метод, при котором цементный раствор закачивается в колонну обсадных труб, и затем под давлением он продавливается в пространство между обсадной колонной и горными породами, осуществляя подъем в заколонном пространстве. При наличии осложнений в процессе цементирования, например, поглощении тампонажного раствора, недостаточном подъеме уровня цемента в затрубном пространстве, в верхней части скважины цементное кольцо не будет герметичным. Результаты моделирования индукционного нагрева участка

скважины, обтекаемого горизонтальным потоком жидкости из пресноводного горизонта, при наличии негерметичного цементного кольца на этом участке, показаны на рис. 5 (сценарий 2). Негерметичное цементное кольцо моделируется для простоты как пористый пласт со свойствами, аналогичными пресноводному горизонту. В этом случае в области 2 решается уравнение (2) теплопроводности с учетом конвективного теплопереноса, скорость фильтрации рассчитывается по закону Дарси (3). Также при негерметичном цементном кольце непроницаемой стенкой является уже наружная стенка обсадной колонны.

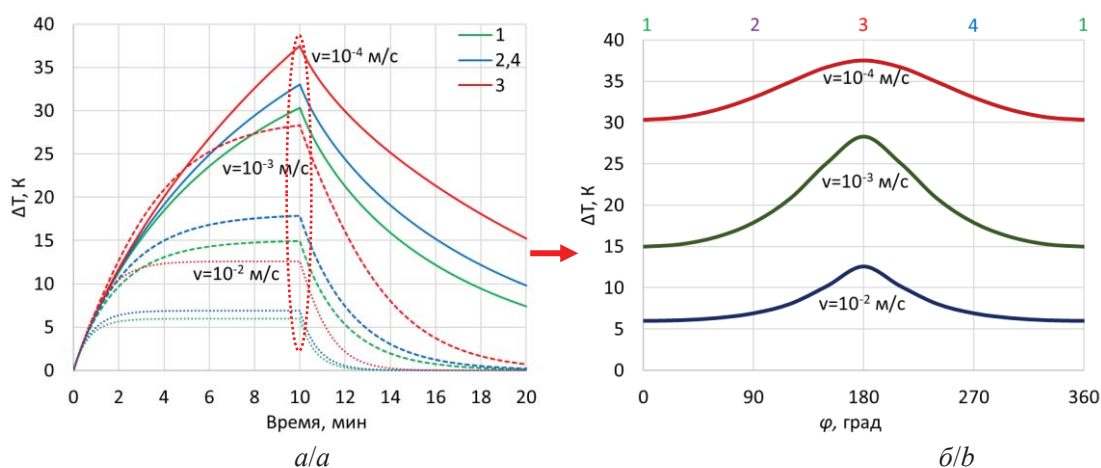


Рис. 5. а) динамика температуры колонны в точках 1–4 при различном расходе жидкости в пресноводном горизонте и негерметичном цементном кольце; б) азимутальное распределение температуры в колонне через 10 мин после включения индукционного нагревателя (сплошная линия – скорость фильтрации в пресноводном горизонте 10^{-4} м/с, штриховая – 10^{-3} м/с, точки – 10^{-2} м/с)

Fig. 5. а) column temperature dynamics at points 1–4 at different liquid flow rates in the freshwater horizon and an unpressurized cement ring; б) azimuthal temperature distribution in the column in 10 minutes the induction heater is turned on (solid line – flow velocity in the freshwater horizon 10^{-4} m/s, dashed – 10^{-3} m/s, points – 10^{-2} m/s)

При наличии негерметичности цементного кольца (трещин и каналов в цементе) фильтрационный поток в пласте может напрямую контактировать с обсадной колонной, в этом случае теплообмен интенсифицируется за счет конвекции, в результате чувствительность температуры колонны к потоку в пресноводном горизонте возрастает. При увеличении скорости потока в пресноводном горизонте с 10^{-4} до 10^{-2} м/с максимальный разогрев колонны в точке 1 снижается с 30,3 до 6,0 К (на 24,3 К), в точке 3 – с 37,5 до 12,6 К (на 24,9 К). Максимальная разница температур между точками 1–4 при негерметичном цементном кольце также существенно возрастает, например, при скорости потока 10^{-4} м/с она достигает 7,2 К, при скорости 10^{-3} м/с – 13,4 К, при скорости 10^{-2} м/с – 6,6 К. Поскольку теплоперенос осуществляется в направлении движения фильтрационного потока в пресноводном горизонте, максимальная температура достигается в точке 3, минимальная – в точке 1.

В рассмотренных выше расчетах при моделировании теплообмена обсадной колонны с потоком жидкости внутри нее учитывается влияние только вынужденной конвекции. В действительности вследствие индукционного нагрева колонны в жидкости возникает и свободная конвекция. Для оценки влияния свободной конвекции широко применяется критерий Ричардсона, который рассчитывается следующим образом:

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2} = \frac{gL\beta\Delta T}{\nu^2},$$

где Gr – число Грасгофа; Re – число Рейнольдса; β – коэффициент теплового расширения; ΔT – характерная разница температур; L – характерный линейный размер области теплообмена; ν – скорость потока жидкости.

При $Ri \ll 1$ влияние естественной тепловой конвекции пренебрежимо мало в сравнении с вынужденной, при $Ri \gg 1$, естественная тепловая конвекция преобладает над вынужденной, а при $Ri \approx 1$ требуется учет как естественной, так и вынужденной конвекции.

Для моделируемых условий расчетное число Ричардсона изменяется в интервале от 0,3 (для расхода жидкости в колонне 120 м³/сут) до 80 (для расхода жидкости в колонне 10 м³/сут), таким образом, влияние свободной тепловой конвекции значительно при малых расходах. В этой связи оно было учтено в рамках численной г-з модели.

Наиболее неблагоприятным с точки зрения экологии сценарием, возникающим при наличии негерметичности цементного кольца, является возникновение перетока пластовой продукции в верхние водоносные пресноводные горизонты, приводящее к их загрязнению (*сценарий 3*). Для выявления перетоков такого рода предлагается проведение скважинных исследований с применением индукционного нагревателя на участке скважины, расположенном ниже пресноводных горизонтов.

На рис. 6 показаны результаты расчета распределения температуры внутренней поверхности обсадной колонны при индукционном нагреве с учетом наличия заколонного перетока с расходом $q=1$ м³/сут, расход жидкости в скважине принят $Q=30$ м³/сут, другие параметры соответствуют вышеприведенным. В результате теплообмена жидкости в заколонном пространстве с нагретой обсадной колонной и дальнейшего конвективного теплопереноса в колонне формируется достаточно протяженная по вертикали область температурного возмущения (более 1–1,5 м относительно середины участка индукционного нагрева, имеющей координату $z=3$ м, температурное возмущение по величине превышает 1 К). Следует отметить, что влияние теплопроводности в металле за 20-минутный цикл исследования ограничивается расстоянием порядка $s = \sqrt{4at} \approx 0,2$ м, разогрев колонны за счет теплообмена с потоком жидкости в стволе скважины также менее существенен (это видно из распределения температуры в колонне без перетока (кривая $q=0$ м³/сут, рис. 7). Таким образом, увеличение температуры колонны на величину порядка 1 К и более в этой области связано главным образом с обратной передачей тепла обсадной колонне от нагретого флюида в заколонном пространстве.

Температурное поле в колонне выше участка нагрева при увеличении расхода заколонного перетока меняется нелинейно (рис. 7): с одной стороны, максимальные температурные возмущения снижаются вследствие того, что при большем расходе поток в заколонном пространстве более интенсивно уносит тепло из участка индукционного нагрева, не давая ему прогреться, с другой – скорость конвективного теплопереноса в заколонном пространстве возрастает, поэтому температурные возмущения распространяются вдоль колонны с большей скоростью. Например, при расходе заколонного перетока 0,5 м³/сут через 1 и 5 мин после остановки нагрева максимум температуры смещается от координаты $z=2,80$ м до координаты $z=2,55$ м (на 0,25 м), при расходе 1 м³/сут – от координаты $z=2,70$ м до координаты $z=2,20$ м (на 0,5 м). При расходе перетока 5 м³/сут уже через 5 мин температурные возмущения распространяются на расстояние более 3 м, однако их величина не превышает 1 К, тогда как при расходах до 1 м³/сут разогрев колонны выше участка индукционного нагрева достигает порядка 1–2 К.

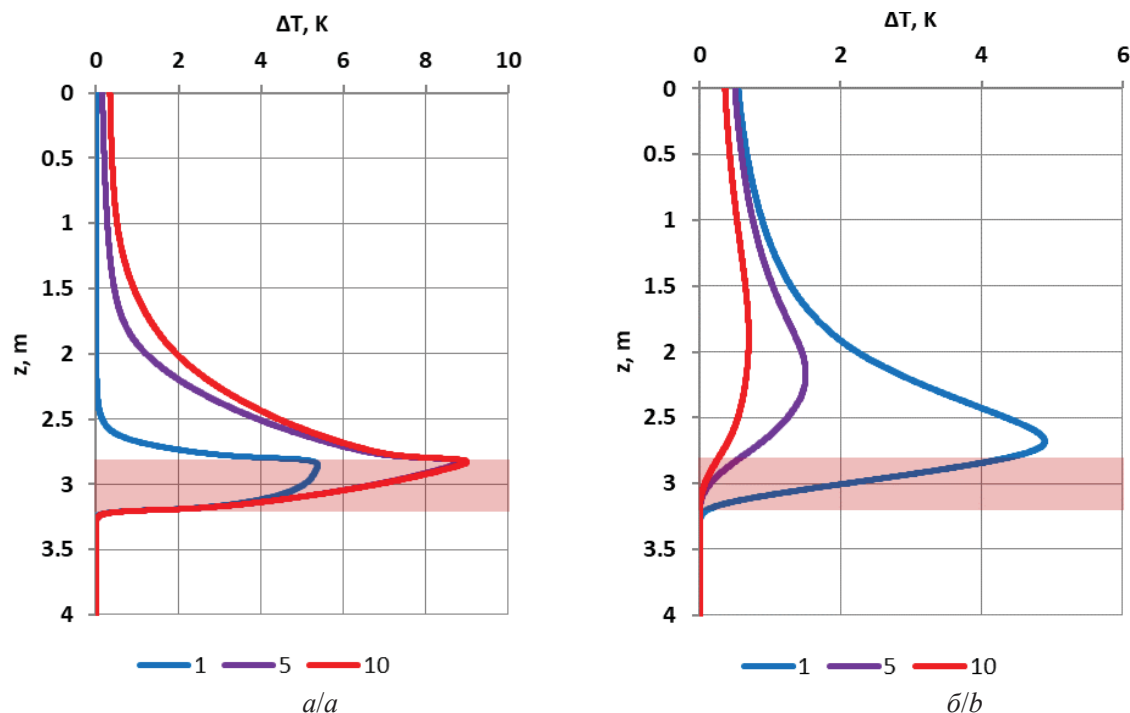


Рис. 6. Распределение температуры колонны по высоте при наличии заколонного перетока к пресноводному горизонту: а) в цикле нагрева; б) после отключения нагревателя (шифр кривых – время после включения/остановки индукционного нагрева в минутах, цветом выделен участок нагрева колонны)

Fig. 6. Column temperature distribution by height in the presence of a column flow to the freshwater horizon: а) in the heating cycle; б) after the heater is turned off (the curve key is the time after the induction heating is turned on/off in minute, the column heating section is highlighted in color)

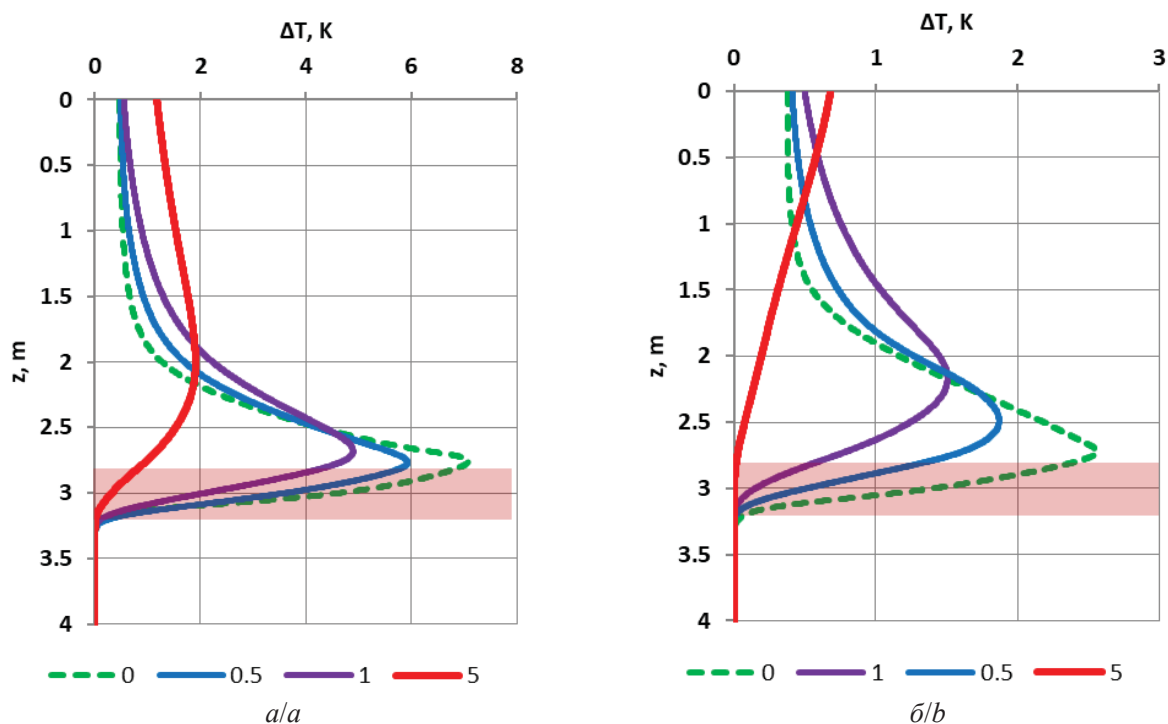


Рис. 7. Распределение температуры колонны по высоте при наличии заколонного перетока с различным расходом: а) через 1 мин после остановки нагрева; б) через 5 мин после остановки нагрева (шифр кривых – объемный расход жидкости в заколонном пространстве в м³/сут, цветом выделен участок нагрева колонны)

Fig. 7. Column temperature distribution by height in the presence of a column flow with different flow rates: а) 1 min after heating stops; б) 5 min after heating stops (the key of the curves is the volume flow of liquid in the column space in m³/day, the column heating section is highlighted in color)

Динамика температуры колонны на участке нагрева (выбрана координата $z=2,8$ м, соответствующая верхней границе интервала нагрева) показана на рис. 8.

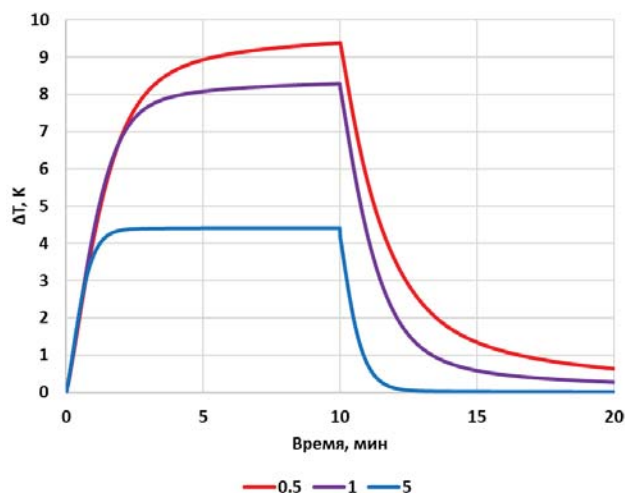


Рис. 8. Динамика температуры колонны на участке индукционного нагрева (шифр кривых – объемный расход жидкости в заколонном пространстве, $\text{м}^3/\text{сут}$)

Fig. 8. Column temperature dynamics at the induction heating site (curve cipher – volumetric flow rate of liquid in the column space, m^3/day)

Сравнивая результаты расчета в рамках r - z и x - y моделей, можно заключить, не учет особенностей смешанной конвекции в x - y модели приводит к завышению величины разогрева обсадной колонны.

При увеличении расхода заколонного перетока от 0,5 до 5 $\text{м}^3/\text{сут}$ максимальный разогрев колонны снижается с 9,3 до 4,4 К, т. е. более чем в 2 раза. Также при увеличении расхода заколонного перетока возрастает интенсивность охлаждения колонны во времени: если при расходе 0,5 $\text{м}^3/\text{сут}$ через 10 мин после отключения нагревателя остаточный разогрев колонны достигает 0,6 К, то при расходе 5 $\text{м}^3/\text{сут}$ уже в течение 2 мин после остановки нагрева разогрев колонны снижается практически до нулевого значения. Вышеперечисленные особенности температурного поля показывают информативность метода активной термометрии применительно к выявлению заколонных перетоков жидкости в интервалы пресноводных горизонтов.

Выводы

1. На основе результатов математического моделирования, выполненного в программном комплексе Ansys Fluent, изучены особенности формирования теплового поля в скважине, пересекающей пресноводный горизонт, в процессе локального индукционного нагрева обсадной ко-

лонны. Применительно к диагностике целостности цементного кольца рассмотрены три сценария, включающие технически исправную скважину с герметичным цементным кольцом, скважину с локальным нарушением герметичности цементного кольца в интервале пресноводного горизонта (без заколонного перетока), а также скважину с нарушением герметичности цементного кольца, обуславливающим заколонный переток жидкости к вышележащему интервалу пресноводного горизонта.

- Показано, что в технически исправной скважине при кратковременном индукционном нагреве (продолжительностью порядка 10 мин) благодаря низкой температуропроводности цементного кольца фильтрационный поток в пресноводном горизонте слабо влияет на температуру обсадной колонны, отличие температуры в различных точках колонны, расположенных в одном горизонтальном сечении и имеющих различный азимутальный угол, не превышает 0,1 К.
- Моделирование индукционного нагрева в скважине с локальной негерметичностью цементного кольца (в интервале пресноводного горизонта) показало, что в этом случае неоднородность азимутального распределения температуры в горизонтальном сечении обсадной колонны может достигать по величине нескольких градусов К, причем азимут максимальной температуры колонны соответствует направлению движения фильтрационного потока в пресноводном горизонте. Неоднородность азимутального распределения температуры колонны в процессе кратковременного индукционного нагрева на участке скважины, пересекающей пресноводный горизонт, является признаком негерметичности цементного кольца, при выявлении этого признака целесообразным является проведение детальных исследований целостности цементного кольца вдоль всего ствола скважины.
- Выполнено моделирование индукционного нагрева в скважине с нарушением герметичности цементного кольца и наличием заколонного перетока жидкости в заколонном пространстве к интервалу пресноводного горизонта. Установлено, что при наличии заколонного перетока в обсадной колонне выше участка индукционного нагрева формируется область температурного возмущения по вертикали длиной более 1 м, связанная с теплообменом жидкости в заколонном пространстве и обсадной колонны. Показано, что при увеличении расхода заколонного перетока в диапазоне 0,5–5 $\text{м}^3/\text{сут}$ максимальный разогрев колонны на участке индукционного нагрева снижается более чем в три раза, от 9,4 до 4,4 К. Вышеперечисленные особенности

температурного поля показывают информативность метода активной термометрии применительно к выявлению движения жидкости в законном пространстве скважин, пересекающих

пресноводные горизонты, в том числе для решения задачи диагностики их технического состояния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чижова М.А., Хайруллина Л.И., Тучкова О.А. Принципы создания и структура экологического мониторинга на объектах нефтедобычи // Вестник Технологического университета. – 2015. – Т. 18 – № 16. – С. 290–292.
2. Наянова Е.А., Курбатова А.И. Разработка программы производственного экологического мониторинга наульского месторождения нефти // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 11 (53). – С. 92–95.
3. Зималин С.В., Нетепенко Е.Н., Барановский М.Г. Экологичный комплексный реагент POLYSIL Potassium – ингибирующая основа бурового раствора для безаварийного бурения скважины // Нефть. Газ. Новации. – 2022. – № 7 (260). – С. 24–26.
4. Жолдакова З.И., Беляева Н.И. Опасность загрязнения водных объектов при нефтедобыче // Гигиена и санитария. – 2015. – Т. 94. – № 1. – С. 28–31.
5. Дзюбло А.Д., Рубан Г.Н. Надежная диагностика и ликвидация заколонных перетоков как залог экологической безопасности при разработке нефтегазовых месторождений // Актуальные проблемы нефти и газа. – 2018. – № 4 (23). – С. 1–10.
6. Machine-learning distributed-temperature-sensing-based pipeline leak detection / W. Sfar Zaoui, Th. Lauber, C. Pohl, M. Kerk, Th. Glaeser, W. Jelinek // SPE (Society of Petroleum Engineers) – 202905. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference. – Abu Dhabi, United Arab Emirates, 9–12 November 2020. – P. 1–11.
7. Well integrity leak diagnostic using fiber-optic distributed temperature sensing and production logging / J. Abeling, U. Bartels, K. Singh, Sh. Dutta, G. Agrawal, A. Kumar // SPE (Society of Petroleum Engineers) – 204557, SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference. – Manama, Bahrain, 28 November – 1 December, 2021. – P. 1–13.
8. Use of rigorous multiphase flow models for leak detection and online flow assurance / K. Havre, Ch. Trudvang, G. Kjørrefjord, S. Smith, C. King, J. Vinicombe, T. Roberts // SPE (Society of Petroleum Engineers) – 208899, SPE Canadian Energy Technology Conference. – Calgary, Alberta, Canada, 16–17 March 2022. – P. 1–19.
9. Использование искусственных тепловых полей в скважинной термометрии / Р.А. Валиуллин, Р.Ф. Шарафутдинов, В.Ю. Сорокань, А.А. Шилов // Каротажник. – 2002. – № 100. – С. 124–137.
10. Mathematical and computer simulation technology of condensate oil and gas wells stimulated by electromagnetic heating / C. Pu, R. Pei, H. Huang, J. Feng, G.H. Su // Journal of Hydrodynamics. – 2007. – Vol. 19. – № 3. – P. 292–302.
11. Экспериментальное исследование воздействия электромагнитных полей на нефтяные сланцы / Л.А. Ковалева, Р.Р. Зиннатуллин, Р.Ф. Султангузин, А.С. Сектаров, А.В. Шашков // Вестник Башкирского университета. – 2019. – Т. 24. – № 1. – С. 43–48.
12. Application of active temperature logging at oilfields of Russia / R.F. Sharafutdinov, R.A. Valiullin, A.Sh. Ramazanov, V.Ya. Fedotov, A.A. Sadretudinov, M.F. Zakirov // SPE (Society of Petroleum Engineers) – 161982, SPE Russian Oil and Gas Exploration and Production Technical Conference and Exhibition. – Moscow, Russia, 16–18 October 2012. – P. 1–10.
13. Канафин И.В., Космылин Д.В. Изучение формирования теплового поля на модели скважины с локальным нагревом // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2017. – № 2. – С. 44–48.
14. Enhancement of well productivity using a technique of high-frequency induction treatment / R.A. Valiullin, R.F. Sharafutdinov, A.Sh. Ramazanov, A.A. Shilov // SPE (Society of Petroleum Engineers) – 157724, SPE Heavy Oil Conference. – Canada, Calgary, Alberta, 12–14 June 2012. – P. 1–7.
15. Hasan A.R., Kabir C.S. Fluid flow and heat transfer in wellbores. – Richardson: Soc. Petrol. Eng., 2002. – 175 p.
16. Sakaida Sh., Zhu D. Completion effects on diagnosing multistage fracture treatments with distributed temperature sensing // SPE (Society of Petroleum Engineers) Production & Operation. – 2020. – Vol. 36. – № 1. – P. 160–173.
17. Onay M.E. Analytical solutions for predicting fracture outlet temperature of produced fluid from enhanced geothermal systems with different well-completion configurations // SPE-204274 – SPE Annual Technical Conference & Exhibition. Denver, Colorado, USA, 5–7 October 2020. – P. 1–36.
18. Fundamentals of heat and mass transfer. 8th ed. / Th.L. Bergman, A.S. Lavine, F.P. Incropera, D.P. de Witt. – St. Joseph County: University of Notre Dame, Indiana, USA, 2006. – 1070 p.
19. McEligot D.M., Taylor M.F. The turbulent Prandtl number in the near-wall region for low-Prandtl-number gas mixtures // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1996. – Vol. 39. – P. 1287–1295.
20. ANSYSR1 Documentation, Fluent Theory Guide. – Southpointe: ANSYS Inc, 2022. – 1036 p.
21. Тепловое поле в скважине при индукционном нагреве обсадной колонны в условиях низкой скорости потока / Р.З. Акчурин, Ф.Ф. Давлетшин, А.Ш. Рамазанов, Р.Ф. Шарафутдинов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 2. – С. 87–98.
22. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. – М.: Наука, 1986. – 736 с.
23. Неизотермическое течение жидкости в скважине при индукционном нагреве обсадной колонны / Ф.Ф. Давлетшин, Р.З. Акчурин, Р.Ф. Шарафутдинов, Д.Ф. Исламов // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2023. – № 4. – С. 81–92.

Информация об авторах

Руслан Зуфарович Акчурин, старший преподаватель кафедры геофизики Уфимского университета науки и технологий, Россия, 450074, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32. ac4urin.ruslan@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0000-9991-167X>

Филюс Фанизович Давлетшин, кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры геофизики Уфимского университета науки и технологий, Россия, 450074, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32. felix8047@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7532-1437>

Айрат Шайхуллинович Рамазанов, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры геофизики Уфимского университета науки и технологий, Россия, 450074, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32. ramaz@geotec.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5501-3755>

Рим Абдуллович Валиуллин, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой геофизики Уфимского университета науки и технологий, Россия, 450074, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32. valrageo@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3705-8260>

Рамиль Фаизырович Шарафутдинов, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры геофизики Уфимского университета науки и технологий, Россия, 450074, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32. gframil@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6980-8364>

Денис Фавилович Исламов, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры геофизики Уфимского университета науки и технологий, Россия, 450074, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32. islamovden@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5369-9327>

Поступила в редакцию: 08.09.2023

Поступила после рецензирования: 06.12.2023

Принята к публикации: 31.05.2024

REFERENCES

1. Chizhova M.A., Khayrullina L.I., Tuchkova O.A. Principles of creation and structure of environmental monitoring at oil production facilities. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*, 2015, vol. 18, no. 16, pp. 290–292. (In Russ.)
2. Nayanova E.A., Kurbatova A.I. The development of the production environmental monitoring program of naulsky oilfield. *International research journal*, 2016, vol. 53, no. 11, pp. 92–95. (In Russ.)
3. Zimalin S.V., Netepenko E.N., Baranovskiy M.G. The inhibitory basis in drilling fluid for trouble-free well drilling. *Neft. Gaz. Novacii*, 2022, vol. 260, no. 7, pp. 24–26. (In Russ.)
4. Zholdakova Z. I., Belyaeva N. I. Pollution hazard for water bodies at oil production. *Gigiena i sanitariya*, 2015, vol. 94, no. 1, pp. 28–31. (In Russ.)
5. Dzyublo A.D., Ruban G.N. Reliable diagnostics and liquidation of behind casing flows as an ecological safety guarantee during the oil and gas fields development. *Actual Problems of Oil and Gas*, 2018, vol. 23, no. 4, pp. 1–10. (In Russ.)
6. Sfar Zaoui W., Lauber Th., Pohl C., Kerk M., Glaeser Th., Jelinek W. Machine-learning distributed-temperature-sensing-based pipeline leak detection. *SPE (Society of Petroleum Engineers) – 202905, Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*. Abu Dhabi, United Arab Emirates, November 2020. pp. 1–11.
7. Abeling J., Bartels U., Singh K., Dutta Sh., Agrawal G., Kumar A. Well integrity leak diagnostic using fiber-optic distributed temperature sensing and production logging. *SPE (Society of Petroleum Engineers) – 204557, SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference*. Manama, Bahrain, November – December 2021. pp. 1–13.
8. Havre K., Trudvang Ch., Kjørrfjord G., Smith S., King C., Vinicombe J., Roberts T. Use of rigorous multiphase flow models for leak detection and online flow assurance. *SPE (Society of Petroleum Engineers) – 208899, SPE Canadian Energy Technology Conference*. Calgary, Alberta, Canada, March 2022. pp. 1–19.
9. Valiullin R.A., Sharafutdinov R.F., Sorokan V.Yu., Shilov A.A. The use of artificial thermal fields in borehole thermometry. *Karotazhnik*, 2002, no. 100, pp. 124–137. (In Russ.)
10. Pu C., Pei R., Huang H., Feng J., Su G.H. Mathematical and computer simulation technology of condensate oil and gas wells stimulated by electromagnetic heating. *Journal of Hydrodynamics*, 2007, vol. 19, no. 3, pp. 292–302.
11. Kovaleva L.A., Zinnatullin R.R., Sultanguzhin R.F., Sektarov E.S., Shashkov A.V. Experimental study of the influence of high frequency and microwave electromagnetic fields on oil shales. *Vestnik Bashkirskogo universiteta*, 2019, vol. 24, no. 1, pp. 43–48. (In Russ.)
12. Sharafutdinov R.F., Valiullin R.A., Ramazanov A.Sh., Fedotov V.Ya., Sadretdinov A.A., Zakirov M.F. Application of active temperature logging at oilfields of Russia. *SPE (Society of Petroleum Engineers) – 161982, SPE Russian Oil and Gas Exploration and Production Technical Conference and Exhibition*. Moscow, Russia, October 2012. pp. 1–10.
13. Kanafin I.V., Kosmylin D.V. Thermal field generation in wellbore analogue with local heating. *Proceedings of the Kabardino-Balkarian scientific center of the Russian Academy of Sciences*, 2017, no. 2, pp. 44–48. (In Russ.)
14. Valiullin R.A., Sharafutdinov R.F., Ramazanov A.Sh., Shilov A.A. Enhancement of well productivity using a technique of high-frequency induction treatment. *SPE (Society of Petroleum Engineers) – 157724, SPE Heavy Oil Conference Canada*. Calgary, Alberta, Canada, June 2012. pp. 1–7.
15. Hasan A.R., Kabir C.S. *Fluid flow and heat transfer in wellbores*. Richardson, Soc. Petrol. Eng., 2002. 175 p.
16. Sakaida Sh., Zhu D. Completion effects on diagnosing multistage fracture treatments with distributed temperature sensing. *SPE (Society of Petroleum Engineers) Production & Operation*, 2020, vol. 36, no. 1, pp. 160–173.
17. Onay M.E. Analytical solutions for predicting fracture outlet temperature of produced fluid from enhanced geothermal systems with different well-completion configurations. *SPE-204274 – SPE Annual Technical Conference & Exhibition*. Denver, Colorado, USA, October 2020. pp. 1–36.
18. Bergman Th.L., Lavine A.S., Incropera F.P., De Witt D.P. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 8th ed. St. Joseph County, University of Notre Dame, Indiana, USA, 2006. 1070 p.

19. McEligot D.M., Taylor M.F. The turbulent Prandtl number in the near-wall region for low-Prandtl-number gas mixtures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1996, vol. 39, pp. 1287–1295.
20. *ANSYSR1 Documentation, Fluent Theory Guide*. Southpointe, ANSYS Inc, 2022. 1036 p.
21. Akchurin R.Z. Thermal field in the well during induction heating of the casing under conditions of low flow velocity. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 2, pp. 87–98. (In Russ.)
22. Landau L.D., Lifshits E.M. *Hydrodynamics*. Moscow, Nauka Publ., 1986. 736 p. (In Russ.)
23. Davletshin F.F., Akchurin R.Z., Sharafutdinov R.F., Islamov D.F. Nonisothermal fluid flow in a well during induction heating of the casing string. *Fluid Dynamics*, 2023, vol. 58, no. 4, pp. 586–597. (In Russ.)

Information about the authors

Ruslan Z. Akchurin, Senior Lecturer, Ufa University of Science and Technology, 32, Zaki Validi street, Ufa, 450076, Russian Federation. ac4urin.ruslan@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0000-9991-167X>

Filyus F. Davletshin, Cand. Sc., Senior Lecturer, Ufa University of Science and Technology, 32, Zaki Validi street, Ufa, 450076, Russian Federation. felix8047@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7532-1437>

Ayrat Sh. Ramazanov, Dr. Sc., Professor, Ufa University of Science and Technology, 32, Zaki Validi street, Ufa, 450076, Russian Federation. ramaz-1953@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5501-3755>

Rim A. Valiullin, Dr. Sc., Professor, Head of the Department, Ufa University of Science and Technology, 32, Zaki Validi street, Ufa, 450076, Russian Federation. valrageo@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3705-8260>

Ramil F. Sharafutdinov Dr. Sc., Professor, Ufa University of Science and Technology, 32, Zaki Validi street, Ufa, 450076, Russian Federation. gframil@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6980-8364>

Denis F. Islamov, Cand. Sc., Associate Professor, Ufa University of Science and Technology, 32, Zaki Validi street, Ufa, 450076, Russian Federation. islamovden@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5369-9327>

Received: 08.09.2023

Revised: 06.12.2023

Accepted: 31.05.2024

УДК 622.276.6:622.276.4
DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4408
Шифр специальности ВАК: 05.15.00

Наножидкостное заводнение как метод повышения нефтеотдачи: механизм, преимущества

Е.С. Андреева, О.А. Маринина✉, Л.Г. Туровская

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

✉Marinina_OA@pers.spmi.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена тем фактом, что с помощью современных методов увеличения нефтеотдачи можно извлечь не более 34 % нефти от начальных извлекаемых запасов, в связи с чем требуется модернизация технологий третичного воздействия на пласт. В качестве одного из возможных путей развития данной сферы возможно использование наночастиц с целью увеличения коэффициента извлечения нефти за счет вытеснения остаточной и трудноизвлекаемой нефти. Технологии с применением наночастиц имеют ряд значительных преимуществ по сравнению с уже традиционными полимерным, щелочным, поверхностно-активным заводнениями. Наножидкостное заводнение позволяет увеличить коэффициент извлечения нефти. В данной работе рассматриваются механизмы действия наночастиц, способствующие извлечению нефти, взаимосвязь эффективности заводнения от температуры пласта, pH, минерализации вод и смачиваемости поверхности породы-коллектора для выявления ограничений применимости наножидкостей, возможности их модифицирования, с целью улучшения свойств и устранения недостатков наножидкостного заводнения. Подробно рассмотрено влияние химической природы наночастиц, их размера, поверхностного заряда, изоэлектрической точки и концентрации на горную породу, пластовые флюиды и эффективность извлечения углеводородов. Также сакцентировано внимание на последних современных направлениях развития технологии наножидкостного заводнения. **Цель:** всесторонний анализ наножидкостного заводнения как метода повышения нефтеотдачи. **Объекты:** химические методы повышения нефтеотдачи, наножидкостное заводнение. **Методы:** анализ актуальных публикаций по теме исследования. **Результаты.** Сформированы факторы, влияющие на эффективность применения наножидкостей в качестве метода повышения нефтеотдачи и механизмы воздействия наночастиц на нефтяные пласты, выделены перспективные направления развития технологии наночастиц.

Ключевые слова: наножидкость, наночастицы, нефть, остаточная нефть, методы повышения нефтеотдачи

Для цитирования: Андреева Е.С., Маринина О.А., Туровская Л.Г. Наножидкостное заводнение как метод повышения нефтеотдачи: механизм, преимущества // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 6. – С. 189–202. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4408

UDC 622.276.6:622.276.4
DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4408

Nanofluid flooding as a method of enhancing oil recovery: mechanism, advantages

E.S. Andreeva, O.A. Marinina✉, L.G. Turovskaya

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

✉Marinina_OA@pers.spmi.ru

Abstract. Relevance. The fact that with the help of modern methods of increasing oil recovery, it is possible to extract no more than 34% of oil from the initial recoverable reserves. Therefore, modernization of technologies for tertiary impact on the reservoir as one of the possible ways of developing this area is required. It is possible to use nanoparticles in order to increase the oil recovery coefficient by displacing residual and hard-to-recover oil. Technologies with the use of nanoparticles

have a number of significant advantages over the already traditional polymer, alkaline and surfactant flooding. Nanofluidic flooding allows increasing the oil recovery coefficient. The paper considers the mechanisms of action of nanoparticles contributing to oil recovery, the relationship of the effectiveness of flooding from the reservoir temperature, pH, water mineralization and wettability of the reservoir rock surface. These mechanisms are required for identifying limitations of the applicability of nanofluids, the possibility of their modification, in order to improve the properties and eliminate the disadvantages of nanofluid flooding. The effect of the chemical nature of nanoparticles, their size, surface charge, isoelectric point and concentration on rock, reservoir fluids and the efficiency of hydrocarbon extraction is considered in detail. Attention is also focused on the latest modern trends in the development of nanofluidic flooding technology. **Aim.** To conduct a comprehensive analysis of nanofluidic flooding as a method of increasing oil recovery. **Objects.** Chemical methods of enhancing oil recovery, nanofluidic flooding. **Methods.** Analysis of current publications on the research topic. **Results.** The factors influencing the effectiveness of the use of nanofluids as a method of increasing oil recovery and the mechanisms of the impact of nanoparticles on oil reservoirs are formed, promising directions for the development of nanoparticle technology are identified.

Keywords: nanofluid, nanoparticles, oil, residual oil, methods of enhancing oil recovery

For citation: Andreeva E.S., Marinina O.A., Turovskaya L.G. Nanofluid flooding as a method of enhancing oil recovery: mechanism, advantages. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 6, pp. 189–202. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4408

Введение

На сегодняшний день в России в среднем извлекается примерно 34 % от геологических запасов нефти с применением различных методов вторичной и третичной добычи, таких как термическое воздействие, закачка газа и химическое заводнение. Почти 60–70 % нефти от геологических запасов удерживается в порах и каналах коллектора. Традиционные третичные методы извлечения можно разделить на три основные группы: смешивающее воздействие, химическое заводнение и термические методы. Закачка пара, электромагнитное и электрическое тепловое воздействие относятся к термическим методам. В данной группе методов повышение температуры пласта позволяет уменьшить вязкость пластовой нефти [1–3]

Тем не менее высокая стоимость данных методов ограничивает их применимость. С другой стороны, растет использование смешивающегося заводнения, при котором различные типы растворителей смешиваются с остаточной нефтью, повышая подвижность флюида, что увеличивает коэффициент извлечения углеводородов [4]. Газовые методы увеличения нефтеотдачи, которые могут быть классифицированы как смешивающееся заводнение, в общем случае реализуются в непосредственной закачке газа, например, диоксид углерода высокого давления, азот, дымовой газ, сжиженный нефтяной газ, метан и метан, смешанный с легкими углеводородами. Однако методы воздействия газа на коллектор ограничены глубиной залежи. Для газовых методов требуются залежи, располагающиеся на глубине не менее 600–1500 м в зависимости от конкретного газа, входящего в состав агента закачки. Основным недостатком при этом является высокая чувствительность эффективности вытеснения углеводородов от свойств насыщающих пласт флюидов, в частности, сильное негативное

влияние оказывает повышенная вязкость и плотность нефти [5, 6].

Химическое заводнение заключается в закачке поверхностно-активного вещества, щелочи и полимеры вместе с водой в различном соотношении вводятся в коллектор с целью повышения эффективности вытеснения углеводородов и снижения межфазного натяжения. Используя этот метод, можно достичь высокого извлечения нефти – до 40 % [7]. Однако химическое заводнение имеет ряд существенных недостатков: высокую стоимость реагентов, адсорбцию составляющих раствора на поверхности горной породы, необратимую коагуляцию порового объема, возникновение опасных химических веществ в условиях повышенной минерализации и жесткости пластовых вод [8]. Кроме того, химические методы увеличения нефтеотдачи склонны к деградации в пластовых условиях, из-за чего не достигается должная эффективность от химического заводнения. Все вышеперечисленные недостатки обусловили необходимость в разработке новых, более надежных методов увеличения нефтеотдачи [9].

Наночастицы были внедрены в систему повышения нефтеотдачи в виде пен, гидрозолей и органоzeoлей для использования в полном объеме их преимуществ: высокой площади поверхности и подвижности, а также относительной простоты получения. Для улучшения дисперсии и характеристик наночастиц, для возможности их применения в осложненных пластах, разработали смеси наночастиц с различными поверхностно-активными веществами и полимерами. Например, фосфонаты как класс поверхностно-активных веществ обычно используются совместно с наночастицами. Тем не менее применение в условиях месторождения фосфонатов и многих других полимеров ограничено из-за их несоответствия требованиям к биodeградации [10, 11].

Результаты и их обсуждение

Благодаря уникальным свойствам наночастиц наножидкостное заводнение – введение наночастиц в водный раствор – широко изучалось как один из возможных путей решения недостатков современных химических методов повышения извлечения нефти, таких как полимерное заводнение [12].

Наночастицы обладают тремя уникальными свойствами, которые делают их эффективными в качестве метода увеличения добычи нефти. Во-первых, их небольшой размер позволяет им свободно фильтроваться в поровом объеме пласта, что недоступно для более крупных частиц (рис. 1). Во-вторых, свойства частиц в наномасштабе во многом зависят от их размера. Следовательно, наночастицы можно заготовить таким образом, чтобы они обладали определенными оптическими, магнитными, межфазными, электрическими или химическими свойствами для выполнения определенных функций. Наконец, они имеют большую площадь поверхности, чем площадь объемных частиц. Следовательно, они гораздо более активно взаимодействуют при контакте с окружающими материалами. Сочетание этих уникальных свойств позволяет использовать наночастицы для многих целей, в том числе для химической обработки коллектора [13, 14].



Рис. 1. Сравнение размеров частиц и наночастиц [14]

Fig. 1. Comparison of particle and nanoparticle sizes [14]

Помимо этого, наножидкости обладают более привлекательными свойствами по сравнению с традиционными коллоидными системами поверхностно-активных и полимерных веществ. Суспензии наноразмерных материалов проявляют более высокую устойчивость к осаждению благодаря высоким поверхностным силам, которые снижают агрегацию частиц, позволяя энтропийным силам уравновешивать силу тяжести [15]. Отличительной особенностью наножидкостей является возможность изменять основные характеристики состава, включая оптические, напряженно-деформированные, термические, реологические, магнитные и электрические свойства, путем изменения морфологии или размера наночастиц в процессе синтеза. Таким образом,

наножидкости могут быть сконструированы в таком виде, чтобы максимизировать добычу остаточной нефти из пластов за счет контроля их поверхности и размеров [16].

В пластовых условиях частицы всех размеров склонны к абсорбции, однако микрочастицы не способны ни десорбироваться обратно, ни фильтроваться на большие расстояния. Наночастицы при этом свободно проникают через большинство пор коллектора за счет потока флюидов и броуновского движения. В зависимости от сил взаимодействия с поверхностью поры броуновское движение может отделять частицы после адсорбции со стенок пор (рис. 2) [14].

Чем меньше размер частиц, тем большим коэффициентом диффузии и более высокой подвижностью они обладают. В связи с этим частицы в меньшей степени склонны к прилипанию к стенкам пор, и вероятность адсорбции наноразмерных частиц стремится к нулю [17].

Из всего разнообразия наночастиц частицы SiO_2 является наиболее близкими по составу для большинства коллекторов. Соответственно, потенциальное загрязнение окружающей среды из-за химической природы наночастиц может быть сведено к минимуму при использовании чистого SiO_2 .

По результатам экспериментов в лабораторных условиях при заводнении образцов керна получены значения эффективности извлечения нефти наночастицами различного состава (рис. 3), наилучший результат показали наночастицы SiO_2 , CuO , Fe_2O_3 , TiO_2 [18].

Помимо этого, выявлена возможность изменения вязкости базовой жидкости, которая увеличивается при диспергировании наночастиц. Присутствие наночастиц в жидкости закачки может изменять реологические свойства этой эмульсии от ньютоновской жидкости, где вязкость жидкости зависит от состава, давления и температуры, до неньютоновской жидкости, где на вязкость жидкости также могут влиять условия течения и напряженное состояние породы. Кажущаяся вязкость неньютоновских жидкостей может быть выше или ниже вязкости составляющих их жидкостей [19, 20]. Следовательно, воздействие на коллектор неньютоновской жидкости с более высокой вязкостью при эмульгировании остаточной нефти может привести к более высокой эффективности системы поддержания пластового давления (ППД) по сравнению с ньютоновской жидкостью. Полученная в результате взаимодействия наночастиц и пластового флюида суспензия может лучше преодолевать капиллярные силы и вытеснять нефть по модели, приближенной к поршневой, сводящей к минимуму оставление незахваченных заводнением зон [16, 21].

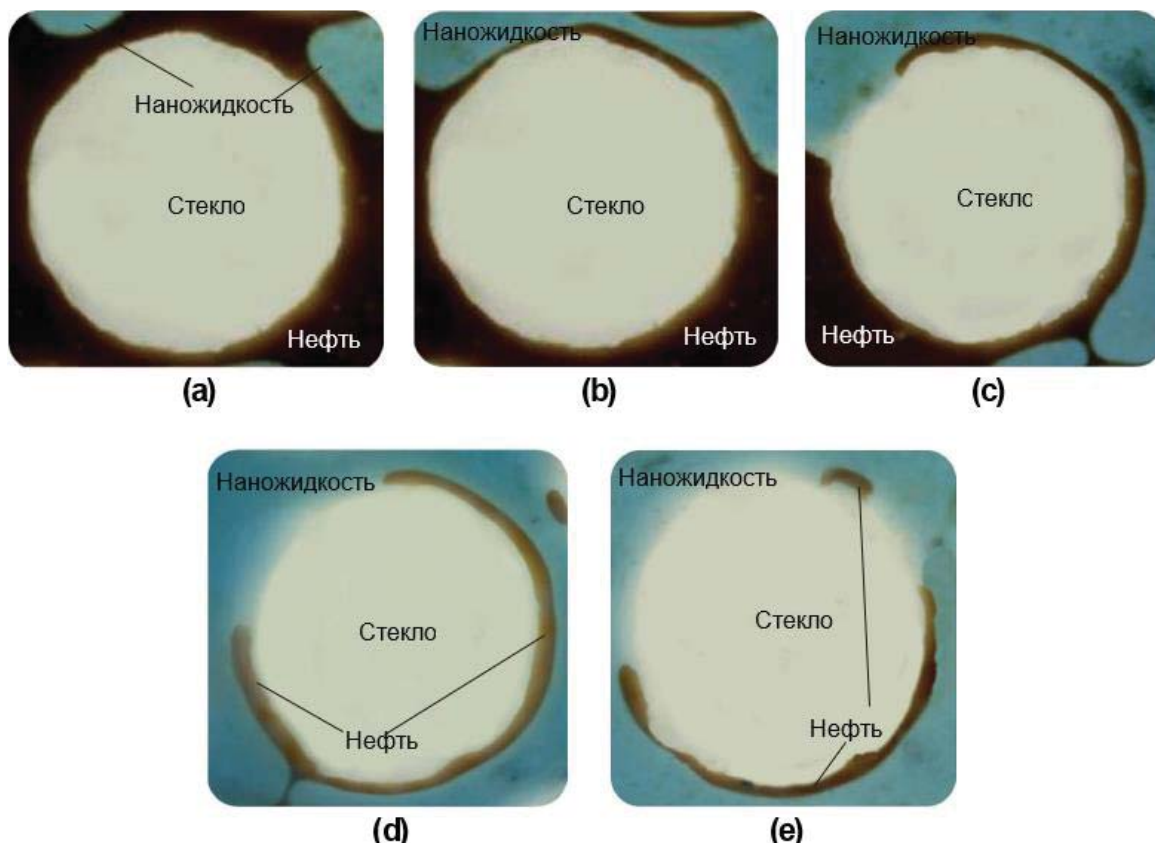


Рис. 2. Микромодели фильтрации нефти в масштабе пор при заводнении наножидкостью в течение: а) 0; б) 1000; в) 2000; г) 3000; е) 5000 секунд после воздействия наножидкостью на модель порового пространства [14]

Fig. 2. Micromodels at the pore scale when flooded with nanofluid for: a) 0; b) 1000; c) 2000; d) 3000; e) 5000 seconds after exposure to nanofluid on the pore space model [14]

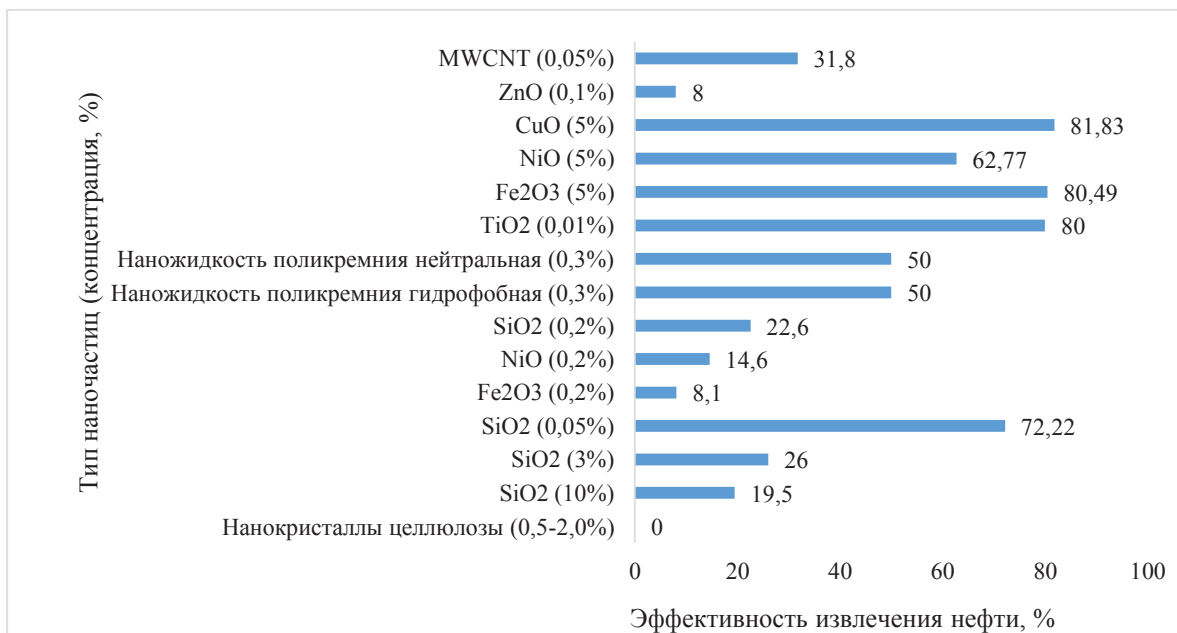


Рис. 3. Результаты лабораторных исследований по эффективности извлечения нефти различными наночастицами [18]

Fig. 3. Results of laboratory studies on the efficiency of oil extraction by various nanoparticles [18]

Проблемы применения наночастиц как метода повышения нефтеотдачи. В основном выделяют шесть сил, которые определяют характер воздействия химических методов повышения нефтеотдачи в пластовом объеме: межмолекулярные силы, расклинивающее давление, поверхностное натяжение, капиллярная сила, сила вязкого трения, сила тяжести. Данные силы зависят во многом от свойств поверхностной пленки, распределения воды, шероховатости, минералогии и формы частиц [22].

Эффективность извлечения нефти наножидкостью зависит:

- от минерализации пластового флюида;
- pH пласта;
- поверхностного заряда породы коллектора;
- температуры резервуара.

Влияние минерализации пластового флюида на эффективность воздействия на пласт наночастицами. Стабильность наночастиц в водных растворах во многом зависит от сил электростатического отталкивания между одинаково заряженными поверхностями. Высокое ионное взаимодействие в пласте, обусловленное присутствием растворенных солей, приводит к значительному уменьшению электрического отталкивания между наночастицами и к их слипанию. Обилие ионов в растворе также может привести к поверхностной нейтрализации заряженных частиц. Оба эффекта позволяют силам притягивания преобладать на больших расстояниях над другими силами. Силы Ван-дер-Ваальса, или силы притягивания, – это относительно малодействующие, слабые силы притяжения между электрически нейтральными молекулами, которые сталкиваются или движутся близко друг к другу. Эти силы электростатичны по своей природе и проявляются как притяжение между сильно положительно заряженными молекулами и сильно отрицательно заряженными, но это взаимодействие намного слабее химического. В коллекторе следует учитывать силы Ван-дер-Ваальса из-за весьма тесного взаимодействия наночастиц [23, 24].

В соответствии с этим экспериментальные исследования подтвердили, что эффективность извлечения углеводородов снижается на 10 % при закачке наножидкостей в среду с высокой минерализацией по сравнению со средой с низкой минерализацией. Когда наножидкости используются в качестве метода третичного извлечения после закачки минерализованной воды, происходит перемешивание, что способствует более высокой агломерации наночастиц, их адсорбции и осаждению в поровой среде [25, 26].

Влияние минерализации на стабильность наночастиц также может быть связано со смачиваемостью поверхности наночастиц [26]. При постоян-

ной концентрации частиц минерализация оказывала незначительное влияние на объемную долю воды в эмульсии, образованной с гидрофобными наночастицами, тогда как для гидрофильных наночастиц влияние было значительным. Предлагаемое обоснование заключается в том, что гидрофобные наночастицы в большей степени проникают в нефтяную фазу и, следовательно, защищены от воздействия ионного взаимодействия водной фазы. Гидрофильные наночастицы с обильными поверхностными зарядами могут меньше разделяться на поверхности фаз и, следовательно, подвергаются дестабилизирующему эффекту ионного взаимодействия водной фазы [27, 28].

Влияние pH пласта. Экспериментально было обнаружено, что гидродинамический диаметр наночастиц имеет меньшее значение при pH, отличающемся от изоэлектрической точки, что повышает их подвижность в коллекторе. Было изучено влияние размера частиц маггемита на pH, соответствующий изоэлектрической точке. Выявили, что при меньшем размере частиц наблюдался сдвиг изоэлектрической точки наночастиц в сторону более высокого pH. Это явление можно объяснить увеличением количества десорбированных протонов на поверхности частиц. Соответственно, химический состав поверхности частиц изменяется с изменением размера частиц, и впоследствии это влияет на конечную кислотность и вязкость состава [29, 30].

С другой стороны, несколько типов наночастиц могут взаимодействовать с водой, и их взаимодействие усиливается в щелочной среде, что влияет на эффект заводнения. В конечном счете, pH может достигать значения, соответствующего изоэлектрической точке, что приводит к агломерации частиц и снижению подвижности частиц в пористой среде. При длительном контакте наночастиц с породой происходит повышение смачиваемости поверхности породы в результате дестабилизации наночастиц и адсорбции на поверхности породы [31, 32]. И, соответственно, чем ниже скорость потока жидкости в коллекторе, тем выше время контакта наночастиц с породой и тем выше адсорбция. Тем не менее гидролиз наночастиц может быть незначительным в определенном диапазоне pH. Например, результаты показали, что в кислой среде наночастицы ZnO проявляют минимальное взаимодействие с водой, а pH базовой жидкости остается почти постоянным со временем деградации [33].

Влияние поверхностного заряда породы коллектора на эффективность воздействия на пласт наночастицами. Поверхностный заряд коллектора весьма чувствителен к окружающим условиям, особенно к pH. Следовательно, электростатические взаимодействия с породой будут оказывать существенное влияние на адсорбцию наночастиц, что

может негативно повлиять на добычу нефти во время повышения нефтеотдачи [33].

Проводились исследования по введению трех различных типов наночастиц (SiO_2 , TiO_2 и Al_2O_3) в образец керна известняка. Несмотря на наиболее крупный размер частиц Al_2O_3 , в результатах эксперимента 91,8 % наночастиц Al_2O_3 были успешно извлечены, при том, что более мелкие частицы TiO_2 и SiO_2 показали, соответственно, 72,2 и 56,6 %. Более высокую эффективность наночастиц Al_2O_3 можно объяснить соответствием зарядов частиц и поверхности горной породы.

Для преодоления негативного воздействия заряда горной породы возможно введение в раствор наночастиц вспомогательных ионных жидкостей или катионных поверхностно-активных веществ. Таким образом можно минимизировать влияние явления адсорбции раствора наночастиц на поверхности горной породы и электростатическое притяжение наночастиц к породам-коллекторам [34, 35].

Влияние температуры резервуара на эффективность воздействия на пласт наночастицами. Температура пласта может существенно влиять на характеристики закачиваемых реагентов и эффективность воздействия различных методов увеличения нефтеотдачи. Было обнаружено, что карбонатные породы становятся более гидрофильными с повышением температуры пласта. При увеличении температуры у некоторых горных пород: известняка, кварца, каолинита и кальцита, заряд поверхности пор становился более отрицательным. При этом повышение температуры может вызвать преждевременную деградацию реагентов и выпадение осадка. По результатам экспериментов выявили более высокую термическую стабильность наночастиц по сравнению с поверхностно-активными веществами [35].

При исследовании зависимости межфазного натяжения на границе нефть–вода при заводнении наночастицами выявили, что при повышении температуры снижается межфазное натяжение. Но при этом при повышении температуры происходит ускорение различных негативных явлений, в том числе усиление реакций пластовых солей на закачиваемый реагент, ускорение броуновского движения, что может привести к агрегации частиц. Поверхностный заряд некоторых наночастиц при совместной закачке с полимерами или поверхностно-активными веществами уменьшается при повышении температуры жидкости, что объясняется экзотермической реакцией с пластом [36].

К механизмам наножидкостей, которые способствуют увеличению нефтеотдачи, относят:

- снижение межфазного натяжения;
- увеличение вязкости;

- изменение расклинивающего давления;
- образование эмульсии Пикеринга в пласте.

Наножидкости позволяют увеличить извлечение нефти из пор и каналов горных пород с помощью нескольких механизмов. К основным механизмам относятся: снижение межфазного натяжения, увеличение вязкости, изменение расклинивающего давления и изменение смачиваемости, образование эмульсии и ограничение потока могут влиять на добычу нефти.

Снижение межфазного натяжения является одним из основных механизмов повышения нефтеотдачи пластов на микроуровне. Эксперименты показали обратную зависимость концентрации наночастиц и межфазного натяжения на границе нефть–вода. Однако при достижении концентрации наночастиц 0,8 мас. % и выше не происходит значительного изменения межфазного натяжения, данный эффект аналогичен изменениям межфазного натяжения поверхностно-активными веществами, изменение межфазного натяжения происходит до тех пор, пока поверхность раздела нефть–вода полностью не занята частицами [37]. С другой стороны, выявили взаимосвязь количества наночастиц на границе раздела нефть–вода и межфазного натяжения от плотности заряда поверхности наночастиц, при уменьшении плотности заряда увеличивается количество частиц на границе раздела и уменьшается межфазное натяжение. Поэтому важно учитывать плотность поверхностного заряда частиц из-за тесной взаимосвязи со стабильностью наножидкости, возможности негативного влияния на изoeлектрическую точку, что приводит к ограниченному количеству частиц на границе раздела, снижая эффект от воздействия наножидкостного заводнения [38, 39].

Благодаря образованию на границе нефть–вода тонкой пленки из наночастиц при заводнении наножидкостью возникает локальное *повышение вязкости* по причине увеличения удельного количества частиц межфазной области. Следовательно, достигается более высокий коэффициент подвижности за счет макроскопического перемещения нефти по модели поршневого вытеснения (рис. 4) [40].

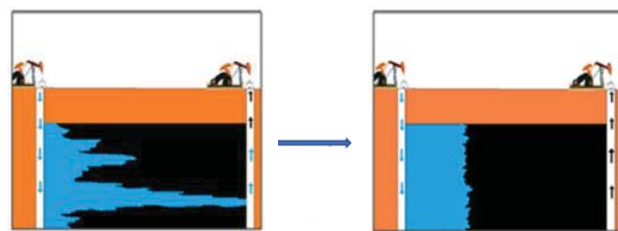


Рис. 4. Поршневое и непоршневое вытеснение [14]
Fig. 4. Piston and non-piston displacement [14]



Рис. 5. Принципиальная схема различия фильтрации нефти в коллекторе под действием воды и наножидкости [18]
Fig. 5. Schematic diagram of the difference between oil filtration in the reservoir under the action of water and nanofluid [18]

Вязкость вытесняющей жидкости в процессе повышения нефтеотдачи наночастицами может быть изменена за счет воздействия электрическим и магнитным полями. При воздействии на наночастицы особого состава электрическим полем возникает явление электрореологического эффекта. При данном воздействии возникает увеличение вязкости раствора наножидкости из-за образования фибриллизованной сетки при переориентации поляризованных молекул вдоль направления приложенного поля (рис. 5) [40].

В наножидкостях, подвергнутых электрореологическому воздействию, происходит в основном два явления, оказывающих положительное воздействие на вытесняющую способность состава: поляризация частиц под действием электрического поля и выстраивание частиц вдоль направления этого поля. Межфазная поляризация играет решающую роль в образовании большого количества поверхностных зарядов [41].

Применяются специально разработанные магнитореологические наножидкости, которые представляют собой дисперсию частиц, легко намагничиваемых и размагничиваемых в масло-носителе. Масло-носитель применяется из-за относительно низкой излучательной способности, предотвращающей агрегацию наночастиц под воздействием магнитного поля, и относительно высокой вязкости состава. Однако магнитные силы для рассматриваемых нано-феррожидкостей не являются преобладающими, броуновское движение оказывает большее влияние, из-за чего магнитореологические жидкости не достигают значительного изменения вязкости и делают данные составы неэффективными как метод увеличения нефтеотдачи на данном этапе развития [42, 43].

Изменение расклинивающего давления. При воздействии наножидкостями на модели керны было обнаружено явление самоструктурирования частиц в процессе их адсорбции вдоль границы раздела порода-нефть, другими словами, наблюдалось образование тонкой пленки. Из-за образования этой пленки возникает расклинивающее давление, которое проявляет колебательные экспоненциальные движения пленки, причем как коэффициент спада, так и период колебаний были равны эффективному диаметру частиц [44]. Однако при значениях ниже

эффективного диаметра наночастиц преобладают электростатические, сольватационные и силы Ван-дер-Ваальса. Скорость распространения наножидкостной пленки зависит от концентрации наночастиц и объема нефтяной капли. Следовательно, скорость внутреннего контакта увеличивается при снижении концентрации наночастиц и уменьшается при снижении объема капли. *Изменение расклинивающего давления* помогает мобилизовать нефть на микроскопическом уровне [45].

Смачиваемость горной породы значительно влияет на коэффициент извлечения нефти, извлечение нефти в гидрофильных пластах намного превышает степень извлечения в гидрофобных. При воздействии на гидрофобный (липофильный) коллектор наножидкости способны изменить смачиваемость породы и сделать породу гидрофильной, что позволит значительно увеличить нефтеотдачу. Рассмотренные ранее параметры пласта влияют на адсорбцию наночастиц, что непосредственно влияет на смачиваемость горной породы-коллектора (рис. 6). При исследовании данного явления проводились эксперименты со смачиваемостью стекла наночастицами SiO_2 , в результате удалось снизить угол контакта воды со стеклом со 100 до 0°, тем самым изменив смачиваемость стекла на гидрофильную [45].

Было проведено исследование влияния расклинивающего давления нанопленок на изменение смачиваемости при заводнении искусственного керны из стеклянных шариков наножидкостью. В результате исследования керны до и после заводнения с помощью микро-КТ обнаружили взаимосвязь смачиваемости породы и расклинивающего давления. В связи с этим изменить степень смачиваемости коллектора можно за счет увеличения минерализации наножидкости, которая повышает адсорбцию частиц на поверхности породы [46].

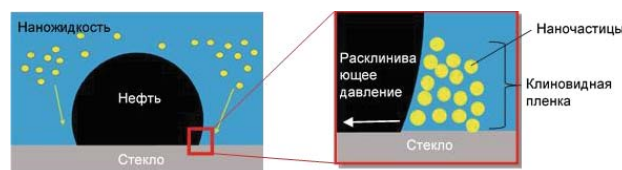


Рис. 6. Процесс изменения смачиваемости стекла наножидкостью [45]
Fig. 6. Change in glass wettability with nanofluid [45]

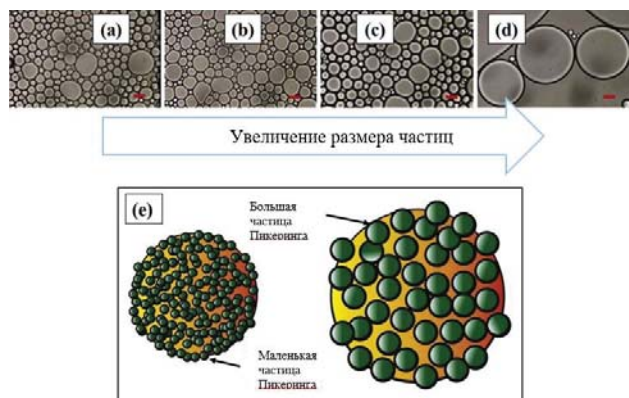


Рис. 7. Влияние размера частиц на размер капель эмульсии, стабилизированных наночастицами кремнезема размером (нм): а) 5; б) 12; в) 25; д) 80 [51]

Fig. 7. Effect of particle size on the size of emulsion droplets with stabilized silica nanoparticles (nm): a) 5; б) 12; в) 25; д) 80 [51]

Эмульсия Пикеринга образуется посредством когезионной адсорбции наночастиц на границе раздела нефть–вода, создавая трехмерную сложную пленку, которая препятствует слипанию капель нефти. Эмульсия Пикеринга более стабильна в различных пластовых условиях по сравнению с обычными эмульсиями с поверхностно-активными веществами благодаря необратимой адсорбции наночастиц [47]. Образование эмульсии этого типа происходит в результате склеивания капель нефти в наножидкости без объединения в один поток (рис. 7). Вязкость безводных эмульсий сильно зависит от температуры и водонасыщенности. При образовании в пласте безводная эмульсия ограничивает поток в зонах с высокой проницаемостью и активизирует фильтрацию в зонах с более низкой проницаемостью, что увеличивает коэффициент охвата пласта и коэффициент извлечения нефти [48]. Еще одной важной особенностью таких эмульсий является значительная устойчивость к деформации, которая у обычных эмульсий с поверхностно-активными веществами значительно ниже из-за необратимой адсорбции твердых частиц на границах раздела двух несмешивающихся жидкостей, что стало возможным благодаря частичным смачивающим свойствам наночастиц [49, 50].

К перспективным направлениям применения наночастиц как метода повышения нефтеотдачи можно отнести:

- разветвленные полимеры с ядром-наночастицей;
- стабилизированные пены;
- щелочно-кремниевые нано-полимеры.

В процессе развития технологии полимерного заводнения были различные этапы: первое поколение (линейный полимер), второе поколение (гребенчатый полимер) и третье поколение (гиперраз-

ветвленный полимер). Гиперразветвленный полимер имеет трехмерную структуру с разветвленными блоками (линейный блок, дендритный блок, начальный блок и конечный блок). Последнее поколение полимеров имеет ряд преимуществ, в том числе контролируемый размер частиц, регулируемые реологические свойства, отличная «отзывчивость», низкая сцепка и стабильность, тем самым превосходя предыдущие разработки [51–54].

Был разработан разветвленный полимер (polymer based on modified chitosan – HPDCS) с ядром, модифицированным хитозаном. Данный полимер нового поколения предназначен для повышения нефтеотдачи, имеет состав природного происхождения и принудительно разлагается в течение 45 часов под воздействием фермента биологического происхождения. По результатам испытаний на модели керна достигнуто повышение коэффициента извлечения нефти на 24,12 % больше, чем при частичном воздействии гидрализованым полиакриламидом (hydrolyzed polyacrylamide – HPAM) [55].

При применении в качестве ядра наночастицы SiO_2 для разветвленной полиакриламидной цепи был получен новый гиперразветвленный сополимер (hyperbranched copolymer – HPBS) с образованием *in situ*, с меньшим гидродинамическим радиусом по сравнению с HPAM, что позволит данным частицам фильтроваться в поры и каналы меньших размеров.

Звездообразный амфифильный полиакриламид (surfactant hydrolyzed polyacrylamide – SHPAM) имеет тройную структуру, состоящую из SiO_2 в качестве ядра, полиамидоamina (polyacrylamide amine – PAMAM) в качестве среднего слоя и гидрофильной полиакриламидной цепи в качестве внешней оболочки. Даже после заводнения HPAM в области с низким числом капилляров (<10–5) заводнение полимером показало более высокую эффективность извлечения SHPAM до 3 % [56].

Данное направление методов повышения нефтеотдачи активно развивается путем совершенствования технологии полимерного заводнения за счет внедрения наночастиц, что позволяет повысить стабильность и управляемость заводнения [57–59].

Еще одним из направлений применения наночастиц для целей усовершенствования существующих методов повышения нефтеотдачи является добавка наночастиц в технологии метановых пен.

В ходе исследования влияния наночастиц TiO_2 , Al_2O_3 , ZnO и SiO_2 на стабильность метановых пен при различных температурах выявлено положительное воздействие рассматриваемых наночастиц в концентрациях от 0,005–0,1 мас. % на стабильность образующихся пенообразователей под действием газообразного метана. Для SiO_2 и ZnO

наиболее эффективной концентрацией оказалось 0,01 мас. %, а для TiO_2 и Al_2O_3 – 0,05 мас. %.

По результатам лабораторных испытаний на образцах керна после первичной и вторичной добычи нефти (рис. 8) можно выявить незначительное различие в значении повышения нефтеотдачи различными наночастицами. В связи с этим можно сделать вывод, что частицы TiO_2 , Al_2O_3 , ZnO и SiO_2 позволяют повысить эффективность метановых пен как метода увеличения нефтеотдачи, уменьшают размеры пузырьков и повышают стабильность агента [60].

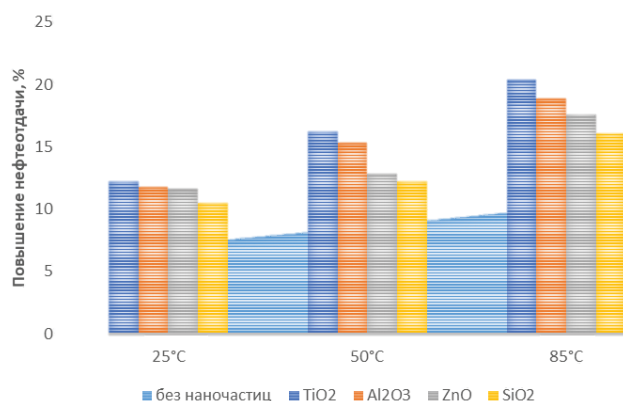


Рис. 8. Дополнительная добыча нефти с применением наночастиц в различных температурных условиях [60]

Fig. 8. Additional oil production using nanoparticles under various temperature conditions [60]

Технология повышения нефтеотдачи «заводнение щелочно-кремневыми нано-полимерами» (*alkali-silica nanoparticle-polymer – ANP*) разработана для увеличения извлечения тяжелой нефти. Данная технология в первую очередь направлена на снижение межфазного натяжения, изменение смачиваемости горной породы, образование стабильной эмульсии и повышение коэффициента вытеснения тяжелой нефти. По результатам лабораторных испытаний наножидкость ANP остается стабильной в течение 30 дней без выпадения осадка за счет синергетического эффекта щелочи и полимера, влияющего на агрегацию наночастиц. Эмульгирующая способность ANP показывает эффективность выше, чем при испытании полимерных, нано-полимерных и щелочно-полимерных составов. В пласте при заводнении ANP происходит реакция омыления, образуется поверхностно-активное вещество, которое оказывает влияние на заряд нефти (становится отрицательным) и усиливает электростатическое отталкивание наночастиц и капель нефти, препятствующее разрушению эмульсии. Заводнение ANP в рамках лабораторных испыта-

ний позволило повысить степень извлечения нефти на 21,05 % после единичной обработки образца керна при вытеснении тяжелой высоко кислотной нефти, для нефтей низко кислотных данная технология не показывает эффективности [57].

Заключение

В настоящее время наножидкости как метод повышения нефтеотдачи имеют значительный потенциал для широкого применения на месторождениях. Однако для эффективного применения данной технологии требуется строгий контроль параметров пласта и их совместимости с технологией.

Высокая температура коллектора при правильном подборе технологии может способствовать процессу увеличения нефтеотдачи при наножидкостном заводнении, в отличие от негативного влияния повышенной температуры на полимерные и поверхностно-активные составы.

Воздействие наночастицами на пласт может снизить влияние горной породы на реагенты, закачиваемые впоследствии или совместно с наночастицами, при достаточном диспергировании частиц.

Наиболее широко были исследованы наночастицы SiO_2 , которые обладают высокой стабильностью, мобильностью их характеристик и экологичностью относительно коллектора. Помимо SiO_2 эффективность вытеснения показывают наночастицы TiO_2 , Fe_2O_3 , CuO и NiO , однако при их использовании возникает вопрос безопасности для окружающей среды подобного вида воздействия.

Перед воздействием на пласт технологиями повышения нефтеотдачи требуется детальное изучение параметров пласта, насыщающих его флюидов и особенностей наножидкостей. В зависимости от размеров наночастиц и их дифференциации свойства наножидкости могут значительно отличаться. Параметры пласта: минерализация, поверхностный заряд, pH, изоэлектрическая точка – требуют строгого контроля в связи со значительным влиянием на агрегацию и адсорбцию наночастиц, стабильность наножидкости и попутных реагентов и эффективность воздействия в целом.

В настоящее время разработаны перспективные технологии с применением наночастиц для повышения нефтеотдачи, но их основной недостаток – это в большей степени зависимость эффективности заводнения от пластовых условий и высокая стоимость, так как большинство рассматриваемых частиц синтетические. В дальнейшем следует уделить внимание модернизации этих технологий в направлении расширения условий применимости составов в различных пластовых условиях и исследовать возможность использования природных наночастиц (наноцеллюлозу и наноглину).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ilyushin Y.V. Development of a process control system for the production of high-paraffin oil // *Energies*. – 2022. – № 15. – P. 6462. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15176462>
2. Evaluating the downstream development strategy of oil companies: the case of Rosneft / O. Marinina, A. Tsvetkova, Y. Vasilev, N. Komendantova, A. Parfenova // *Resources*. – 2022. – Vol. 11. – № 4. DOI: <https://doi.org/10.3390/resources11010004>
3. Дроздов А.Н., Горелкина Е.И. Разработка насосно-эжекторной системы для реализации водогазового воздействия на пласт с использованием попутного нефтяного газа из затрубных пространств добывающих скважин // *Записки Горного института*. – 2022. – № 254. – С. 191–201.
4. Shagiakhmetov A.M., Yushchenko S. Substantiation of in situ water shut-off technology in carbonate oil reservoirs // *Energies*. – 2022. – № 15. – P. 1–13.
5. Korolev M.I., Rogachev M.K., Tananykhin D.S. Regulation of filtration characteristics of highly watered terrigenous formations using complex chemical compositions based on surfactants // *Journal of Applied Engineering Science*. – 2020. – № 1. – P. 147–156.
6. Effect of wire design (profile) on sand retention parameters of wire-wrapped screens for conventional production: prepack sand retention testing results / D.S. Tananykhin, M.B. Grigoriev, E.V. Simonova, M.I. Korolev, I.A. Stetsyuk, L.A. Farrakhov // *Energies*. – 2023. – № 16. – P. 24–38.
7. Raupov I.R., Rogachev M.K., Sytnik A. Design of a polymer composition for the conformance control in heterogeneous reservoirs // *Energies*. – 2023. – № 15. – P. 1–18.
8. Алгоритм ретроспективного анализа по выявлению и локализации остаточных запасов разрабатываемого многопластового нефтяного месторождения / Р.Н. Бурханов, А.А. Лутфуллин, А.В. Максютин, И.Р. Раупов, И.В. Валиуллин, И.М. Фаррахов, М.В. Швыденко // *Георесурсы*. – 2022. – № 3. – С. 125–138.
9. Taber J.J. Technical screening guides for the enhanced recovery of oil // *SPE annual technical conference and exhibition*. Society of Petroleum Engineers. – San Francisco, 1983.
10. Negin C., Ali S., Xie Q. Most common surfactants employed in chemical enhanced oil recovery // *Petroleum*. – 2017. – № 3 (2). – P. 197–211.
11. Multi-criteria decision making approaches to select appropriate enhanced oil recovery techniques in petroleum industries / I.R. Raupov, W. Zhenzhen, Z. Shanyu, D. Xiaodong, W. Xuewu, Y. Lis // *Energy Reports*. – 2021. – № 7. – P. 2751–2758.
12. Olajire A.A. Review of ASP EOR (alkaline surfactant polymer enhanced oil recovery) technology in the petroleum industry: prospects and challenges // *Energy*. – 2014. – № 77. – P. 963–982.
13. Husein M. Preparation of nanoscale organosols and hydrosols via the phase transfer route // *Journal of Nanoparticle Research*. – 2017. – № 19 (12). – P. 1–18.
14. Recent advances and prospects in polymeric nanofluids application for enhanced oil recovery / A.O. Gbadamosi, R. Junin, M.A. Manan, N. Yekeen, A. Agi, J.O. Oseh // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. – 2018. – № 66. – P. 1–19.
15. Wasan D.T., Nikolov A.D. Spreading of nanofluids on solids // *Nature*. – 2003. – № 423. – P. 156–159.
16. NEOR mechanisms and performance analysis in carbonate/sandstone rock coated microfluidic systems / H. Bahraminejad, A.K. Manshad, S. Iglauer, A. Keshavarz // *Fuel*. – 2022. – № 309. – P. 122327. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122327>
17. Enhanced migration of surface-treated nanoparticles in sedimentary rocks / P.E. Rodriguez, M. Roberts, H. Yu, C. Huh, S.L. Bryant // *SPE annual technical conference and exhibition*. Society of Petroleum Engineers. – New Orleans, Louisiana, 2009.
18. Permeability reduction of soil filters due to physical clogging / L.N. Reddi, X. Ming, M.G. Hajra, I.M. Lee // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. – 2000. – № 126 (3). – P. 236–246.
19. Мардашов Д.В., Бондаренко А.В., Раупов И.Р. Методика расчета технологических параметров закачки в нефтяную скважину неньютоновских жидкостей при подземном ремонте // *Записки Горного института*. – 2022. – № 258. – С. 881–894.
20. Alnarabiji M.S., Husein M.M. Application of bare nanoparticle-based nanofluids in enhanced oil recovery // *Fuel*. – 2020. – № 267. – P. 117262. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117262>
21. Synthesis and surface functionalization of silica nanoparticles for nanomedicine / A. Liberman, N. Mendez, W.C. Trogler, A.C. Kummel // *Surface Science Reports*. – 2014. – № 69 (2). – P. 132–158.
22. Suleimanov B., Ismailov F., Veliyev E. Nanofluid for enhanced oil recovery // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2011. – № 78 (2). – P. 431–437.
23. Franco C.A., Cortes F.B. Formation damage in oil and gas reservoirs: nanotechnology applications for its inhibition/remediation. – New York: Nova Science Publishers, 2018.
24. Brant J., Lecoanet H., Wiesner M.R. Aggregation and deposition characteristics of fullerene nanoparticles in aqueous systems // *Journal of Nanoparticle Research*. – 2005. – № 7. – P. 545–553.
25. Factors governing distance of nanoparticle propagation in porous media / F. Caldelas, M. Murphy, C. Huh, S. Bryant // *SPE Production and Operations Symposium*. – Oklahoma City, Oklahoma, USA, 2011.
26. Oil recovery aspects of ZnO/SiO₂ nano-clay in carbonate reservoir / A.K. Manshad, J.A. Ali, O.M. Haghighi, S.M. Sajadi, A. Keshavarz // *Fuel*. – 2022. – № 307. – P. 121927. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121927>
27. Прогнозирование проницаемости призабойной зоны пласта при волновом воздействии / Ц. Чэнчжи, М.А. Гузев, В.В. Поплыгин, А.А. Куницких // *Записки Горного института*. – 2022. – № 258. – С. 998–1007.
28. Application of Janus nanoparticles in enhanced oil recovery processes: current status and future opportunities / Z. Tohidi, A. Teimouri, A. Jafari, R. Gharibshahi, M.R. Omidkhah // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2022. – № 208 (D). – P. 109602. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109602>
29. Aggregation and charging of colloidal silica particles: effect of particle size / M. Kobayashi, F. Juillerat, P. Galletto, P. Bowen, M. Borkovec // *Langmuir*. – 2005. – № 21 (13). – P. 5761–5769.
30. Nanoparticle-stabilized emulsions for applications in enhanced oil recovery / T. Zhang, D. Davidson, S.L. Bryant, C. Huh // *SPE improved oil recovery symposium*. Society of Petroleum Engineers. – Oklahoma, USA, 2010.

31. Mechanisms of TiO₂ nanoparticle transport in porous media: role of solution chemistry, nanoparticle concentration, and flowrate / I. Chowdhury, Y. Hong, R.J. Honda, S.L. Walker // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2011. – № 360 (2). – P. 548–555.
32. Experimental and field applications of nanotechnology for enhanced oil recovery purposes: a review / S. Davoodi, M. Al-Shargabi, D.A. Wood, V.S. Rukavishnikov, K.M. Minaev // *Fuel*. – 2022. – № 324 (B). – P. 124669. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124669>
33. Investigation of nanoparticle adsorption during transport in porous media / T. Zhang, M.J. Murphy, H. Yu, H.G. Bagaria, K.Y. Yoon, B.M. Nielson // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. – 2013. – № 20 (04). – P. 667–677.
34. Barclay S., Worden R. Effects of reservoir wettability on quartz cementation in oil fields // *Quartz Cementation in Sandstones: Special Publication 29 of the IAS*. – 2009. – № 14. – P. 103–117.
35. Improved mobility of magnetite nanoparticles at high salinity with polymers and surfactants / A.A. Kmetz, M.D. Becker, B.A. Lyon, E. Foster, Z. Xue, K.P. Johnston // *Energy Fuels*. – 2016. – № 30 (3). – P. 1915–1926.
36. Rodríguez K., Araujo M. Temperature and pressure effects on zeta potential values of reservoir minerals // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2006. – № 300 (2). – P. 788–794.
37. Binks B.P. Particles as surfactants – similarities and differences // *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. – 2002. – № 7 (1). – P. 21–41.
38. Corredor L.M., Husein M.M., Maini B.B. A review of polymer nanohybrids for oil recovery // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2019. – № 272. – P. 102018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2019.102018>
39. Кочнев А.А., Козырев Н.Д., Кривошеков С.Н. Оценка влияния неопределенности параметров трещин на динамику технологических показателей разработки турнейско-фаменской залежи нефти месторождения им. Сухарева // *Записки Горного института*. – 2022. – № 258. – С. 1026–1037.
40. Park Y.K., Yoo S.H., Park S. Assembly of highly ordered nanoparticle monolayers at a water/hexane interface // *Langmuir*. – 2007. – № 23 (21). – P. 10505–10510.
41. Directing single-walled carbon nanotubes to self-assemble at water/oil interfaces and facilitate electron transfer / Y. Zhang, Y. Shen, D. Kuehner, S. Wu, Z. Su, S. Ye // *Chemical Communications*. – 2008. – № 36. – P. 4273–4275.
42. Experimental study on electromagnetic-assisted ZnO nanofluid flooding for enhanced oil recovery (EOR) / M. Adil, K. Lee, H.M. Zaid, N.R.A. Latiff, M.S. Alnarabiji // *PLoS ONE*. – 2018. – № 13 (2). – P. 0193518. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0193518>
43. Magnetorheological fluids / G. Bossis, S. Lacis, A. Meunier, O. Volkova // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2002. – № 252. – P. 224–228.
44. The effect of nanoparticles on wettability alteration for enhanced oil recovery: micromodel experimental studies and CFD simulation / P. Rostami, M. Sharifi, B. Aminshahidy, J. Fahimpour // *Petroleum Science*. – 2019. – № 16. – P. 859–873.
45. A simple calculation of structural and depletion forces for fluids/suspensions confined in a film / A. Trokhymchuk, D. Henderson, A. Nikolov, D.T. Wasan // *Langmuir*. – 2001. – № 17 (16). – P. 4940–4947.
46. Monitoring wettability alteration by silica nanoparticles during water flooding to heavy oils in five-spot systems: a pore-level investigation / A. Maghzi, S. Mohammadi, M.H. Ghazanfari, R. Kharrat, M. Masihi // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2017. – № 40. – P. 168–176.
47. Nanofluids for enhanced oil recovery processes: wettability alteration using zirconium oxide / L. Nwidee, S. Al-Anssari, A. Barifcani, M. Sarmadivaleh, S. Iglauer // *Offshore Technology Conference Asia*. – Perth Western Australia, 2016.
48. Arab D., Kantzas A., Bryant S.L. Nanoparticle stabilized oil in water emulsions: a critical review // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2018. – № 163. – P. 217–242.
49. Wang X., Alvarado V. Kaolinite and silica dispersions in low-salinity environments: Impact on a water-in-crude oil emulsion stability // *Energies*. – 2011. – № 4 (10). – P. 1763–1778.
50. Recent advances of characterization techniques for the formation, physical properties and stability of Pickering emulsion / L.E. Low, S.P. Siva, Y.K. Ho, E.S. Chan, B.T. Tey // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2020. – № 277. – P. 102117. DOI: [10.1016/j.cis.2020.102117](https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102117)
51. Inoue K. Functional dendrimers, hyperbranched and star polymers // *Progress in Polymer Science*. – 2000. – № 25 (4). – P. 453–571.
52. Экспериментальное исследование влияния добавки наночастиц оксида кремния на характеристики смачиваемости нефтью горной породы / А.В. Минаков, М.И. Пряхников, Я.Н. Сулемана, В.Д. Мешкова // *Письма в Журнал технической физики*. – 2020. – № 46 (24). – С. 30–32.
53. Применение наносuspension для увеличения нефтеотдачи / А.В. Минаков, В.Я. Рудяк, М.И. Пряхников, Д.В. Гузей, В.А. Жигарев, Д.В. Платонов, Е.И. Михиенкова // *Нефть. Газ. Новации*. – 2021. – № 3. – С. 17–20.
54. Применение микро- и нанофлюидных технологий в задачах увеличения нефтеотдачи / А.В. Минаков, М.И. Пряхников, А.И. Пряхников, А.С. Якимов, И.А. Денисов, А.С. Лобасов, И.В. Немцев, В.Я. Рудяк // *Нефть. Газ. Новации*. – 2022. – № 2. – С. 68–73.
55. Liu Y., Lai N. Synthesis and properties of branched polymer based on modified chitosan for enhanced oil recovery // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – № 267 (2). – P. 022038. DOI: [10.1088/1755-1315/267/2/022038](https://doi.org/10.1088/1755-1315/267/2/022038)
56. Star-like hydrophobically associative polyacrylamide for enhanced oil recovery: comprehensive properties in harsh reservoir conditions / R. Liu, W. Pu, J.J. Sheng, D. Du // *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. – 2017. – № 80. – P. 639–649.
57. A study of alkali-silica nanoparticle-polymer (ANP) flooding for enhancing heavy oil recovery / Y. Gong, W. Huang, J. Zou, X. Zhong, L. Wang, D. Kang, Z. Zhang // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2022. – № 213. – P. 110465. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110465>
58. Development of the automated temperature control system of the main gas pipeline / V. Fetisov, Y.V. Ilyushin, G.G. Vasiliev et al. // *Scientific Reports*. – 2023. – № 13. – P. 3092. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29570-4>

59. Technical and economic assessment of energy efficiency of electrification of hydrocarbon production facilities in underdeveloped areas / O. Marinina, A. Nechitailo, G. Stroykov, A. Tsvetkova, E. Reshneva, L. Turovskaya // *Sustainability*. – 2023. – № 15. – P. 9614. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15129614>
60. Ilkhani M., Bayat A.E., Harati S. Applicability of methane foam stabilized via Nanoparticles for enhanced oil recovery from carbonate porous media at various temperatures // *Journal of Molecular Liquids*. – 2022. – № 367 (B). – P. 120576. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.molliq.2022.120576>

Информация об авторах

Елизавета Сергеевна Андреева, магистрант кафедры разработки и эксплуатации углеводородных месторождений и кафедры отраслевой экономики Санкт-Петербургского горного университета, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Василеостровский район, 21-я линия, 2. andreeva.eliz4@yandex.ru. <https://orcid.org/0009-0006-2781-3863>

Оксана Анатольевна Маринина, кандидат экономических наук, доцент, заведующая кафедрой отраслевой экономики Санкт-Петербургского горного университета, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Василеостровский район, 21-я линия, 2. Marinina_OA@pers.spmi.ru. <https://orcid.org/0000-0002-7950-197X>

Людмила Григорьевна Туровская, кандидат технических наук, доцент кафедры отраслевой экономики Санкт-Петербургского горного университета, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Василеостровский район, 21-я линия, 2. turovskaya.ludmila@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0002-0525-0792>

Поступила в редакцию: 26.09.2023

Поступила после рецензирования: 07.11.2023

Принята к публикации: 31.05.2024

REFERENCES

1. Ilyushin Y.V. Development of a process control system for the production of high-paraffin oil. *Energies*, 2022, no. 15, pp. 6462. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15176462>
2. Marinina O., Tsvetkova A., Vasilev Y., Komendantova N., Parfenova A. Evaluating the downstream development strategy of oil companies: the case of Rosneft. *Resources*, 2022, vol. 11, no. 4. DOI: <https://doi.org/10.3390/resources11010004>
3. Drozdov A.N., Gorelkina E.I. Development of a pumping-ejector system for the implementation of a water-gas effect on the reservoir using associated petroleum gas from the annular spaces of producing wells. *Notes of the Mining Institute*, 2022, no. 254, pp. 191–201. (In Russ.)
4. Shagiakhmetov A.M., Yushchenko S. Substantiation of in situ water shut-off technology in carbonate oil reservoirs. *Energies*, 2022, no. 15, pp. 1–13.
5. Korolev M.I., Rogachev M.K., Tananykhin D.S. Regulation of filtration characteristics of highly watered terrigenous formations using complex chemical compositions based on surfactants. *Journal of Applied Engineering Science*, 2020, no. 1, pp. 147–156.
6. Tananykhin D.S., Grigoriev M.B., Simonova E.V., Korolev M.I., Stetsyuk I.A., Farrakhov L.A. Effect of wire design (profile) on sand retention parameters of wire-wrapped screens for conventional production: prepack sand retention testing results. *Energies*, 2023, no. 16, pp. 24–38.
7. Raupov I.R., Rogachev M.K., Sytnik A. Design of a Polymer Composition for the Conformance Control in Heterogeneous Reservoirs. *Energies*, 2023, no. 515, pp. 1–18.
8. Burkhanov R.N., Lutfullin A.A., Maksyutin A.V., Raupov I.R., Valiullin I.V., Farrakhov I.M., Shvydenko M.V. Algorithm of retrospective analysis on identification and localization of residual reserves of the developed multi-layer oil field. *Geo resources*, 2022, no. 3, pp. 125–138. (In Russ.)
9. Taber J.J. Technical screening guides for the enhanced recovery of oil. *SPE annual technical conference and exhibition. Society of Petroleum Engineers*. San Francisco, 1983.
10. Negin C., Ali S., Xie Q. Most common surfactants employed in chemical enhanced oil recovery. *Petroleum*, 2017, no. 3 (2), pp. 197–211.
11. Raupov I.R., Zhenzhen W., Shanyu Z., Xiaodong D., Xuewu W., Lis Y. Multi-criteria decision making approaches to select appropriate enhanced oil recovery techniques in petroleum industries. *Energy Reports*, 2021, no. 7, pp. 2751–2758.
12. Olajire A.A. Review of ASP EOR (alkaline surfactant polymer enhanced oil recovery) technology in the petroleum industry: prospects and challenges. *Energy*, 2014, no. 77, pp. 963–982.
13. Husein M. Preparation of nanoscale organosols and hydrosols via the phase transfer route. *Journal of Nanoparticle Research*, 2017, no. 19 (12), pp. 1–18.
14. Gbadamosi A.O., Junin R., Manan M.A., Yekeen N., Agi A., Oseh J.O. Recent advances and prospects in polymeric nanofluids application for enhanced oil recovery. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2018, no. 66, pp. 1–19.
15. Wasan D.T., Nikolov A.D. Spreading of nanofluids on solids. *Nature*, 2003, no. 423, pp. 156–159.
16. Bahraminejad H., Manshad A.K., Iglauer S., Keshavarz A. NEOR mechanisms and performance analysis in carbonate/sandstone rock coated microfluidic systems. *Fuel*, 2022, no. 309, pp. 122327. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122327>
17. Rodriguez P.E., Roberts M., Yu H., Huh C., Bryant S.L. Enhanced migration of surface-treated nanoparticles in sedimentary rocks. *SPE annual technical conference and exhibition. Society of Petroleum Engineers*. New Orleans, Louisiana, 2009.
18. Reddi L.N., Ming X., Hajra M.G., Lee I.M. Permeability reduction of soil filters due to physical clogging. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2000, no. 126 (3), pp. 236–246.

19. Mordashov D.V., Bondarenko A.V., Raupov I.R. Method of calculation of technological parameters of injection of non-Newtonian liquids into an oil well during underground repair. *Notes of the Mining Institute*, 2022, no. 258, pp. 881–894. (In Russ.)
20. Alnarabiji M.S., Husein M.M. Application of bare nanoparticle-based nanofluids in enhanced oil recovery. *Fuel*, 2020, no. 267, pp. 117262. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117262>
21. Liberman A., Mendez N., Troglor W.C., Kummel A.C. Synthesis and surface functionalization of silica nanoparticles for nanomedicine. *Surface Science Reports*, 2014, no. 69 (2), pp. 132–158.
22. Suleimanov B., Ismailov F., Veliyev E. Nanofluid for enhanced oil recovery. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2011, no. 78 (2), pp. 431–437.
23. Franco C.A., Cortes F.B. *Formation damage in oil and gas reservoirs: nanotechnology applications for its inhibition/remediation*. New York, Nova Science Publishers, 2018. 345 p.
24. Brant J., Lecoanet H., Wiesner M.R. Aggregation and deposition characteristics of fullerene nanoparticles in aqueous systems. *Journal of Nanoparticle Research*, 2005, no. 7, pp. 545–553.
25. Caldelas F., Murphy M., Huh C., Bryant S. Factors governing distance of nanoparticle propagation in porous media. *SPE Production and Operations Symposium*. Oklahoma City, Oklahoma, USA, 2011.
26. Manshad A.K., Ali J.A., Haghighi O.M., Sajadi S.M., Keshavarz A. Oil recovery aspects of ZnO/SiO₂ nano-clay in carbonate reservoir. *Fuel*, 2022, no. 307, pp. 121927. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121927>
27. Chengzhi Ts., Guzev M.A., Poplygin V.V., Kunitsky A.A. Forecasting the permeability of the bottom-hole zone of the formation under wave action. *Notes of the Mining Institute*, 2022, no. 258, pp. 998–1007. (In Russ.)
28. Tohidi Z., Teimouri A., Jafari A., Gharibshahi R., Omidkhah M.R. Application of Janus nanoparticles in enhanced oil recovery processes: current status and future opportunities. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, no. 208 (D), pp. 109602. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109602>
29. Kobayashi M., Juillerat F., Galletto P., Bowen P., Borkovec M. Aggregation and charging of colloidal silica particles: effect of particle size. *Langmuir*, 2005, no. 21 (13), pp. 5761–5769.
30. Zhang T., Davidson D., Bryant S.L., Huh C. Nanoparticle-stabilized emulsions for applications in enhanced oil recovery. *SPE improved oil recovery symposium*. Society of Petroleum Engineers. Oklahoma, USA, 2010.
31. Chowdhury I., Hong Y., Honda R.J., Walker S.L. Mechanisms of TiO₂ nanoparticle transport in porous media: role of solution chemistry, nanoparticle concentration, and flowrate. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2011, no. 360 (2), pp. 548–555.
32. Davoodi S., Al-Shargabi M., Wood D.A., Rukavishnikov V.S., Minaev K.M. Experimental and field applications of nanotechnology for enhanced oil recovery purposes: a review. *Fuel*, 2022, no. 324 (B), pp. 124669. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124669>
33. Zhang T., Murphy M.J., Yu H., Bagaria H.G., Yoon K.Y., Nielson B.M. Investigation of nanoparticle adsorption during transport in porous media. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 2013, no. 20 (04), pp. 667–677.
34. Barclay S., Worden R. Effects of reservoir wettability on quartz cementation in oil fields. *Quartz Cementation in Sandstones: Special Publication 29 of the IAS*, 2009, no. 14, pp. 103–117.
35. Kmetz A.A., Becker M.D., Lyon B.A., Foster E., Xue Z., Johnston K.P. Improved mobility of magnetite nanoparticles at high salinity with polymers and surfactants. *Energy Fuels*, 2016, no. 30 (3), pp. 1915–1926.
36. Rodríguez K., Araujo M. Temperature and pressure effects on zeta potential values of reservoir minerals. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2006, no. 300 (2), pp. 788–794.
37. Binks B.P. Particles as surfactants – similarities and differences. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2002, no. 7 (1), pp. 21–41.
38. Corredor L.M., Husein M.M., Maini B.B. A review of polymer nanohybrids for oil recovery. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2019, no. 272, pp. 102018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2019.102018>
39. Kochnev A.A., Kozyrev N.D., Krivoshchekov S.N. Assessment of the influence of uncertainty of crack parameters on the dynamics of technological indicators of the development of the Tournaisko-Famenskaya oil deposit of the field. Sukhareva. *Notes of the Mining Institute*, 2022, no. 258, pp. 1026–1037. (In Russ.)
40. Park Y.K., Yoo S.H., Park S. Assembly of highly ordered nanoparticle monolayers at a water/hexane interface. *Langmuir*, 2007, no. 23 (21), pp. 10505–10510.
41. Zhang Y., Shen Y., Kuehner D., Wu S., Su Z., Ye S. Directing single-walled carbon nanotubes to self-assemble at water/oil interfaces and facilitate electron transfer. *Chemical Communications*, 2008, no. 36, pp. 4273–4275.
42. Adil M., Lee K., Zaid H.M., Latiff N.R.A., Alnarabiji M.S. Experimental study on electromagnetic-assisted ZnO nanofluid flooding for enhanced oil recovery (EOR). *PLoS ONE*, 2018, no. 13 (2), pp. 193518. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0193518>
43. Bossis G., Lacis S., Meunier A., Volkova O. Magnetorheological fluids. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2002, no. 252, pp. 224–228.
44. Rostami P., Sharifi M., Aminshahidy B., Fahimpour J. The effect of nanoparticles on wettability alteration for enhanced oil recovery: micromodel experimental studies and CFD simulation. *Petroleum Science*, 2019, no. 16, pp. 859–873.
45. Trokhymchuk A., Henderson D., Nikolov A., Wasan D.T. A simple calculation of structural and depletion forces for fluids/suspensions confined in a film. *Langmuir*, 2001, no. 17 (16), pp. 4940–4947.
46. Maghzi A., Mohammadi S., Ghazanfari M.H., Kharrat R., Masihi M. Monitoring wettability alteration by silica nanoparticles during water flooding to heavy oils in five-spot systems: a pore-level investigation. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, no. 40, pp. 168–176.
47. Nwidae L., Al-Anssari S., Barifcani A., Sarmadivaleh M., Iglaier S. Nanofluids for enhanced oil recovery processes: wettability alteration using zirconium oxide. *Offshore Technology Conference Asia*. Perth Western Australia, 2016.
48. Arab D., Kantzas A., Bryant S.L. Nanoparticle stabilized oil in water emulsions: a critical review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, no. 163, pp. 217–242.

49. Wang X., Alvarado V. Kaolinite and silica dispersions in low-salinity environments: Impact on a water-in-crude oil emulsion stability. *Energies*, 2011, no. 4 (10), pp. 1763–1778.
50. Low L.E., Siva S.P., Ho Y.K., Chan E.S., Tey B.T. Recent advances of characterization techniques for the formation, physical properties and stability of Pickering emulsion. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2020, no. 277, pp. 102117. DOI: 10.1016/j.cis.2020.102117
51. Inoue K. Functional dendrimers, hyperbranched and star polymers. *Progress in Polymer Science*, 2000, no. 25 (4), pp. 453–571.
52. Minakov A.V., Pryazhnikov M.I., Suleimana Ya.N., Meshkova V.D. Experimental study of the effect of the addition of silicon oxide nanoparticles on the characteristics of oil wettability of rock. *Letters to the Journal of Technical Physics*, 2020, no. 46 (24), pp. 30–32. (In Russ.)
53. Minakov A.V., Rudyak V.Ya., Pryazhnikov M.I., Guzey D.V., Zhigarev V.A., Platonov D.V., Mikheenkova E.I. Application of nanosuspensions to increase oil recovery. *Oil. Gas. Innovations*, 2021, no. 3, pp. 17–20. (In Russ.)
54. Minakov A.V., Pryazhnikov M.I., Pryazhnikov A.I., Yakimov A.S., Denisov I.A., Lobasov A.S., Nemtsev I.V. Rudyak V.Ya. Application of micro- and nanofluidic technologies in the tasks of increasing oil recovery. *Oil. Gas. Innovations*, 2022, no. 2, pp. 68–73. (In Russ.)
55. Liu Y., Lai N. Synthesis and Properties of Branched Polymer Based on Modified Chitosan for Enhanced Oil Recovery. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, no. 267 (2), pp. 22038. DOI 10.1088/1755-1315/267/2/022038
56. Liu R., Pu W., Sheng J.J., Du D. Star-like hydrophobically associative polyacrylamide for enhanced oil recovery: comprehensive properties in harsh reservoir conditions. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2017, no. 80, pp. 639–649.
57. Gong Y., Huang W., Zou J., Zhong X., Wang L., Kang D., Zhang Z. A study of alkali-silica nanoparticle-polymer (ANP) flooding for enhancing heavy oil recovery. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, no. 213, pp. 110465. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110465>
58. Fetisov V., Ilyushin Y.V., Vasiliev G.G. Development of the automated temperature control system of the main gas pipeline. *Scientific Reports*, 2023, no. 13, pp. 3092. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29570-4>
59. Marinina O., Nechitailo A., Stroykov G., Tsvetkova A., Reshneva E., Turovskaya L. Technical and economic assessment of energy efficiency of electrification of hydrocarbon production facilities in underdeveloped areas. *Sustainability*, 2023, no. 15, pp. 9614. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15129614>
60. Ilkhani M., Bayat A.E., Harati S. Applicability of methane foam stabilized via Nanoparticles for enhanced oil recovery from carbonate porous media at various temperatures. *Journal of Molecular Liquids*, 2022, no. 367(B), pp. 120576. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.molliq.2022.120576>

Information about the authors

Elizaveta S. Andreeva, Master's Student, St. Petersburg Mining University, 2, 21st line, Vasileostrovsky district, St. Petersburg, 199106, Russian Federation. andreeva.eliz4@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0006-2781-3863>

Oksana A. Marinina, Cand. Sc., Associate Professor, Head of the Industrial Economics Department, St. Petersburg Mining University, 2, 21st line, Vasileostrovsky district, St. Petersburg, 199106, Russian Federation. Marinina_OA@pers.spmi.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7950-197X>

Lyudmila G. Turovskaya, Cand. Sc., Associate Professor, St. Petersburg Mining University, 2, 21st line, Vasileostrovsky district, St. Petersburg, 199106, Russian Federation. turovsckaya.ludmila@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0525-0792>

Received: 26.09.2023

Revised: 07.11.2023

Accepted: 31.05.2024

УДК 532.685

DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4422

Шифр специальности ВАК: 1.6.9

Влияние газа, возникающего при разложении газового гидрата, на фильтрационные свойства донных отложений арктического шельфа. Лабораторное моделирование

Н.А. Барышников[✉], П.Е. Зенченко, С.Б. Турунтаев

*Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук,
Россия, г. Москва*

[✉]baryshnikov.na@idg.ras.ru

Аннотация. *Актуальность* данного исследования обусловлена необходимостью изучения механизма фильтрации газа (метана), возникающего в процессе разложения газогидратных образований, в толще донных отложений. Данный процесс проявляется в массивных выбросах пузырькового метана на обширных мелководных участках арктического шельфа России и потенциально может привести к изменению баланса атмосферного метана – важнейшего парникового газа. *Целью* настоящей работы было в рамках задачи о транспорте газа в донных отложениях количественно исследовать влияние свободного и связанного газа в порах на нелинейность фильтрационных течений. *Методы.* Исследования проводились с использованием модельных образцов с фильтрационными свойствами, близкими к свойствам донных пород Восточно-Сибирского Арктического шельфа. В ходе испытаний в насыщенный модельный образец закачивалось определённое количество газа, после чего производилось измерение его эффективной проницаемости в процессе медленного спада градиента порового давления. Полученная кривая интерпретировалась в рамках модели порогового градиента. *Результаты.* Были получены кривые зависимости величины порогового градиента от газонасыщенности для нескольких образцов. Установлено, что пороговый градиент линейно растёт с увеличением доли газа в поровом пространстве. Уже при доле газа порядка 0,02 эта величина в опытах достигает 0,01 МПа/м, что соответствует гидростатическому градиенту давления в воде. Это может говорить о том, что области среды даже с небольшой газонасыщенностью могут быть непроницаемыми для конвективных потоков флюида. Эту возможность необходимо учитывать при создании моделей транспорта пузырькового газа через толщу пород донных отложений. Кроме того, существование газонасыщенных зон с пороговыми градиентами может существенно повлиять на вид вертикального профиля порового давления и привести к переоценке глубины зоны стабильности газового гидрата.

Ключевые слова: проницаемость, пороговый градиент, нелинейность течения, разложение газового гидрата, арктический шельф

Благодарности: Экспериментальная методика для исследования нелинейных фильтрационных свойств разработана в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 122032900167-1). Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-67-00025).

Для цитирования: Барышников Н.А., Зенченко П.Е., Турунтаев С.Б. Влияние газа, возникающего при разложении газового гидрата, на фильтрационные свойства донных отложений арктического шельфа. Лабораторное моделирование // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 6. – С. 203–213. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4422

UDC 532.685

DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4422

Impact of gas arising from gas hydrate decomposition on the effective permeability of bottom sediments of the Arctic shelf: a laboratory simulation

N.A. Baryshnikov✉, P.E. Zenchenko, S.B. Turuntaev

*Academician M.A. Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation*

✉baryshnikov.na@idg.ras.ru

Abstract. Relevance. The necessity to investigate the mechanism of gas (methane) flow occurring during decomposition of gas hydrate formations within the layers of bottom sediments. This process is evident through substantial releases of methane bubbles in extensive shallow regions of the Russian Arctic shelf and has the potential to alter the equilibrium of atmospheric methane, a critical greenhouse gas. **Aim.** To quantitatively investigate, within the context of gas transport in bottom sediments, the impact of free and bound gas within the pores on the nonlinearity of filtration flows. **Methods.** The model samples with filtration properties similar to those of the bottom rocks of the East Siberian Arctic shelf. During the experiments, a specific amount of gas was injected into the saturated model sample, followed by the measurement of its effective permeability during a slow decrease in pore pressure gradient. The obtained curve was interpreted within the framework of the threshold gradient model. **Results.** The experiments yielded curves showing the dependency of the threshold gradient magnitude on gas saturation for several samples. It was found that the threshold gradient linearly increases with the growth in gas fraction within the pore space. Already at a gas fraction of approximately 0.02, this value in the experiments reached 0.01 MPa/m, corresponding to the hydrostatic pressure gradient in water. This suggests that even areas with relatively low gas saturation may be impermeable to convective fluid flow. This possibility should be considered when creating models for bubble gas transporting through the rock layers of bottom sediments. Furthermore, the existence of gas-saturated zones with threshold gradients can significantly impact the vertical profile of pore pressure and lead to a reassessment of the depth of gas hydrate stability zones.

Keywords: permeability, threshold pressure gradient, flow nonlinearity, gas hydrate decomposition, Arctic shelf

Acknowledgements: The experimental methodology for studying nonlinear filtration properties was developed within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic no. 122032900167-1). The study was carried out with the support of a grant from the Russian Science Foundation (project No. 22-67-00025).

For citation: Baryshnikov N.A., Zenchenko P.E., Turuntaev S.B. Impact of gas arising from gas hydrate decomposition on the effective permeability of bottom sediments of the Arctic shelf: a laboratory simulation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 6, pp. 203–213. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4422

Введение

Объектом исследования данной работы является перенос газа, возникающего в процессе разложения газового гидрата в донных отложениях Восточно-Сибирского Арктического шельфа, от места его накопления до поверхности дна. Согласно оценкам [1], донные отложения 57 % Восточно-Сибирского Арктического шельфа могут содержать залежи метанового газогидрата, существующие в пределах так называемой зоны стабильности [2, 3]. Границы этой зоны определяются исходя из термобарических условий, обеспечивающих стабильность гидрата. Так, при температурах в районе 0 градусов Цельсия газовые гидраты стабильны при давлениях свыше $P \geq 2,5$ МПа. В условиях донных отложений

континентального шельфа это давление должно обеспечиваться суммарным гидростатическим и литостатическим давлением расположенных выше пород и толщи воды. Характерные глубины залегания гидратов относительно поверхности морского дна, в зависимости от локальных термобарических условий, могут варьироваться в пределах от 0 до 100 и более метров. В результате изменений температурного режима газовые гидраты могут терять стабильность, частично переходя в форму свободного газа, который затем переносится на поверхность. Механизм переноса внутри осадочных пород при этом до сих пор остаётся мало изучен. В зависимости от P/T условий газ, выделяющийся в процессе разложения гидрата, может существовать как

в свободной, так и в растворённой форме. Пузырьки газа, поднимающиеся от поверхности дна, позволяют предположить, что под его поверхностью существует область выделения и накопления газа в свободной форме [4, 5], из которой происходит дальнейший перенос в сторону поверхности. Сам механизм переноса освещён в литературе достаточно мало [6]. Как правило, рассматриваются диффузионный, адвективный механизмы [7–11], фильтрационные потоки свободного газа под действием избыточного давления (например, [11]) либо в виде отдельных микропузырьков [5, 12].

По имеющимся данным [13, 14], проницаемость гидратонасыщенных пород Восточно-Сибирского Арктического шельфа составляет в среднем порядка $k=10$ миллиарды [13, 14]. Характерный размер поровых каналов для среды с подобной проницаемостью имеет порядок $r \approx \sqrt{k/m} \approx 0,14$ мкм, где $m \approx 0,5$ – пористость. Величина капиллярного давления для пузырька газа с таким размером может быть оценена по формуле Лапласа:

$$P_c \approx \frac{2\alpha}{r} \approx 0,6 \text{ МПа},$$

где $\alpha \approx 0,04$ Н/м – коэффициент поверхностного натяжения. Для проталкивания пузырька через пористую среду его размер должен меняться от максимального до минимального характерного размера пор, соответственно перепад на нём должен составлять величину, близкую к капиллярному давлению [15]. Градиент порового давления жидкости, действующий на каплю в условиях гидростатического равновесия, составляет $|gradP| = \rho_w g \approx 0,1$ МПа/м, где ρ_w – плотность воды; g – ускорение свободного падения. Таким образом, для того, чтобы свободный газ мог подниматься в рассматриваемой среде в качестве изолированного объёма, он должен иметь «длину» порядка 60 м, что сопоставимо с размером всей рассматриваемой системы. Это позволяет строить дальнейшие рассуждения в предположении связности рассматриваемого течения и применять соответствующие соотношения из теории фильтрации.

В условиях гидростатического поля давления существует минимальная скорость фильтрации газа, которая определяется эффективной проницаемостью среды распространения и силой Архимеда (аналогично тому, что пузырь газа в свободной воде не может «всплывать» медленнее своей предельной скорости). Эта скорость может быть грубо оценена согласно закону Дарси из соотношения:

$$u_r \approx \frac{k_0 k(s_r)}{\eta_r} \rho_w g,$$

где k_0 – абсолютная проницаемость среды; $k(s_r)$ – относительная фазовая проницаемость по газу с

насыщенностью s_r ; η_r – вязкость газа. Считая $k_0 \approx 10$ мД, $k(s_r) \sim s_r^2 \approx 0,25$, $\eta_r \approx 10^{-2}$ сП, можно получить оценку величины скорости фильтрации $u_r \approx 2,5 \times 10^{-6}$ м/с. Это эквивалентно массовому потоку газа порядка 0,15 кг с квадратного метра в сутки (для метана с плотностью $\approx 0,72$ кг/м³). Характерные потоки газа, регистрируемые в местах разложения метановых газогидратов Восточно-Сибирского Арктического шельфа, на несколько порядков меньше – 1–100 мг с квадратного метра в сутки [2, 16]. Это позволяет предположить, что установившийся транспорт газа должен осуществляться по отдельным каналам, соединяющим область накопления газа и поверхность дна (рис. 1, а), причём доля среды, занятая газовыми каналами, должна быть невелика – порядка 10^{-3} . Устойчивость каналов должна определяться соотношением скорости накопления свободного газа и минимальной скоростью фильтрации u_r в самом канале. Если приток газа в результате разложения гидрата достаточно мал, газовые каналы могут существовать только ограниченное время, определяемое оттоком газа через канал. После прекращения поступления газа под действием капиллярных сил на месте газового канала может образовываться область среды с остаточной газонасыщенностью, содержащая изолированные (то есть потерявшие связь с источником) объёмы жидкой и газовых фаз (рис. 1, б). Существуют свидетельства, что даже небольшая доля газа может существенно повлиять на фильтрационные свойства среды [17]. На определённом масштабе рассмотрения, учитывая приведённые выше оценки, область с изолированным газом может считаться непроницаемой при градиентах давления ниже величины, определяемой капиллярным эффектом. Это может существенным образом повлиять на последующий транспорт газа, так как при увеличении давления в области разложения гидрата должны будут возникнуть новые пути транспорта, развивающиеся вне области с изменёнными фильтрационными свойствами (рис. 1, в).

Данные предположения косвенно подтверждаются результатами полевых исследований. В работе [18] приводятся результаты работы экспедиции, организованной для изучения предполагаемой зоны разгрузки метана в проливе Дмитрия Лаптева. В ходе нескольких последовательных экспедиций была проведена высокоточная сейсморазведка морского дна, а также выборочное бурение в области с повышенной концентрацией растворённого метана в морской воде. В результате были получены разрезы, содержащие области низкоамплитудных аномалий, характерные для пород с существенным содержанием свободного газа в порах. За год, прошедший между наблюдениями, верхняя граница

некоторых областей продвинулась вверх, из чего была сделана оценка скорости её движения – 7 м/год. Другие области при этом оставались неподвижны. Результаты бурения показали, что содержание метана внутри области аномалии повышено на два порядка и составляет порядка 4×10^3 мкМ/л. В оригинальной работе был сделан вывод, что данные области представляют собой «фронт» газа, поднимающегося из толщи пород. Можно предположить, что обнаруженные подвижные области с содержанием свободного газа представляют собой места формирования газовых каналов. При этом неподвижные – изолированные области, содержащие газ, «непроницаемые» при гидростатических градиентах. Концентрация газа в образцах породы примерно в 1,6 раз превышает величину предельной концентрации растворённого метана при рассматриваемых термобарических условиях ($2,48 \times 10^3$ мкМ/л). Из этого можно сделать оценку доли содержания свободного газа в поровом объёме – порядка 0,035.

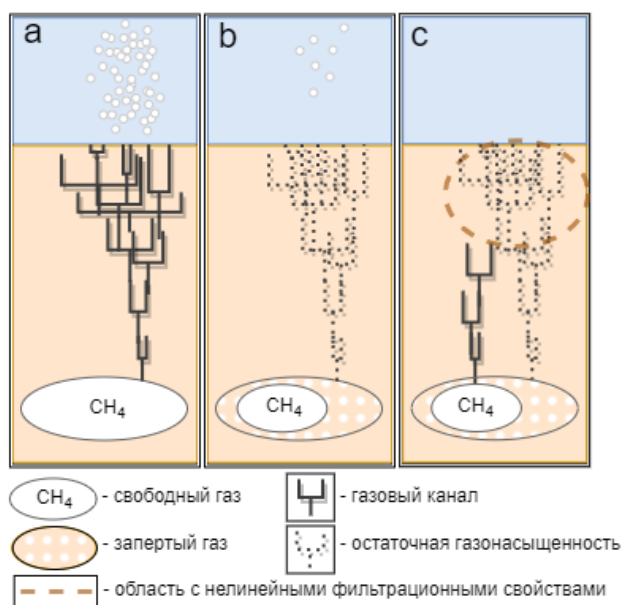


Рис. 1. Принципиальная схема транспорта свободного газа из области его накопления на поверхность; а) газ поступает на поверхность через проводящий канал; б) транспорт газа прерывается в результате истощения источника, на месте канала образуется область среды с остаточной газонасыщенностью и изменёнными фильтрационными свойствами; в) образование нового канала в среде с нелинейными фильтрационными свойствами

Fig. 1. Schematic diagram illustrating free gas transporting from the area of its accumulation to the surface: (a) gas enters the surface through a conductive channel; (b) gas transport is halted due to source depletion, resulting in an area of the medium with residual gas saturation and altered filtration properties forming at the channel location; (c) new channel formation in a medium with nonlinear filtration properties

Фильтрационные свойств среды, содержащей изолированный газ, могут быть описаны при помощи нелинейных моделей [19], в частности, модели порогового градиента (Threshold Pressure Gradient, TPG) [20], в которой зависимость скорости фильтрации u от градиента порового давления $gradP$ считается линейной при градиентах давления выше определённого порогового значения и нулевой при градиентах ниже порогового:

$$u = \begin{cases} 0, |gradP| \leq G; \\ \frac{k_0}{\eta} (|gradP| - G), |gradP| > G, \end{cases}$$

где u – скорость фильтрации; k_0 – абсолютная проницаемость среды; η – динамическая вязкость; G – пороговый градиент. При таком подходе зависимость эффективной проницаемости k от градиента порового давления будет иметь следующий вид:

$$k = \begin{cases} 0, |gradP| \leq G; \\ k_0 \left(1 - \frac{G}{|gradP|}\right), |gradP| > G. \end{cases} \quad (1)$$

Зависимость величины порогового градиента G от газонасыщенности среды может быть исследована экспериментально.

Постановка задачи исследования

Цель настоящей работы заключалась в том, чтобы при помощи лабораторного моделирования оценить возможное влияние газа в среде типа пород донных отложений Восточно-Сибирского Арктического шельфа на её фильтрационные свойства. Для проведения лабораторных опытов была использована методика, разработанная в [21] для изучения нелинейных фильтрационных свойств низкопроницаемых горных пород. Данная методика основана на проведении измерений в процессе медленного спада градиента порового давления. Это позволяет исследовать фильтрационные свойства образцов при градиентах давления, сопоставимых с гидростатическим, что крайне важно для рассматриваемой задачи. В качестве модели среды использовались искусственные цилиндрические образцы (длина и диаметр по 3 см), изготовленные из смеси гипса с цементом с фильтрационными свойствами, близкими к натуральным [13, 14]: проницаемостью порядка 10 мД и пористостью порядка 0,5. Решение использовать искусственные образцы было продиктовано, с одной стороны, желанием добиться лучшей повторяемости и воспроизводимости условий эксперимента и, с другой стороны, невозможностью использовать реальные образцы в имеющейся установке ввиду их неконсолидированности. Вся партия модельных образцов одновременно изготавливалась из цементно-гипсовой смеси и после застывания высушивалась в течение долгого времени в комнатных условиях. Параметры сухих образцов представлены в табл. 1.

В ходе испытаний в насыщенный модельный образец закачивалось определённое количество газа (воздух), после чего производилось измерение его эффективной проницаемости в зависимости от градиента порового давления. Полученная кривая интерпретировалась в рамках модели порового градиента. Результатом испытаний стали зависимости величины порового градиента от газонасыщенности для нескольких образцов.

Таблица 1. Параметры образцов

Table 1. Samples parameters

Параметр Parameter	Образец/Sample		
	1	2	3
m	0,52	0,5	0,52
k (мД)/(мД)	13,0	10,93	11,63
ρ (г/см ³)/(g/cm ³)	1,12	1,15	1,13

Методика проведения опытов

С каждым образцом проводилась серия опытов с различной объёмной долей газа в порах $s_{gas}=0\div 0,05$ от суммарного порового объёма образца (что соответствует сделанным ранее оценкам на основании результатов работы [18]). Перед началом каждой серии опытов исследуемый образец вакуумировался, насыщался жидкостью и помещался в кернодержатель (рис. 2). После этого в корпусе кернодержателя создавалось (и далее поддерживалось в ходе всей серии испытаний) давление обжатия 5 МПа. Далее проводилось вакуумирование и заполнение жидкостью подводящих трубок установки. В качестве рабочей жидкости было использовано силиконовое масло ПМС-5 с вязкостью 5 сП. В отличие от водных растворов, эта жидкость не взаимодействует со скелетом образца. Кроме того, из-за хорошей смачиваемости её использование позволило получить высокую степень насыщения образца и исключить влияние остаточного газа. Для всех операций, связанных с поддержанием давления или прокачкой жидкости, использовалась насосная система СМП-НС-250-40 производства ООО «Кортех». Для измерения давления поровой жидкости на входе в кернодержатель использовался преобразователь избыточного давления NAT-8257 производства Trafag AG с диапазоном от 0 до 0,16 МПа и точностью 0,3 % от верхнего предела измерений. Давление на выходе из кернодержателя всегда было равно атмосферному – жидкость поступала на прецизионные весы (ViBRA ALH-420CE с дискретностью 0,001 грамма).

Каждый опыт включал в себя следующие этапы.

1. В начале опыта проводилась прокачка трех поровых объёмов жидкости (порядка 30 см³) через образец при большом перепаде порового давления (порядка 0,3 МПа) для того, чтобы убрать из порового пространства газ, оставшийся после предыдущего опыта [22].

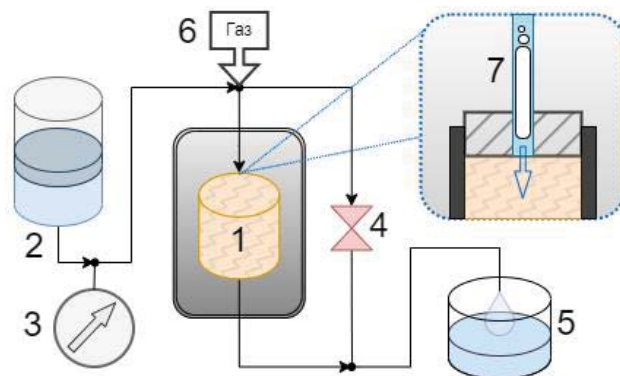


Рис. 2. Принципиальная схема и фото экспериментальной установки: 1 – исследуемый образец в кернодержателе; 2 – гидроаккумулятор; 3 – датчик порового давления; 4 – клапан для выравнивания давления; 5 – весы для измерения массы жидкости, прошедшей через образец; 6 – точка инъекции газа; 7 – пузырёк газа поступает по трубке в образец

Fig. 2. Schematic diagram and photo of the experimental setup: 1 – sample in a core holder; 2 – hydroaccumulator; 3 – pore pressure sensor; 4 – pressure equalization valve; 5 – scales for measuring the mass of liquid passing through the sample; 6 – gas injection point; 7 – gas bubble enters the sample through a tube

2. Далее проводилась инъекция пузырька газа (воздуха) нужного объёма в трубку на входе в кернодержатель, после чего этот пузырёк вместе с жидкостью закачивался в образец. Для этого производилась прокачка необходимого объёма жидкости (около 1 см³), установленного опытным путём с учётом суммарного объёма подводящей трубки. Диаметр трубки был достаточно мал, чтобы пузырёк газа за счёт капиллярного эффекта перемещался вместе с жидкостью (протяжённость пузырька в трубке составляла 5–25 см при диаметре трубки 2 мм).
3. После этого производилось измерение проницаемости образца по жидкости на спаде порового давления. Для этого в начальный момент времени на входе в кернодержатель при помощи гид-

роаккумулятора (рис. 2) создавалось определённое начальное поровое давление (порядка 0,05 МПа). По мере протекания жидкости через образец градиент давления уменьшался за счёт расширения газа в газовой части гидроаккумулятора. Жидкость, прошедшая через образец, непрерывно взвешивалась на выходе из кернодержателя при помощи весов. Параметры гидроаккумулятора были подобраны таким образом, чтобы скорость уменьшения градиента порового давления была достаточно низкой, чтобы можно было считать поток квазистационарным и пользоваться при дальнейшем анализе уравнениями для стационарного потока. Испытание продолжалось в течение 1 часа до почти полной остановки потока. За время испытания через образец суммарно проходило порядка 0,5 см³ жидкости.

4. В конце каждого опыта производилось измерение нулевого значения датчика порового давления. Для этого открывался клапан, выравнивающий давление на концах кернодержателя. Фактически при этом происходило измерение небольшого гидростатического перепада давления между датчиком и свободным уровнем жидкости на весах на выходе из установки. При обработке результатов опытов эта поправка вычиталась из показаний датчика порового давления.

Скорость фильтрации жидкости u в каждом опыте вычислялась по данным об изменении массы жидкости на весах. Для численного вычисления производной массы жидкости по времени, помимо метода центральной разности, применяется метод регуляризации квадратичного отклонения (Total Variation Regularization, TVR) [23]. Такой способ позволяет существенно повысить точность измерения при приближении к около нулевым величинам расхода [24]. По данным о расходе жидкости и перепаде порового давления для каждого момента времени по закону Дарси вычислялась эффективная проницаемость образца:

$$k = \eta \frac{u}{|\text{grad}P|}.$$

В качестве градиента давления бралось отношение перепада порового давления на концах образца к его длине. После этого результат представлялся в виде зависимости эффективной проницаемости от градиента порового давления и интерпретировался в рамках модели порового градиента (1).

На рис. 3 представлен результат одного из опытов. На рис. 3, а показана экспериментальная зависимость эффективной проницаемости k образца (образец № 2) от величины градиента порового давления $\text{grad}P$. Объёмная доля газа в порах образца в данном опыте составляла $s_{\text{gas}}=0,03$ (данная

величина вычислялась как отношение объёма инжектированного пузырька к суммарному поровому объёму образца). Маркерами показаны «сырые» данные, полученные по методу центральной разности для вычисления производной массы жидкости на весах.

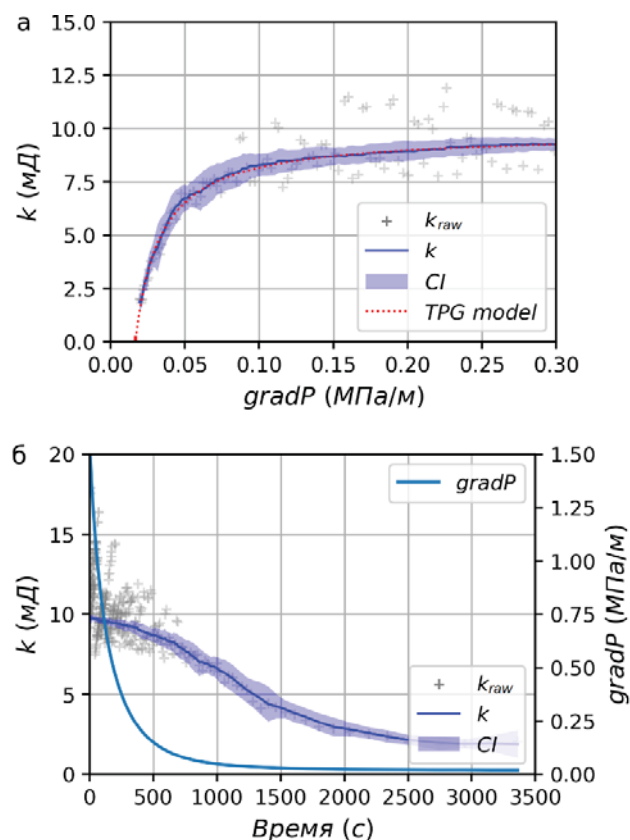


Рис. 3. Эффективная проницаемость образца № 2 в испытании на спаде давления, доля газа в порах $s_{\text{gas}}=0,03$; а) зависимость эффективной проницаемости от градиента давления: k_{raw} – «сырые» данные, полученные по методу центральной разности вычисления производной массы жидкости на весах; k – кривая, полученная с помощью регуляризации квадратичного отклонения; CI – оценка 95 % доверительного интервала для k ; TPG – результат приближения модельной зависимостью (1); б) те же кривые, отложенные от времени, сплошной линией показана зависимость градиента порового давления от времени

Fig. 3. Effective permeability of the sample no. 2 during the pressure decline test, gas fraction in the pores $s_{\text{gas}}=0.03$; (a) dependence of effective permeability on pressure gradient: k_{raw} – raw data calculated using the central difference method for the derivative of liquid mass on the scales; k – curve obtained using quadratic deviation regularization; CI – 95% confidence interval for k estimate; TPG – result of approximating with the model dependence (1); (b) the same curves plotted against time, the solid line indicates time dependence of pore pressure gradient

Сплошной линией и тоном показана та же кривая, полученная с помощью регуляризации квадратичного отклонения, а также оценка её 95 % доверительного интервала. Пунктирной линией показан результат приближения экспериментальных данных моделью порогового градиента (1). Градиент давления в точке пересечения данной кривой с осью абсцисс и является искомым пороговым градиентом G , асимптота кривых при градиенте давления, стремящемся к бесконечности, – величина абсолютной проницаемости k_0 . На рис. 3, б показано изменение тех же величин от времени в процессе спада давления. Сама зависимость градиента порового давления от времени показана сплошной линией.

Результаты и обсуждение

В ходе работы было испытано три идентичных искусственных образца и суммарно проведено около 70 опытов, по несколько опытов с каждым значением газонасыщенности. Результаты измерений представлены в табл. 2. На рис. 4 показано, как менялась зависимость эффективной проницаемости k образца № 2 от градиента порового давления $\text{grad}P$ для различных величин газонасыщенности S_{gas} . Пунктирными линиями обозначены модельные кривые вида (1). В качестве величины порогового градиента G для данной газонасыщенности взята точка пересечения соответствующей модельной кривой с осью абсцисс.

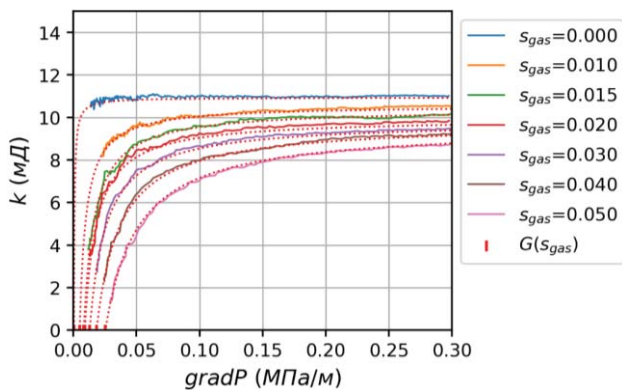


Рис. 4. Зависимость эффективной проницаемости k образца № 2 от градиента порового давления $\text{grad}P$ для различных величин газонасыщенности S_{gas} . Пунктирными линиями обозначены модельные кривые вида (1). В качестве величины порогового градиента G для данной газонасыщенности взята точка пересечения соответствующей модельной кривой с осью абсцисс

Fig. 4. Dependence of the effective permeability k of sample no. 2 on pore pressure gradient $\text{grad}P$ for various gas saturations S_{gas} . Dashed lines represent model curves of type (1). The point of intersection of the corresponding model curve with the abscissa axis is taken as the threshold pressure gradient value G for this gas saturation

На рис. 5 представлены экспериментальные значения пороговых градиентов и абсолютных проницаемостей в зависимости от доли порового объёма, занятого газом, для всех проделанных опытов (табл. 2). Можно видеть, что величина порогового градиента G линейно растёт с увеличением доли газа в порах. При этом абсолютная проницаемость от доли газа зависит слабо.

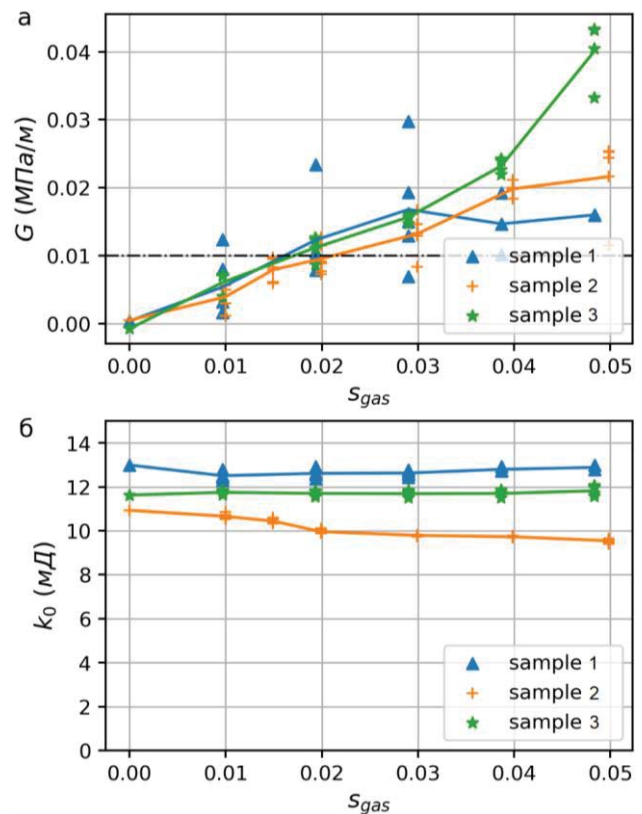


Рис. 5. Параметры модели порогового градиента для всех проделанных опытов: а) зависимость величины порогового градиента G от газонасыщенности S_{gas} , сплошными линиями показаны средние значения для каждого образца; пунктирной линией отмечена величина гидростатического градиента; б) зависимость абсолютной проницаемости k_0 от газонасыщенности S_{gas}

Fig. 5. Model parameters of the threshold pressure gradient for all conducted experiments: а) the dependence of the threshold pressure gradient G magnitude on gas saturation S_{gas} , solid lines represent the average values for each sample; the dashed line indicates the magnitude of the hydrostatic gradient; б) the dependence of absolute permeability k_0 on gas saturation S_{gas}

Наибольший интерес для анализа вызывает график зависимости порогового градиента от доли газа в порах (рис. 5, а). Уже при доле газа порядка 0,02 эта величина в опытах достигает 0,01 МПа/м, что соответствует гидростатическому градиенту давления в воде (пунктирная линия на графике). То

есть изолированная область породы, содержащая свободный газ с такой концентрацией, может стать непроницаемой для дальнейшего транспорта жидкости или газа под действием силы Архимеда. Это может объяснить наличие «подвижных» и «неподвижных» газовых фронтов, описанных в работе [18], если предположить, что «неподвижные» фронты представляют собой изолированные области с остаточной газонасыщенностью. Подобную возможность необходимо учитывать при создании моделей транспорта пузырькового газа через толщу пород донных отложений. Кроме того, существование газонасыщенных зон с пороговыми градиентами может существенно повлиять на вид вертикального профиля порового давления и привести к переоценке глубины зоны стабильности газового гидрата. К сожалению, существующая экспериментальная методика не позволила исследовать указанную зависимость при существенно меньших концентрациях газа. Так что вопрос существования порогового градиента при доле газа порядка 10^{-3} , что соответствует представленной ранее оценке доли газовых каналов в донных породах, пока остаётся невыясненным.

Таблица 2. Результаты опытов

Table 2. Experiment results

S_{gas}	Образец/Sample					
	1		2		3	
	k_0 , мД/мД	G , МПа/м МПа/м	k_0 , мД/мД	G , МПа/м МПа/м	k_0 , мД/мД	G , МПа/м МПа/м
0	12,99	3,87e-04	10,93	4,88e-04	11,63	-7,42e-04
0,01	12,49	1,67e-03	10,86	2,98e-03	11,65	4,01e-03
	12,30	8,02e-03	10,74	5,64e-03		
	12,43	1,24e-02	10,53	1,13e-03		
	12,80	1,65e-03	10,58	5,01e-03		
	12,51	3,21e-03	10,57	4,97e-03		
0,015	–	–	10,54	6,17e-03	–	–
			10,60	5,92e-03		
			10,40	9,50e-03		
			10,33	7,95e-03		
			10,41	8,29e-03		
0,02	12,64 12,37 12,56 12,93 12,56	9,73e-03 1,06e-02 2,34e-02 9,98e-03 7,88e-03	9,95	9,12e-03	11,55	1,26e-02
			10,12	7,73e-03		
			10,01	8,89e-03		
			9,91	7,29e-03		
			9,88	1,27e-02		
0,03	12,74 12,57 12,44 12,63 12,77	1,50e-02 1,93e-02 2,98e-02 1,29e-02 6,97e-03	9,81	1,30e-02	11,52	1,63e-02
			9,81	1,33e-02		
			9,74	1,46e-02		
			9,80	8,36e-03		
			9,80	1,67e-02		
0,04	12,74 12,73 12,92	1,93e-02 1,47e-02 1,01e-02	9,75	1,84e-02	11,51	2,19e-02
			9,68	1,98e-02		
			9,71	2,12e-02		
			9,77	2,00e-02		
0,05	12,79 12,98	1,60e-02 1,60e-02	9,49	1,15e-02	11,96	3,32e-02
			9,66	2,44e-02		
			9,59	2,54e-02		
			9,41	2,16e-02		
			9,57	2,52e-02		

Необходимо отметить ряд возможных источников ошибок в проделанных опытах. Величина s_{gas} формально вычислялась как отношение объёма газового пузырька к известному суммарному поровому объёму образца. Однако распределение газа по объёму образца вряд ли можно считать однородным. Можно предположить, что газ в образце концентрируется в виде струй вблизи путей проводимости, поэтому реальная концентрация газа, приводящая к «закупорке» порового пространства, значительно выше. Ещё одним возможным источником неверной оценки доли газа в порах может быть его растворение, а также то, что часть газа в процессе проведения испытания может пройти образец «насквозь» либо остаться в трубке перед образцом. К сожалению, в текущей постановке опытов невозможно контролировать вхождение пузырька газа в поры. Мы можем только прокачать достаточное, по нашим расчетам, количество жидкости для этого. Наличие газа в вертикальных участках трубки, до или после образца, также может привести к ошибке в измерении величины порогового градиента. Как упоминалось в разделе с описанием методики, в конце каждого опыта измерялась поправка к показаниям датчика порового давления на величину гидростатического перепада между ним и свободной поверхностью жидкости на весах на выходе установки. Если в этот момент на каком-то участке трубки присутствует столб газа, то величина гидростатического перепада давления измеряется с ошибкой, равной давлению соответствующего столба жидкости. Это могло приводить к ошибке измерения гидростатической поправки к давлению, сопоставимой с полученной величиной порогового градиента. Данная проблема, к сожалению, также не может быть решена в текущей постановке опытов. В будущей работе мы планируем проводить измерения на оптически прозрачных моделях, в которых подобные вопросы могут быть исключены.

Выводы

Целью настоящей работы было в рамках задачи о транспорте газа в донных отложениях количественно исследовать влияние свободного и связанного газа в порах на нелинейность фильтрационных течений. В результате испытаний были получены кривые зависимости величины порогового градиента от газонасыщенности для нескольких образцов. Установлено, что пороговый градиент линейно растёт с увеличением доли газа в поровом пространстве. Уже при доле газа порядка 0,02 эта величина в опытах достигает 0,01 МПа/м, что соответствует гидростатическому градиенту давления в воде. Это может говорить о том, что области среды даже с небольшой газонасыщенностью могут быть непроницаемыми для конвективных потоков флю-

ида. Эту возможность необходимо учитывать при создании моделей транспорта пузырькового газа через толщу пород донных отложений. Существование газонасыщенных зон с пороговыми градиентами может существенно повлиять на вид вертикального профиля порового давления и привести к переоценке глубины зоны стабильности газового

гидрата. Полученные результаты (экспериментальная методика, оценки) могут быть также использованы в ряде задач, не связанных с процессами в донных отложениях: например, при изучении флюидодинамических процессов в слабонапорных водных горизонтах либо в газонасыщенных приповерхностных слоях почвы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Milkov A.V. Global estimates of hydrate-bound gas in marine sediments: how much is really out there? // *Earth-Science Reviews*. – 2004. – Vol. 66. – № 3–4. – P. 183–197.
2. Shakhova N., Semiletov I., Chuvilin E. Understanding the permafrost–hydrate system and associated methane releases in the East Siberian Arctic Shelf // *Geosciences*. – 2019. – Vol. 9. – № 6 (251). – P. 1–23.
3. Permafrost and gas hydrate stability zone of the glacial part of the east-siberian shelf / A. Gavrilov, V. Malakhova, E. Pizhankova, A. Popova // *Geosciences*. – 2020. – Vol. 10. – № 12 (484). – P. 1–23.
4. Conceptual models of gas accumulation in the shallow permafrost of Northern West Siberia and conditions for explosive gas emissions / E. Chuvilin, N. Sokolova, D. Davletshina, B. Bukhanov, J. Stanilovskaya, C. Badetz, M. Spasennykh // *Geosciences*. – 2020. – Vol. 10. – № 5 (195). – P. 1–13.
5. Boudreau B.P. The physics of bubbles in surficial, soft, cohesive sediments // *Marine and Petroleum Geology*. – 2012. – Vol. 38. – № 1. – P. 1–18.
6. Liu H., Zhan L., Lu H. Mechanisms for upward migration of methane in marine sediments // *Frontiers in Marine Science*. – 2022. – Vol. 9. – P. 1–20.
7. Iversen N., Jørgensen B.B. Diffusion coefficients of sulfate and methane in marine sediments: Influence of porosity // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1993. – Vol. 57. – № 3. – P. 571–578.
8. Luff R., Wallmann K. Fluid flow, methane fluxes, carbonate precipitation and biogeochemical turnover in gas hydrate-bearing sediments at Hydrate Ridge, Cascadia Margin: numerical modeling and mass balances // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2003. – Vol. 67. – № 18. – P. 3403–3421.
9. Xu W., Ruppel C. Predicting the occurrence, distribution, and evolution of methane gas hydrate in porous marine sediments // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 1999. – Vol. 104. – № B3. – P. 5081–5095.
10. Mechanisms of methane hydrate formation in geological systems / K. You, P.B. Flemings, A. Malinverno, T.S. Collett, K. Darnell // *Reviews of Geophysics*. – 2019. – Vol. 57. – № 4. – P. 1146–1196.
11. Max M.D. Natural gas hydrate in oceanic and permafrost environments. – Dordrecht: Springer, 2003. – 415 p.
12. Gas Bubble Migration and Trapping in Porous Media: Pore-Scale Simulation / N. Mahabadi, X. Zheng, T.S. Yun, L. van Paassen, J. Jang // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2018. – Vol. 123. – № 2. – P. 1060–1071.
13. Влияние гидратообразования на изменение газопроницаемости мерзлых песчаных пород / Е.М. Чувилин, С.И. Гребенкин, Д.А. Давлетшина, М.В. Жмаев // *Криосфера Земли*. – 2020. – Т. XXIV. – № 2. – С. 40–47.
14. Chuvilin E., Zhmaev M., Grebenkin S. Gas permeability behavior in frozen sand controlled by formation and dissociation of pore gas hydrates // *Geosciences*. – 2022. – Vol. 12. – № 9 (321). – P. 1–14.
15. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. – М.: Недра, 1984. – 211 с.
16. The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice / N. Shakhova, I. Semiletov, V. Sergienko, L. Lobkovsky, V. Yusupov, A. Salyuk, A. Salomatin, D. Chernykh, D. Kosmach, G. Panteleev, D. Nicolsky, V. Samarkin, S. Joye, A. Charkin, O. Dudarev, A. Meluzov, O. Gustafsson // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. – 2015. – Vol. 373. – № 2052. – P. 20140451.
17. Ronen D., Berkowitz B., Magaritz M. The development and influence of gas bubbles in phreatic aquifers under natural flow conditions // *Transport in Porous Media*. – 1989. – Vol. 4. – № 3. – P. 295–306.
18. Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf / N. Shakhova, I. Semiletov, O. Gustafsson, V. Sergienko, L. Lobkovsky, O. Dudarev, V. Tumskoy, M. Grigoriev, A. Mazurov, A. Salyuk, R. Ananiev, A. Koshurnikov, D. Kosmach, A. Charkin, N. Dmitrevsky, V. Karnaukh, A. Gunar, A. Meluzov, D. Chernykh // *Nature Communications*. – 2017. – Vol. 8. – № 15872. – P. 1–20.
19. Analysis of Pre-Darcy flow for different liquids and gases / Z. Farmani, R. Azin, R. Fatehi, M. Escrochi // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 168. – P. 17–31.
20. Prada A., Civan F. Modification of Darcy's law for the threshold pressure gradient // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 1999. – Vol. 22. – № 4. – P. 237–240.
21. Baryshnikov N.A., Zenchenko E.V., Turuntayev S.B. Dependence of effective permeability on pore pressure gradient at low flow rates in low-permeability limestone // *Interpretation*. – 2023. – Vol. 11. – № 1. – P. T1–T6.
22. McPhee C., Reed J., Zubizarreta I. Core analysis: a best practice guide // Elsevier Science. – 2015. – Vol. 64. – 852 p.
23. Chartrand R. Numerical differentiation of noisy, nonsmooth data // *ISRN Applied Mathematics*. – 2011. – Vol. 2011. – P. 1–11.
24. Барышников Н.А., Зенченко Е.В., Турунтаев С.Б. Применение метода регуляризации квадратичного отклонения для анализа результатов лабораторных исследований нелинейных фильтрационных потоков // *Динамические процессы в геосферах*. – 2022. – Т. 14. – № 1. – С. 85–92.

Информация об авторах

Николай Александрович Барышников, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геомеханики и флюидодинамики Института динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук, Россия, 119334, г. Москва, Ленинский пр., 38, корп. 1; <https://orcid.org/0000-0002-5447-280X>, baryshnikov.na@idg.ras.ru

Пётр Евгеньевич Зенченко, научный сотрудник лаборатории геомеханики и флюидодинамики Института динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук, Россия, 119334, г. Москва, Ленинский пр., 38, корп. 1; <https://orcid.org/0000-0003-4217-4757>, zenchenko.pe@idg.ras.ru

Сергей Борисович Турунтаев, доктор физико-математических наук, директор Института динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук, Россия, 119334, г. Москва, Ленинский пр., 38, корп. 1; <https://orcid.org/0000-0002-1058-296X>, stur@idg.ras.ru

Поступила в редакцию: 05.10.2023

Поступила после рецензирования: 01.02.2024

Принята к публикации: 31.05.2024

REFERENCES

1. Milkov A.V. Global estimates of hydrate-bound gas in marine sediments: how much is really out there? *Earth-Science Reviews*, 2004, vol. 66, no. 3–4, pp. 183–197.
2. Shakhova N., Semiletov I., Chuvilin E. Understanding the Permafrost–Hydrate System and Associated Methane Releases in the East Siberian Arctic Shelf. *Geosciences*, 2019, vol. 9, no. 6 (251), pp. 1–23.
3. Gavrillov A., Malakhova V., Pizhankova E., Popova A. Permafrost and gas hydrate stability zone of the glacial part of the East-Siberian Shelf. *Geosciences*, 2020, vol. 10, no. 12 (484), pp. 1–23.
4. Chuvilin E., Sokolova N., Davletshina D., Bukhanov B., Stanilovskaya J., Badetz C., Spasennykh M. Conceptual models of gas accumulation in the shallow permafrost of Northern West Siberia and conditions for explosive gas emissions. *Geosciences*, 2020, vol. 10, no. 5 (195), pp. 1–13.
5. Boudreau B.P. The physics of bubbles in surficial, soft, cohesive sediments. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, vol. 38, no. 1, pp. 1–18.
6. Liu H., Zhan L., Lu H. Mechanisms for upward migration of methane in marine sediments. *Frontiers in Marine Science*, 2022, vol. 9, pp. 1–20.
7. Iversen N., Jørgensen B.B. Diffusion coefficients of sulfate and methane in marine sediments: Influence of porosity. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, vol. 57, no. 3, pp. 571–578.
8. Luff R., Wallmann K. Fluid flow, methane fluxes, carbonate precipitation and biogeochemical turnover in gas hydrate-bearing sediments at Hydrate Ridge, Cascadia Margin: numerical modeling and mass balances. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, vol. 67, no. 18, pp. 3403–3421.
9. Xu W., Ruppel C. Predicting the occurrence, distribution, and evolution of methane gas hydrate in porous marine sediments. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1999, vol. 104, no. B3, pp. 5081–5095.
10. You K., Flemings P.B., Malinverno A., Collett T.S., Darnell K. Mechanisms of Methane Hydrate Formation in Geological Systems. *Reviews of Geophysics*, 2019, vol. 57, no. 4, pp. 1146–1196.
11. Max M.D. *Natural gas hydrate in oceanic and permafrost environments*. Dordrecht, Springer, 2003. 415 p.
12. Mahabadi N., Zheng X., Yun T.S., Van Paassen L., Jang J. Gas bubble migration and trapping in porous media: pore-scale simulation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, vol. 123, no. 2, pp. 1060–1071.
13. Chuvilin E.M., Grebenkin S.I., Davletshina D.A., Zhmaev M.V. Influence of hydrate formation on gas permeability variations in frozen sands. *Kriosfera Zemli*, 2020, vol. XXIV, no. 2, pp. 40–47. (In Russ.)
14. Chuvilin E., Zhmaev M., Grebenkin S. Gas permeability behavior in frozen sand controlled by formation and dissociation of pore gas hydrates. *Geosciences*, 2022, vol. 12, no. 9 (321), pp. 1–14.
15. Barenblatt G.I., Entov V.M., Ryzhik V.M. *Flows of liquids and gases in natural formations*. Moscow, Nedra Publ., 1984. 211 p. (In Russ.)
16. Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V., Lobkovsky L., Yusupov V., Salyuk A., Salomatin A., Chernykh D., Kosmach D., Panteleev G., Nicolsky D., Samarkin V., Joye S., Charkin A., Dudarev O., Meluzov A. The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2015, vol. 373, no. 2052, p. 20140451.
17. Ronen D., Berkowitz B., Magaritz M. The development and influence of gas bubbles in phreatic aquifers under natural flow conditions. *Transport in Porous Media*, 1989, vol. 4, no. 3, pp. 295–306.
18. Shakhova N., Semiletov I., Gustafsson O., Sergienko V., Lobkovsky L., Dudarev O., Tumskey V., Grigoriev M., Mazurov A., Salyuk A., Ananiev R., Koshurnikov A., Kosmach D., Charkin A., Dmitrevsky N., Karnaukh V., Gunar A., Meluzov A., Chernykh D. Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf. *Nature Communications*, 2017, vol. 8, no. 15872, pp. 1–20.
19. Farmani Z., Azin R., Fatehi R., Escrochi M. Analysis of Pre-Darcy flow for different liquids and gases. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 168, pp. 17–31.
20. Prada A., Civan F. Modification of Darcy's law for the threshold pressure gradient. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 1999, vol. 22, no. 4, pp. 237–240.
21. Baryshnikov N.A., Zenchenko P.E., Turuntaev S.B. Dependence of effective permeability on pore pressure gradient at low flow rates in low-permeability limestone. *Interpretation*, 2023, vol. 11, no. 1, pp. T1–T6.

22. McPhee C., Reed J., Zubizarreta I. Core analysis: a best practice guide. *Elsevier Science*, 2015, vol. 64, 829 p.
23. Chartrand R. Numerical differentiation of noisy, nonsmooth data. *ISRN Applied Mathematics*, 2011, vol. 2011, pp. 1–11.
24. Baryshnikov N.A., Zenchenko E.V., Turuntayev S.B. Nonlinear flow computation using total-variation regularization. *Dynamic Processes in Geospheres*, 2022, vol. 14, no. 1, pp. 85–92. (In Russ.)

Information about the authors

Nikolay A. Baryshnikov, Cand. Sc., Leading Researcher, Academician M.A. Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of the Russian Academy of Sciences, 38, bld. 1, Leninsky avenue, Moscow, 119334, Russian Federation, baryshnikov.na@idg.ras.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5447-280X>

Petr E. Zenchenko, Researcher, Academician M.A. Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of the Russian Academy of Sciences, 38, bld. 1, Leninsky avenue, Moscow, 119334, Russian Federation, zenchenko.pe@idg.ras.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4217-4757>

Sergey B. Turuntaev, Dr. Sc., Director, Academician M.A. Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of the Russian Academy of Sciences, 38, bld. 1, Leninsky avenue, Moscow, 119334, Russian Federation, stur@idg.ras.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1058-296X>

Received: 05.10.2023

Revised: 01.02.2024

Accepted: 31.05.2024

УДК 621.651

DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4344

Шифр специальности ВАК: 05.04.07

Влияние геометрии струйного эжектора на подачу насосной установки, предупреждающей асфальтосмолопарафиновые отложения

К.Р. Уразаков^{1✉}, Т.Г. Макарова², А.О. Борисов¹

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, г. Уфа

² Альметьевский государственный нефтяной институт, Россия, г. Альметьевск

✉ urazakk@mail.ru

Аннотация. Актуальность. Добыча нефти установками электроприводных центробежных насосов является на сегодняшний день одним из ведущих способов механизированной добычи нефти. Механизированная эксплуатация скважин, вскрывающих запасы трудноизвлекаемой нефти, в значительной степени осложняется высокой вязкостью пластовой нефти, отложением в стволе скважины асфальтенов, смолистых веществ, парафинов. Это приводит к увеличению гидравлических сопротивлений вследствие снижения проходного сечения труб и других узлов насосного оборудования, к снижению производительности скважин и эффективности насосной добычи. В этой связи актуальной задачей является разработка и совершенствование способов и устройств предотвращения отложений асфальтенов, смолистых веществ, парафинов в скважинах. **Объект:** скважинная дозирующая насосная установка для непрерывной подачи реагента (ингибитора отложения парафинов) в скважину, представляющая собой комбинацию из двух технических устройств – насоса, дозирующего реагент, и струйного насоса. **Цель:** анализ влияния конструктивных параметров дозирующей насосной установки на эффективность ее работы (расход реагента, коэффициент кавитации жидкости в струйном насосе). **Методы:** математическое моделирование работы скважинной дозирующей установки для подачи реагента, основанное на применении законов сохранения массы и количества движения, а также закона Бернулли для движущегося потока в струйном насосе. **Результаты.** На основе результатов моделирования установлен характер влияния конструктивных параметров разработанной установки на расход реагента. Установлено, что максимальный расход реагента достигается при диаметре камеры смешения порядка 0,022 м, увеличение диаметра относительно указанной величины приводит к снижению степени местного понижения давления, снижение диаметра камеры смешения – к падению расхода вследствие увеличения скорости потока в камере и возрастания гидравлических сопротивлений. Установлено, что увеличение подачи установки электроприводных центробежных насосов в рассмотренном диапазоне 100–200 м³ в сутки практически не оказывает влияния на расход реагента при значении диаметра камеры смешения более 0,03 м. Установлено, что при значениях длины конфузора, превышающих 0,21 м, коэффициент кавитации вне зависимости от диаметра камеры смешения превышает единицу, что говорит о плавном и равномерном снижении давления в корпусе устройства. В целом показано, что регулированием конструктивных параметров скважинной дозирующей установки можно обеспечить требуемый расход реагента при известной подаче установки электроприводных центробежных насосов (дебите скважины).

Ключевые слова: струйный насос, насос-дозатор, электроцентробежный насос, асфальтосмолопарафиновые отложения, ингибитор асфальтосмолопарафиновых отложений, расход реагента, гидравлические потери

Для цитирования: Уразаков К.Р., Макарова Т.Г., Борисов А.О. Влияние геометрии струйного эжектора на подачу насосной установки, предупреждающей асфальтосмолопарафиновые отложения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 6. – С. 214–222. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4344

UDC 621.651

DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4344

Effect of jet ejector geometry on the supply of a pumping unit preventing wax-deposit

K.R. Urazakov^{1✉}, T.G. Makarova², A.O. Borisov¹

¹ Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation

² Almeteyevsk State Oil Institute, Almeteyevsk, Russian Federation

✉Urazakk@mail.ru

Abstract. Relevance. Today oil production by installations of electric centrifugal pumps is one of the leading methods of mechanized oil production. The mechanized operation of hard-to-recover oil objects is complicated by the high viscosity of reservoir oil, the formation of wax-deposits in the wellbore. This leads to an increase in hydraulic resistances due to a decrease in the flow section of pipes and other pumping equipment components, a decrease in the productivity of wells and the efficiency of pumping production. In this regard, an urgent task is to develop and improve methods and devices for preventing deposits of wax-deposits in wells. **Object.** Downhole pumping unit for dosing reagent (inhibitor of wax-deposits) into the well, which is a combination of two technical devices – a pump dosing the reagent and a jet pump. **Aim.** To analyze the influence of the design parameters of the dosing unit on the efficiency of its operation (reagent consumption, liquid cavitation coefficient in the jet pump). **Methods.** Mathematical modeling of the operation of a downhole dosing unit for the supply of reagent, based on the application of the laws of conservation of mass and quantity of motion, as well as Bernoulli's law for a moving flow in a jet pump. **Results.** Based on the simulation results, the nature of the influence of the design parameters of the developed installation on the reagent consumption is defined. It is established that the maximum flow rate of the reagent is achieved with a mixing chamber diameter of about 22 mm; an increase in diameter relative to the specified value leads to a decrease in the degree of local pressure reduction, a decrease in the diameter of the mixing chamber – a drop in flow due to an increase in the flow rate in the chamber and an increase in hydraulic resistance. It was found that an increase in the supply of electric centrifugal pumps in the considered range of 100–200 m³ per day has practically no effect on the reagent consumption when the mixing chamber diameter is more than 30 mm. It was found that at confuser length values exceeding 210 mm, the cavitation coefficient, regardless of the mixing chamber diameter, exceeds one, which indicates a smooth and uniform pressure reduction in the device body. In general, it is shown that by regulating the design parameters of a downhole metering unit, it is possible to ensure the required reagent consumption at a known electric centrifugal pump supply (well flow rate).

Keywords: jet pump, dosing pump, electric centrifugal pump, asphalt-resin-paraffin deposits, wax-deposits inhibitor, reagent consumption, hydraulic losses

For citation: Urazakov K.R., Makarova T.G., Borisov A.O. Effect of jet ejector geometry on the supply of a pumping unit preventing wax-deposit. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2024, vol. 335, no. 6, pp. 214–222. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4344

Введение

Современные условия эксплуатации установки электроприводных центробежных насосов (УЭЦН) зачастую связаны с различного рода осложнениями, такими как повышенный газовый фактор, наличие механических примесей в составе откачиваемой жидкости [1, 2]. Одним из распространенных типов осложнений, в частности, сопровождающих добычу «тяжелой» нефти [3], является образование асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО) в полости насосно-компрессорных труб (НКТ). При снижении температуры нефти, содержащей АСПО, ниже температуры ее насыщения парафином (в процессе подъема вдоль ствола скважины), начинается процесс кристаллизации углеводородных компонент и их отложения в узлах

погружного насосного оборудования [4, 5]. Вышесказанное приводит к частичной или полной закупорке проходного сечения насосных труб и снижению подачи УЭЦН [6–8]. Образование АСПО является причиной повышенных затрат при эксплуатации скважины, связанных с проведением ремонтных работ по удалению возникающих отложений [9].

В настоящее время на нефтедобывающих предприятиях нашли применение два подхода к предотвращению АСПО: предупреждение образования АСПО и растворение образовавшихся АСПО. Первый подход включает применение защитных покрытий, физических (с использованием магнитных, акустических полей) и химических методов воздействия (диспергаторы, модификаторы, смачива-

тели, депрессорные присадки). Второй подход включает применение тепловых (промывка горячей нефтью, водой или паром, скважинные индукционные нагреватели), механических (обработка скребками), химических методов воздействия (ингибиторы, растворители, депрессоры и т. д.) [10, 11]. Выбор оптимальной технологии борьбы с АСПО зависит от множества факторов: дебита скважины, компоновки насосного оборудования, физико-химических свойств парафинистой нефти и других [12, 13].

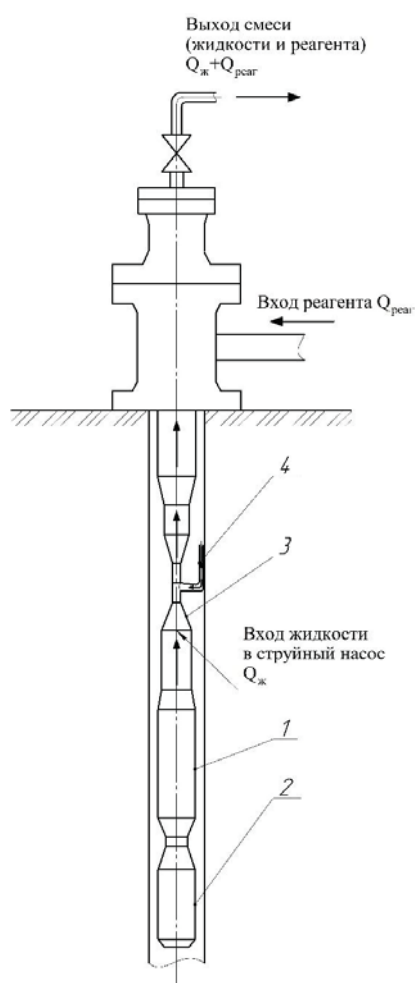


Рис. 1. Скважинная насосная установка для дозирования реагента – ингибитора АСПО: 1 – центробежный насос; 2 – погружной электродвигатель; 3 – струйный насос; 4 – патрубок насоса, дозирующего реагент

Fig. 1. Downhole pumping unit to prevent wax-deposits: 1 – centrifugal pump; 2 – submersible electric motor; 3 – jet pump; 4 – nozzle of the pump dosing reagent

Одним из наиболее эффективных и вместе с тем недорогих методов, предупреждающих образования АСПО в скважине, является применение ингибиторов парафиновых отложений (химических реа-

гентов) [14, 15]. Разработано оригинальное техническое решение, позволяющее предотвратить выпадение АСПО в скважине и заключающееся в непрерывном дозировании реагента – ингибитора АСПО – в НКТ ниже глубины начала выпадения парафинов [16].

Указанная разработка представляет собой комбинацию из двух технических устройств – насоса, дозирующего реагент, и струйного насоса. Скважинная дозирующая установка работает следующим образом (рис. 1). Электроцентробежный насос – 1 перекачивает жидкость за счет работы погружного электродвигателя – 2. Нагнетаемая жидкость поступает в полость струйного насоса – 3, конструкция которого спроектирована таким образом, чтобы обеспечить требуемый перепад давления для увлечения дозируемого реагента из патрубка – 4, являющегося частью насоса, дозирующего реагент. Таким образом, основной принцип действия установки дозирования связан с обеспечением необходимого перепада давления в струйном насосе для поддержания требуемого расхода реагента.

Для обеспечения эффективной эксплуатации разработанной скважинной дозирующей установки необходимо произвести анализ влияния ее конструктивных параметров на процесс дозирования реагента. Схема струйного насоса показана на рис. 2 [17]. Далее принято определение «насос, дозирующий реагент», включающий емкость с реагентом на поверхности скважины, а также трубопровод, соединяющий указанную емкость со струйным насосом.

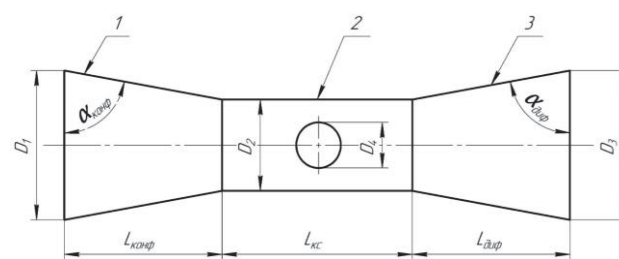


Рис. 2. Геометрия струйного насоса: 1 – конфузор; 2 – камера смешения; 3 – диффузор

Fig. 2. Geometric parameters of the jet pump: 1 – confuser; 2 – mixing chamber; 3 – diffuser

Описание математической модели работы скважинной дозирующей установки для подачи реагента

Для расчета перепада давления в элементах струйного насоса (последовательно в конфузоре, камере смешения и диффузоре) применяется подход, основанный на применении законов сохранения массы и количества движения для движущего-

ся потока, а также закона Бернулли [18, 19]. Геометрические параметры струйного насоса связаны между собой зависимостью

$$\begin{cases} D_2 = D_1 - \operatorname{ctg}(\alpha_{\text{конф}}) L_{\text{конф}}; \\ D_2 = D_3 - \operatorname{ctg}(\alpha_{\text{диф}}) L_{\text{диф}}, \end{cases} \quad (1)$$

где D_1 , D_2 , D_3 – диаметры струйного насоса, м; $\alpha_{\text{конф}}$, $\alpha_{\text{диф}}$ – углы наклона конфузора и диффузора соответственно, град; $L_{\text{конф}}$, $L_{\text{диф}}$ – длины конфузора и диффузора соответственно, м.

Обозначим давление и скорость жидкости на входе в конфузор как $p_{\text{вх.конф}}$ и $v_{\text{вх.конф}}$ соответственно. Давление на выходе из конфузора определяется по формуле:

$$p_{\text{вых.конф}} = \frac{v_{\text{вх.конф}}^2 \rho_{\text{ж}}}{2} - \frac{v_{\text{вх.конф}}^2 \rho_{\text{ж}}}{2} (1 + K_{\text{конф}}) - p_{\text{вх.конф}}, \quad (2)$$

где $p_{\text{вых.конф}}$ – давление на выходе из конфузора, Па; $v_{\text{вых.конф}}$ – скорость на выходе из конфузора, м/с; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, кг/м³; $L_{\text{конф}}$ – длина конфузора, м; D_2 – выходной диаметр конфузора, м; $K_{\text{конф}}$ – коэффициент потерь в конфузоре.

Связь между скоростью жидкости на входе и выходе из конфузора определяется из закона сохранения массы при движении жидкости по конфузору:

$$\rho_{\text{ж}} v_{\text{вх.конф}} S_{\text{вх.конф}} = \rho_{\text{ж}} v_{\text{вых.конф}} S_{\text{вых.конф}}, \quad (3)$$

где $S_{\text{вх.конф}}$, $S_{\text{вых.конф}}$ – площадь проходного сечения потока на входе и выходе в конфузор соответственно, м².

Выход из конфузора и вход в камеру смешения совпадают. Перепад давления в камере смешения с учетом притока реагента в камеру смешения определяется как

$$\begin{aligned} p_{\text{вх.кс}} - p_{\text{вых.кс}} = \\ = \frac{\rho_{\text{см}} u_{\text{см}} Q_{\text{см}} + p_{\text{тр}} - \rho_{\text{реаг}} u_{\text{реаг}} Q_{\text{реаг}} - \rho_{\text{ж}} u_{\text{ж}} Q_{\text{ж}}}{f_{\text{кс}}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $F_{\text{тр}}$ – сила вязкого трения, Н; $f_{\text{кс}}$ – площадь поперечного сечения камеры смешения, м²; $\rho_{\text{см}} = w\rho_{\text{ж}} + (1-w)\rho_{\text{реаг}}$ – плотность смеси, кг/м³; $\rho_{\text{реаг}}$ – плотность реагента, кг/м³; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, кг/м³; $u_{\text{реаг}}$ – скорость реагента, м/с; $u_{\text{см}}$ – скорость смеси, м/с; $u_{\text{ж}}$ – скорость жидкости, м/с; $Q_{\text{ж}}$ – расход жидкости, м³/с; $Q_{\text{реаг}}$ – расход реагента, м³/с; $Q_{\text{см}} = Q_{\text{ж}} + Q_{\text{реаг}}$ – расход смеси, м³/с.

Скорость истечения реагента в полость струйного насоса как функция перепада давления в полости струйного насоса определяется следующим образом [20]:

$$u_{\text{реаг}} = k \sqrt{\frac{2(p_{\text{реаг.вх}} - p_{\text{вх.кс}})}{\rho_{\text{реаг}}}}, \quad (5)$$

где $k = 0,05-0,2$ – коэффициент расхода; $p_{\text{реаг.вх}}$ – давление на входе в отверстие насоса, дозирующего реагент, Па. Также для описания работы конфузора и диффузора рассчитывается коэффициент кавитации:

$$X = \frac{2(p_{\text{вых}} - p_{\text{нас}})}{\rho_{\text{ж}} \left(\frac{4Q_{\text{ж}}}{\pi(D_2)^2} \right)^2}, \quad (6)$$

где $p_{\text{нас}}$ – давление насыщения нефти, Па; D_2 – диаметр камеры смешения, м.

Совместное решение системы уравнений (1)–(6) позволяет рассчитать перепады давления, возникающие в элементах струйного насоса, а также определить расход реагента – ингибитора АСПО – в полость НКТ. Детальное описание математической модели представлено в работе [21].

Исследование работы скважинной дозирочной установки для подачи реагента

Исходные данные. В качестве исходных (входных) данных для моделирования работы скважинной дозирочной установки приняты следующие параметры:

- длина конфузора – 0,03 м;
- диаметр конфузора D_1 – 0,062 м;
- угол наклона конфузора – 68 град;
- глубина спуска струйного насоса – 700 м;
- устьевое давление – 0,2 МПа;
- внутренний диаметр НКТ – 0,062 м;
- плотность жидкости (нефти) – 800 кг/м³, вязкость: 0,005–0,03 Па·с;
- вязкость дозируемого реагента – 0,020–0,1 Па·с;
- плотность реагента – 900 кг/м³;
- расход реагента – 0,0067–0,011 м³/сут;
- расход жидкости в НКТ – 100–200 м³/сут.

Требуемый расход реагента принимается из расчета 0,1–0,3 кг реагента на тонну нефти. Исследовано влияние на расход реагента таких параметров, как диаметр на выходе из конфузора D_2 (диаметр камеры смешения), длина конфузора/диффузора, диаметр входного отверстия насоса, дозирующего реагент D_4 . Результаты исследования влияния диаметра камеры смешения D_2 на расход реагента представлены на рис. 3. При этом при моделировании приняты следующие конструктивные параметры струйного насоса: диаметр конфузора D_1 – 0,062 м, длина $L_{\text{конф}}$ – 0,24 м, угол наклона $\alpha_{\text{конф}}$ – 71–74 град, диаметр проходного отверстия насоса, дозирующего реагент D_4 , варьируется от 0,005 до 0,013 м, длина камеры смешения $L_{\text{кс}}$ – 0,21 м.

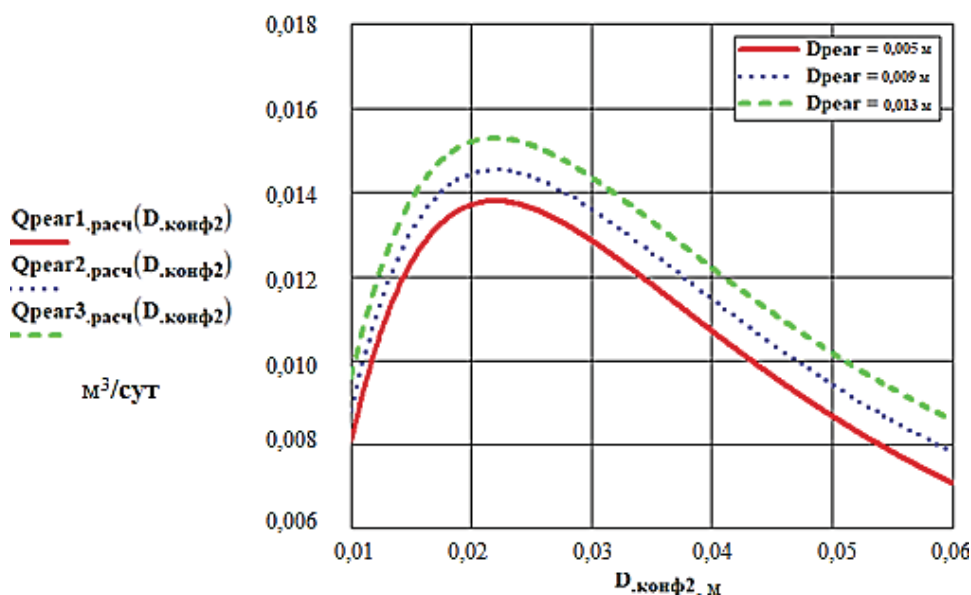


Рис. 3. Зависимость объемного расхода реагента от диаметра камеры смешения D_2 при различных значениях диаметра входного отверстия насоса, дозирующего реагент D_4

Fig. 3. Dependence of the reagent volume flow on the mixing chamber D_2 diameter at different values of the diameter of the inlet of the pump dosing the reagent D_4

Из рис. 3 следует, что кривая зависимости объемного расхода реагента от диаметра камеры смешения имеет максимум, соответствующий диаметру камеры смешения порядка 0,022 м. При снижении диаметра камеры смешения от 0,045 до 0,022 м объемный расход реагента возрастает вследствие сужения эффективного сечения и увеличения скорости потока, в результате чего происходит местное снижение давления согласно формуле Бернулли. При дальнейшем снижении диаметра камеры смешения расход реагента падает вследствие уве-

личения скорости потока в камере и возрастания гидравлических сопротивлений. Расход реагента при увеличении диаметра входного отверстия насоса D_4 от 0,005 до 0,013 м возрастает от 0,0138 до 0,0155 м³/сут (на 12,5 %).

Аналогично выполнен анализ влияния подачи УЭЦН/дебита скважины (значение подачи/дебита $Q_{ж}$ принимается равным 100, 150, 200 м³/сут) на расход реагента (рис. 4). Диаметр насоса, дозирующего реагент D_4 , принят равным 0,009 м. Требуемый расход реагента здесь и далее принят 0,0123 м³/сут.

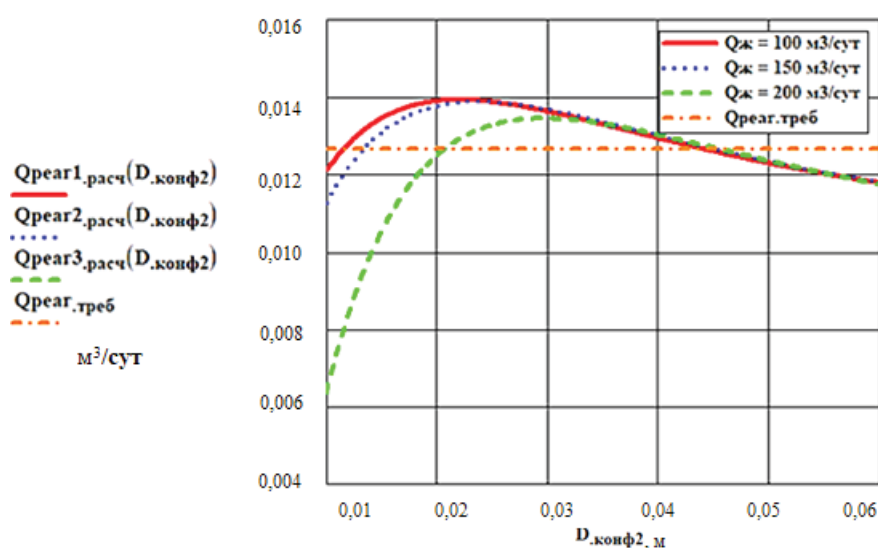


Рис. 4. Зависимость объемного расхода реагента от диаметра камеры смешения D_2 при различных значениях подачи УЭЦН

Fig. 4. Dependence of the reagent volume flow on the mixing chamber D_2 diameter at different values of the ESP supply

Увеличение подачи УЭЦН в рассмотренном диапазоне 100–200 м³/сут практически не оказывает влияния на расход при значении диаметра камеры смешения более 0,03 м. При уменьшении диаметра камеры смешения ниже 0,03 м увеличение подачи приводит к падению объемного расхода реагента, связанного с увеличением гидравлических сопротивлений в струйном насосе. Особенно хорошо это видно при подаче насоса порядка 200 м³/сут, для которой снижение диаметра камеры смешения с 0,03 до 0,01 м приводит к снижению объемного расхода реагента с 0,012–0,013 до 0,004 м³/сут, т. е. более чем в 2 раза. Учитывая, что дебит жидкости и, соответственно, подача насоса могут изменяться в процессе эксплуатации скважины, для обеспечения стабильного расхода реагента диаметр камеры смешения рационально выбирать более 0,02–0,03 м, так как в этом случае расход реагента практически не чувствителен к изменению подачи насоса. В рассмотренном случае для обеспечения расхода реагента 0,0123 м³/сут при различных подачах УЭЦН оптимальное значение диаметра камеры смешения – 0,045 м.

Далее исследовано влияние диаметра D_4 насоса, дозирующего реагент, на величину объемного его расхода $Q_{\text{реаг.треб}}$ при различных значениях подачи УЭЦН $Q_{\text{ж}}$ (рис. 5). При моделировании диаметр камеры смешения принят $D_2 = 0,035$ м.

Зависимость расхода реагента от диаметра проходного отверстия насоса D_4 , дозирующего реагент, имеет параболический вид с ветвью, направленной вверх: при увеличении D_4 расход реагента возрастает вследствие снижения местных гидрав-

лических сопротивлений в отверстии, дозирующем реагент. Подача насоса оказывает небольшое влияние на расход реагента: при увеличении подачи от 100 до 200 м³/сут максимальный расход реагента возрастает с 0,014 до 0,016 м³/сут (на 7 %). При этом для достижения требуемого расхода $Q_{\text{тр}}=0,0123$ м³/сут при увеличении дебита скважины со 100 до 200 м³/сут диаметр проходного отверстия насоса, дозирующего реагент, должен увеличиться с 0,01 до 0,0128 м (на 28 %).

Результаты расчета коэффициента кавитации в конфузоре представлены на рис. 6.

Исходя из графиков, представленных на рис. 6, получено, что при значениях длины конфузора, превышающих 0,21 м, коэффициент кавитации вне зависимости от диаметра камеры смешения превышает единицу, что говорит о плавном и равномерном снижении давления в корпусе устройства. При более низких значениях длины возможно возникновение кавитационного режима работы, что может привести к износу струйного насоса. В результате обобщения полученных результатов для обеспечения требуемого расхода реагента в диапазоне от 0,1 до 0,3 кг/т при подаче УЭЦН от 100 до 200 м³/сут рекомендован следующий ряд типоразмера установки дозирования: диаметр $D_1 = 0,062$ м, длина $L_{\text{конф}} = 0,24$ м, угол наклона $\alpha_{\text{конф}} = 71\text{--}74$ град, диаметр камеры смешения $D_2 = 0,035$ м, длина камеры смешения $L_{\text{кс}} = 0,21$ м, диаметр проходного отверстия насоса, дозирующего реагент $D_4 = 0,0106\text{--}0,0108$ м.

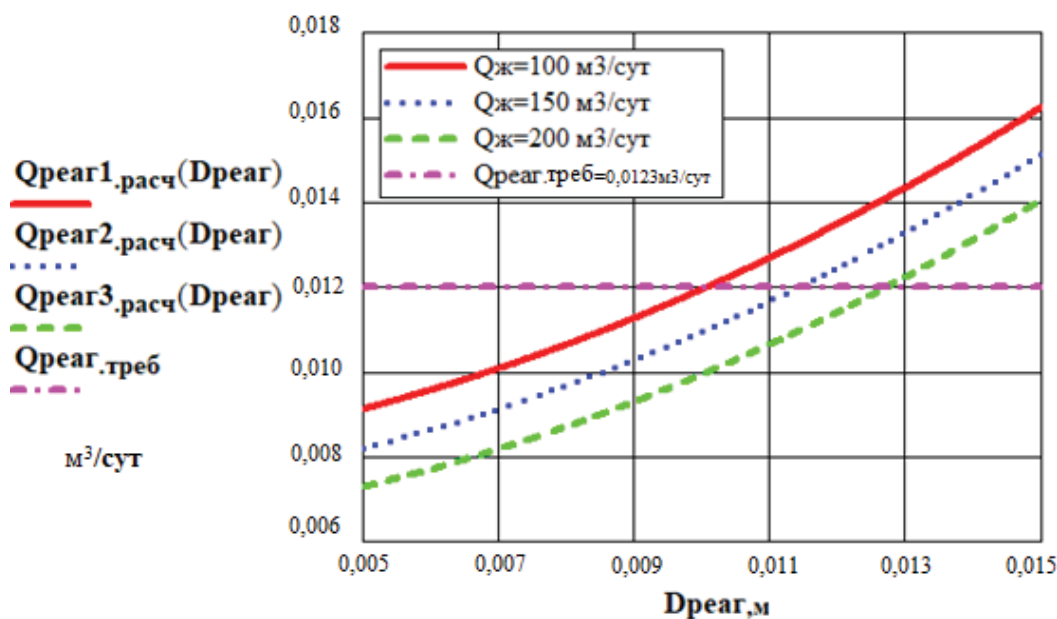


Рис. 5. Зависимость расчетного расхода реагента от диаметра проходного отверстия насоса D_4 , дозирующего реагент

Fig. 5. Dependence of the calculated reagent flow rate on the diameter of the through-hole of the pump D_4 dosing the reagent

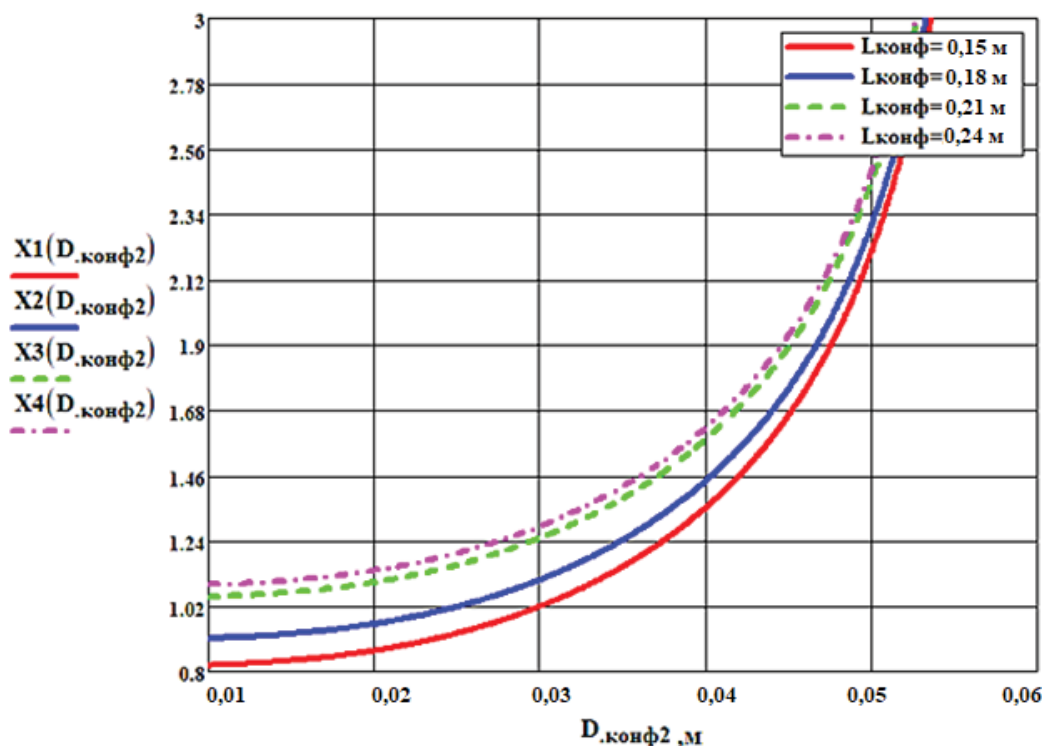


Рис. 6. Зависимость коэффициента кавитации в конфузоре от его выходного диаметра (диаметра камеры смешения) при различных значениях длины

Fig. 6. Dependence of the cavitation coefficient in the confuser on its output diameter (mixing chamber diameter) at different length values

Выводы

1. Разработана математическая модель работы скважинной дозирующей установки для подачи реагента – ингибитора АСПО – в полость НКТ. На основе представленного анализа получено, что значительное влияние на расход дозировочного реагента оказывают такие конструктивные параметры разработанной установки, как диаметр камеры смешения, диаметр проходного сечения насоса, дозирующего реагент.
2. Показано, что кривая зависимости объемного расхода реагента от диаметра камеры смешения имеет максимум, соответствующий диаметру камеры смешения порядка 0,022 м. При увеличении диаметра камеры смешения более 0,022 м объемный расход реагента снижается вследствие увеличения эффективного сечения и снижения скорости потока, в результате чего снижается степень местного понижения давления согласно формуле Бернулли. При снижении диаметра камеры смешения ниже 0,022 м расход реагента падает вследствие увеличения скорости потока в камере и возрастания гидравлических сопротивлений. Максимальный расход реагента при увеличении диаметра входного отверстия насоса D_4 от 0,005 до 0,013 мм возрастает от 0,0138 до 0,0155 м³/сут (на 12,5 %).
3. Установлено, что увеличение подачи УЭЦН в рассмотренном диапазоне 100–200 м³/сут практически не оказывает влияния на расход реагента при значении диаметра камеры смешения более 0,03 м. При снижении диаметра смешения ниже 0,03 м увеличение подачи приводит к снижению объемного расхода реагента, связанного с увеличением гидравлических сопротивлений в струйном насосе, например, при подаче насоса порядка 200 м³/сут снижение диаметра камеры смешения с 0,03 до 0,01 м приводит к снижению объемного расхода реагента с 0,012–0,013 до 0,004 м³/сут, т. е. более чем в 2 раза. Учитывая, что дебит жидкости и, соответственно, подача насоса могут изменяться в процессе эксплуатации скважины, для обеспечения стабильного расхода реагента диаметр камеры смешения рационально выбирать более 0,03 м, так как в этом случае расход реагента практически не чувствителен к изменению подачи насоса.
4. Показано, что при значениях длины конфузора, превышающих 0,21 м, коэффициент кавитации вне зависимости от диаметра камеры смешения превышает единицу, что говорит о плавном и равномерном снижении давления в корпусе устройства.

5. Зависимость расхода реагента от диаметра проходного отверстия насоса D_4 , дозирующего реагент, имеет параболический вид с ветвью, направленной вверх: при увеличении D_4 расход реагента возрастает вследствие снижения местных гидравлических сопротивлений в от-
верстии, дозирующем реагент. Подача насоса оказывает небольшое влияние на расход реагента: при увеличении подачи от 100 до 200 м³/сут максимальный расход реагента возрастает с 0,014 до 0,016 м³/сут (на 7 %).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Повышение эффективности добычи нефти за счет внедрения элементов цифровизации / В.Н. Ивановский, А.А. Сабилов, А.В. Деговцов, И.Н. Герасимов, И.И. Мазенин, С.В. Меркушев, Д.Н. Красноборов // Нефтяное хозяйство. – 2021. – № 7. – С. 118–124.
2. Рогачев М.К., Александров А.Н. Обоснование комплексной технологии предупреждения образования асфальтосмолопарафиновых отложений при добыче высокопарафинистой нефти погружными электроцентробежными насосами из многопластовых залежей // Записки Горного института. – 2021. – Т. 250. – С. 596–605.
3. Modeling of heavy-oil flow with regard to their rheological properties / I.I. Beloglazov, V.A. Morenov, E.L. Leusheva, O.T. Gudmestad // Energies. – 2021. – № 359. – P. 1–15.
4. Коробов Г.Ю., Парфенов Д.В. Механизмы образования ас-фальтосмолопарафиновых отложений. Методики исследования // Деловой журнал Neftegaz.ru. – 2022. – № 8 (128). – С. 22–28.
5. Коробов Г.Ю., Парфенов Д.В., Нгуен Ван Тханг. Механизмы образования асфальтосмолопарафиновых отложений и факторы интенсивности их формирования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 4. – С.103–116.
6. Podoprigora D., Byazrov R., Sytnik J. The comprehensive over-view of large-volume surfactant slugs injection for enhancing oil recovery: status and the outlook // Energies. – 2022. – Vol. 15. – № 21:830. – P. 1–21.
7. Litvinenko V.S. Advances in raw material industries for sustainable development goals / United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, International Competence Centre for Mining-Engineering Education under the auspices of UNESCO. – London: CRC Press, 2021. – 528 p.
8. Gabor T. Electrical submersible pumps manual: design, operations, and maintenance. – Houston, Texas: Gulf Professional Publishing, 2017. – 562 p.
9. Уразаков К.Р., Макарова Т.Г., Лощакова Э.У. Предупреждение образования асфальтосмолопарафиновых отложений в насосно-компрессорных трубах. – Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт, 2023. – 41 с.
10. Иванова Л.В., Буров Е.А., Кошелев В.Н. Асфальтосмолопарафиновые отложения в процессах добычи, транспорта и хранения // Нефтегазовое дело. – 2011. – № 1. – С. 268–280.
11. Sousa L.A., Matos H.A., Guerreiro L.P. Preventing and removing wax deposition inside vertical wells: a review // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2019. – Vol. 9. – P. 2091–2107.
12. Lim B. et al. A review of the mechanism and role of wax inhibitors in the wax deposition and precipitation // Science and Technology. – 2019. – Vol. 27. – № 1. – P. 499–526.
13. Bai J., Jin X., Wu J.T. Multifunctional anti-wax coatings for paraffin control in oil pipelines // Petroleum Science. – 2019. – Vol. 16. – P. 619–631.
14. Khaibullina K.S., Sagirova L.R., Sandyga M.S. Substantiation and selection of an inhibitor for preventing the formation of asphaltresin-paraffin deposits // Periodico Tche Quimica. – 2020. – Vol. 17. – № 34. – P. 541–551.
15. Yang F. et al. Investigation on the mechanism of wax deposition inhibition induced by asphaltenes and wax inhibitors // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2021. – Vol. 204. – P. 109723.
16. Скважинная дозирующая насосная установка для предотвращения отложений: пат. Рос. Федерация № 2752569; заявл. 25.02.2021; опубл. 29.07.2021, Бюл. № 22. – 6 с.
17. Girgidov A.D. Efficiencies of jet pumps // Power Technology and Engineering. – 2015. – Vol. 48. – Iss. 5. – P. 366–370.
18. Математическая модель работы струйного насоса в составе скважинной tandemной установки / Б.А. Мырзахметов, Л.А. Крупник, А.Е. Султабаев, С.М. Токтамисова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 8. – С. 123–135.
19. 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.
20. Brill J.P., Mukherjee H. Multiphase flow in wells. – Richardson, Texas: Society of petroleum engineers, 1999. – 384 p.
21. Математическое моделирование параметров системы «УЭЦН-струйный насос» / Т.Г. Макарова, К.Р. Уразаков, О.А. Шипилова, Э.М. Хасаншина // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2022. – № 15. – С. 79–84.

Информация об авторах

Камил Рахматуллович Уразаков, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры машин и оборудования нефтегазовых промыслов Уфимского государственного нефтяного технического университета, Россия, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1. urazakk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2202-396X>
Татьяна Георгиевна Макарова, старший преподаватель кафедры нефтегазового оборудования и технологии машиностроения Альметьевского государственного нефтяного института, Россия, 423462, г. Альметьевск, ул. Ленина, 2. dtana@mail.ru

Александр Олегович Борисов, магистрант, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1. WOT_BAX_BAX@mail.ru

Поступила в редакцию: 01.08.2023

Поступила после рецензирования: 24.10.2023

Принята к публикации: 26.04.2024

REFERENCES

1. Ivanovskiy V.N., Sabirov A.A., Degovtsov A.V., Gerasimov I.N., Merkushev S.V., Krasnoborov D.N. Improving the efficiency of oil production through the introduction of digitalization. *Oil Industry*, 2021, no. 7, pp. 118–124. (In Russ.)
2. Rogachev M.K., Aleksandrov A.N. Justification of a comprehensive technology for preventing the formation of asphalt-resin-paraffin deposits during the production of highly paraffinic oil by electric submersible pumps from multiformation deposits. *Journal of Mining Institute*, 2021, vol. 250, pp. 596–605. (In Russ.)
3. Beloglazov I.I., Morenov V.A., Leusheva E.L., Gudmestad O.T. Modeling of heavy-oil flow with regard to their rheological properties. *Energies*, 2021, no. 359, pp. 1–15.
4. Korobov G.Yu., Parfenov D.V. Mechanisms of the formation of asphalt-resin-paraffin deposits. Research methods. *Neftegaz.ru*, 2022, no. 8 (128), pp. 22–28. (In Russ.)
5. Korobov G.Y., Parfenov D.V., Thang Nguyen Van. Mechanisms of the formation of asphalt-resin and paraffin deposits and factors influencing their intensity. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 4, pp. 103–116. (In Russ.)
6. Podoprighora D., Byazrov R., Sytnik J. The comprehensive overview of large-volume surfactant slugs injection for enhancing oil recovery: status and the outlook. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 21:8300, pp. 1–21.
7. Litvinenko V.S. Advances in raw material industries for sustainable development goals. *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, International Competence Centre for Mining-Engineering Education under the auspices of UNESCO*. London, CRC Press Publ., 2021. 528 p.
8. Gabor T. *Electrical submersible pumps manual: design, operations, and maintenance*. Houston, Texas, Gulf Professional Publ., 2017. 562 p.
9. Urazakov K.R., Makarova T.G., Loshhakova E.U. *Prevention of the formation of asphalt-resin-paraffin deposits in pumping and compressor pipes*. Almet'yevsk, Almet'yevsk State Oil Institute Publ., 2023. 41 p. (In Russ.)
10. Ivanova L.V., Burov E.A., Koshelev V.N. Asphaltene-resin-paraffin deposits in the processes of oil production, transportation and storage. *Petroleum Engineering*, 2011, no. 1, pp. 268–280. (In Russ.)
11. Sousa A.L., Matos H.A., Guerreiro L.P. Preventing and removing wax deposition inside vertical wells: a review. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2019, vol. 9, no. 3, pp. 2091–2107.
12. Lim B. A review of the mechanism and role of wax inhibitors in the wax deposition and precipitation. *Science and Technology*, 2019, vol. 27, no. 1, pp. 499–526.
13. Bai J., Jin X., Wu J.T. Multifunctional anti-wax coatings for paraffin control in oil pipelines. *Petroleum Science*, 2019, vol. 16, pp. 619–631.
14. Khaibullina K.S., Sagirova L.R., Sandyga M.S. Substantiation and selection of an inhibitor for preventing the formation of asphalt-resin-paraffin deposits. *Periodico Tche Quimica*, 2020, vol. 17, no. 34, pp. 541–551.
15. Yang F. Investigation on the mechanism of wax deposition inhibition induced by asphaltenes and wax inhibitors. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, vol. 204, pp. 109723.
16. Urazakov K.R., Makarova T.G., Dumler E.B., Vahitova R.I., Borisov A.O. *Borehole metering pumping unit to prevent deposits*. Patent RF, no. 2752569, 2021. (In Russ.)
17. Girgidov A.D. Efficiencies of jet pumps. *Power Technology and Engineering*, 2015, vol. 48, Iss. 5, pp. 366–370.
18. Myrzahmetov B. A., Krupnik L. A., Sultabaev A. E., Toktamisova S. M. Mathematical model of the jet pump operation as part of a borehole tandem installation. *Mining information and analytical bulletin*, 2019, no. 8, pp. 123–135. (In Russ.)
19. Urazakov K.R., Muhin I.A., Vahitova R.I., Sarycheva D.A., Volkov I.V. Research characteristics of jet pump using numerical simulation. *Petroleum Engineering*, 2015. vol. 13, no. 14, pp. 149–154. (In Russ.)
20. Brill J.P., Mukherjee H. *Multiphase flow in wells*. Richardson, Texas, Society of petroleum engineers, 1999. 384 p.
21. Makarova T.G., Urazakov K.R., Shipilova O.A., Khasanshina E.M. Mathematical modeling of parameters of the system "ESP-jet pump". *Transport, mining and construction engineering: science and production*, 2022, no. 15, pp. 79–84. (In Russ.)

Information about the authors

Kamil R. Urazakov, Dr. Sc., Professor, Ufa State Petroleum Technological University, 1, Kosmonavtov street, Ufa, 450062, Russian Federation. Urazakk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2202-396X>

Tatiana G. Makarova, Senior Lecturer, Almet'yevsk State Oil Institute, 2, Lenin street, Almet'yevsk, 423462, Russian Federation. dtana@mail.ru

Alexander O. Borisov, Master's Student, Ufa State Petroleum Technological University, 1, Kosmonavtov street, Ufa, 450062, Russian Federation. WOT_BAX_BAX@mail.ru

Received: 01.08.2023

Revised: 24.10.2023

Accepted: 26.04.2024

УДК 622.276.74

DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4368

Шифр специальности ВАК: 2.8.4

Прогнозирование безаварийной работы добывающих скважин с горизонтальным окончанием в условиях высокого выноса механических примесей на примере Северо-Комсомольского месторождения

О.В. Савенок^{1✉}, Н.Х. Жарикова¹, А.Е. Верисокин², А.-Г.Г. Керимов², А.С. Арутюнян³

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Россия, г. Санкт-Петербург

² Северо-Кавказский федеральный университет, Россия, г. Ставрополь

³ Кубанский государственный технологический университет, Россия, г. Краснодар

✉ Savenok_OV@pers.spmi.ru

Аннотация. Актуальность. По мере выработки запасов легкодоступной нефти и развития технологий добычи нефтегазодобывающие компании постепенно переходят к разработке ранее нерентабельных активов. За последние пять лет в Западной Сибири в эксплуатацию были введены несколько нефтегазоконденсатных месторождений с нефтяными оторочками, разработка которых дополнительно осложняется высокой вязкостью нефти и слабой цементированностью пород продуктивного пласта. Низкие значения критической депрессии не позволяют добывать нефть без разрушения продуктивного пласта, а поступающие в скважину механические примеси приводят к перекапанию интервалов перфорации и отказам внутрискважинного оборудования. Использование математического моделирования применительно к работе скважин в условиях выноса механических примесей позволит контролировать процесс добычи и выбирать оптимальный режим работы скважины. **Цель:** прогнозирование безаварийной работы добывающей скважины в условиях высокого выноса механических примесей. **Объекты:** добывающие нефтяные скважины; предметом исследования является движение твёрдых частиц в стволе добывающей скважины, связи и зависимости процесса образования песчаных пробок от режимных параметров работы скважины. **Методы:** теоретические методы исследования – анализ (анализ моделей расчёта критической скорости потока в горизонтальной трубе (расчёт критической скорости в однофазном потоке; расчёт критической скорости в многофазном потоке; расчёт критической скорости на основе баланса сил)) и моделирование (моделирование работы скважины с выносом механических примесей). Совокупность и сочетание данных методов адекватны цели и задачам, объекту и предмету исследования данной работы. **Результаты.** Проблема выноса песка характерна не только для месторождений, находящихся на поздних стадиях разработки, но и для месторождений, недавно введённых в эксплуатацию. Пескопроявления являются осложняющим фактором при эксплуатации скважин на Северо-Комсомольском месторождении высоковязкой нефти, расположенном в Западной Сибири. Основным объектом разработки изучаемого месторождения является слабосцементированный песчаный пласт. Добыча нефти на столь сложных участках требует тщательного подхода к выбору системы разработки, к подбору методов борьбы с осложнениями, в том числе и к выбору правильного способа для ограничения пескопроявлений. Тем не менее, независимо от подхода, применяемого для решения проблемы выноса песка, какая-то часть горной породы всё равно будет поступать в скважину. Для предотвращения образования песчаных пробок необходимо понимать характер движения твёрдых частиц вдоль ствола. Оценить, способна ли скважина обеспечивать вынос твёрдых частиц из горизонтального участка, можно с помощью моделирования в специализированных программных продуктах. Моделирование работы скважины с учётом влияния механических примесей позволило решить следующие задачи: 1) определить способность флюида выносить частицы породы из горизонтального участка; 2) определить зоны, в которых есть риск образования песчаных пробок; 3) представить зависимость для расчёта критической скорости для высоковязкой нефти с разной долей обводнённости; 4) оценить, как обводнённость и газовый фактор влияют на работу скважины в условиях высокого выноса механических примесей; 5) рассчитать время образования песчаных пробок.

Ключевые слова: моделирование работы скважины с выносом механических примесей, модель флюида и модель скважины, поступление твёрдых частиц в скважину через фильтр, определение режима движения песка в скважине, влияние обводнённости продукции на работу скважины, влияние газа на работу скважины, влияние количества твёрдых частиц на перенос песка, определение критической скорости потока

Для цитирования: Прогнозирование безаварийной работы добывающих скважин с горизонтальным окончанием в условиях высокого выноса механических примесей на примере Северо-Комсомольского месторождения / О.В. Савенок, Н.Х. Жарикова, А.Е. Верисокин, А.-Г.Г. Керимов, А.С. Арутюнян // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 6. – С. 223–239. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4368

UDC 622.276.74

DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4368

Prediction of emergency-free operation of production wells with a horizontal termination under conditions of high removal of mechanical impurities on the example of the Severo-Komsomolskoe field

O.V. Savenok^{1✉}, N.Kh. Zharikova¹, A.E. Verisokin², A.-G.H. Kerimov², A.S. Arutyunyan³

¹ Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

² North Caucasian Federal University, Stavropol, Russian Federation

³ Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation

✉ Savenok_OV@pers.spmi.ru

Abstract. Relevance. As readily available oil reserves are developed and production technologies development, oil and gas companies are gradually moving to exploration of previously unprofitable assets. Over the past five years, several oil-and-gas condensate fields with oil rims have been put into operation in Western Siberia. Their development is further complicated by oil high viscosity and poor cementation of the reservoir rocks. Low values of critical drawdown do not allow oil to be produced without destruction of the productive formation, and mechanical impurities entering the well lead to spillage of perforation intervals and downhole equipment failures. The use of mathematical modeling in relation to the operation of wells in the conditions of the removal of mechanical impurities will make it possible to control production and select the optimal well operation mode. **Aim.** Forecasting the trouble-free operation of a production well under conditions of high removal of mechanical impurities. **Objects.** Producing oil wells; the subject of the study is the movement of solid particles in the wellbore of a production well, the relationship and dependence of formation of sand plugs on the operating parameters of the well. **Methods.** Theoretical research methods – *analysis* (analysis of models for calculating the critical flow velocity in a horizontal pipe (calculation of the critical velocity in a single-phase flow; calculation of the critical velocity in a multi-phase flow; calculation of the critical velocity based on the balance of forces)) and *modeling* (simulation of work wells with the removal of mechanical impurities). The totality and combination of these methods are adequate to the goals and objectives, the object and subject of the study of this work. **Results.** The problem of sand production is typical not only for fields that are in the late stages of development, but also for fields that have recently been put into operation. Sand shows up are a complicating factor in the operation of wells at the Severo-Komsomolskoe high-viscosity oil field located in Western Siberia. The main object of development of the studied field is a weakly cemented sandy layer. Oil production in such difficult areas requires a very careful approach to the choice of development system, to the selection of methods to deal with complications, including the choice of the right method to limit sanding. However, regardless of the approach taken to solve the problem of sand production, some rock will still flow into the well. To prevent the formation of sand plugs, it is necessary to understand the nature of the movement of solid particles along the wellbore. It is possible to assess whether a well is capable of carrying out solid particles from a horizontal section using modeling in specialized software products. Modeling of the well operation, taking into account the influence of mechanical impurities, made it possible to solve the following problems: 1) determine the fluid to carry rock particles out of the horizontal section; 2) identify the areas in which there is a risk of sand plugs; 3) present the dependence for calculating the critical speed for high-viscosity oil with different water cut; 4) assess how the water cut and gas factor affect well operation in conditions of high removal of mechanical impurities; 5) calculate the time of formation of sand plugs.

Keywords: modeling well operation with the removal of mechanical impurities, fluid model and well model, entry of solid particles into the well through the filter, determination of the mode of sand movement in the well, water cut impact on well operation, gas impact on well operation, impact of the amount of solid particles on sand transport, critical flow rate determination

For citation: Savenok O.V., Zharikova N.Kh., Verisokin A.E., Kerimov A.-G.H., Arutyunyan A.S. Prediction of emergency-free operation of production wells with a horizontal termination under conditions of high removal of mechanical impurities on the example of the Severo-Komsomolskoe field. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 6, pp. 223–239. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4368

Общие сведения о месторождении

В административном отношении Северо-Комсомольское месторождение расположено в Надымском и Пуровском районах Ямало-Ненецкого автономного округа Тюменской области, характеризующихся относительно развитой инфраструктурой.

Месторождение открыто в 1989 г. С 2003 г. в разработку введены запасы нефти и газа второстепенных пластов месторождения. На основном объекте разработки – пласте ПК₁ – проводились опытно-промышленные работы в 2000–2012 и в 2016–2021 гг.

Северо-Комсомольское месторождение является многопластовым. В результате проведенных исследований в геологическом разрезе месторождения выделено 80 залежей углеводородов, в том числе 34 газовых, 18 газонефтяных и 28 нефтяных. Из них 31 залежь признаны газоконденсатными. Существенная тектоническая нарушенность месторождения обусловила сложный структурно-тектонический тип этих залежей, представляющий собой сочетание массивного, пластового, сводового и тектонически-экранированного типов [1].

Таблица 1. Геолого-физическая характеристика пласта ПК₁

Table 1. Geological and physical characteristics of the PK₁ layer

Параметры, размерность Parameters, dimension	Значения Values
Средняя глубина залегания кровли, м Average roof depth, m	1056–1134
Абсолютная отметка ВНК, м Absolute mark of water-oil contact, m	1032–1045
Абсолютная отметка ГНК, м Absolute mark of gas-oil contact, m	1020,7–1025,6
Тип коллектора/Collector type	терригенный, поровый terrigenous, porous
Общая толщина, м/Total thickness, m	91,7
Средняя эффективная нефтенасыщенная толщина, м Average effective oil-saturated thickness, m	8,2
Средняя эффективная газонасыщенная толщина, м Average effective gas-saturated thickness, m	12,6
Коэффициент пористости, доли ед. Porosity coefficient, units	0,33
Коэффициент песчаности, доли ед. Sandiness coefficient, units	0,66
Коэффициент расчленённости, доли ед. Dismemberment coefficient, units	33,1
Коэффициент нефтенасыщенности пласта, доли ед. Reservoir oil saturation coefficient, units	0,58
Коэффициент газонасыщенности пласта, доли ед. Reservoir gas saturation coefficient, units	0,55
Проницаемость, мкм ² /Permeability, μm ²	0,15–1,489
Начальная пластовая температура Initial reservoir temperature, °C	34,0
Начальное пластовое давление, Мпа Initial reservoir pressure, MPa	12,56

Основным объектом разработки в настоящий момент является пласт ПК₁. Залежь является водоплавающей, представлена нефтяной оторочкой повышенной вязкости и обширной газовой шапкой. Пласт представлен в основном рыхлыми песками и слабосцементированными песчаниками с многочисленными тонкослоистыми и часто прерывистыми прослоями глинистых пород. Сводная геолого-физическая характеристика пласта ПК₁ Северо-Комсомольского месторождения представлена в табл. 1.

Высокие фильтрационно-емкостные свойства пласта ПК₁ предполагают упруговодонапорный режим залежи. Однако активность данного режима существенно снижена в связи с содержанием в этой залежи нефти высокой вязкости [2–4].

Моделирование работы скважины с выносом механических примесей

Для моделирования работы добывающей скважины с горизонтальным окончанием в условиях высокого выноса механических примесей необходимо предварительно составить модель флюида и модель скважины. Все расчёты проведены в динамическом симуляторе мультифазного потока OLGA, где есть модуль, позволяющий учитывать наличие твёрдых частиц [5–7].

Модель флюида

Для моделирования любого процесса нефтедобычи необходимо создавать PVT-модель флюида. Воспользуемся программой Multiflash, которая интегрирована с программным обеспечением OLGA.

Исходными данными для построения PVT-модели высоковязкой нефти пласта ПК₁ Северо-Комсомольского месторождения является компонентный состав пластовой нефти и свойства пластовой и дегазированной нефти пласта.

Для созданной модели нефти скорректировано давление насыщения до принятого значения 12,56 МПа (при температуре 34 °C). Зависимость давления насыщения от температуры для модели флюида представлена на рис. 1.

Убедимся, что созданная PVT-модель высоковязкой нефти достоверно отображает свойства пластовой нефти. Для этого сравним результаты, полученные по итогам моделирования, с данными лабораторных испытаний (табл. 2).

Как можно заметить, значения вязкости и плотности нефти несколько отличаются от средних значений, принятых технологической схемой разработки месторождения, тем не менее находятся в диапазоне измеренных значений. Таким образом, можно считать, что созданная PVT-модель достоверно отражает свойства нефти пласта ПК₁ Северо-Комсомольского месторождения и может быть применима для дальнейших расчётов [8–10].

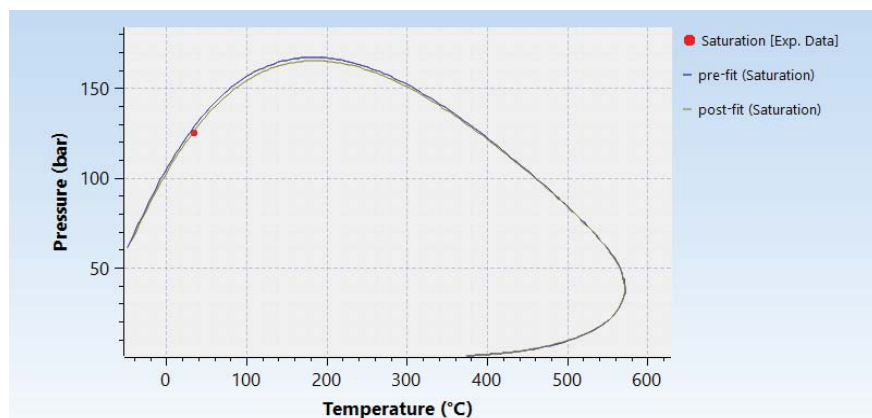


Рис. 1. Зависимость давления насыщения от температуры

Fig. 1. Saturation pressure versus temperature

Таблица 2. Сравнение созданной PVT-модели с лабораторными данными

Table 2. Comparison of the created PVT model with laboratory data

Свойства/Properties	Пластовая нефть Reservoir oil		Модель Model
	диапазон значений value range	среднее значение average value	
Давление насыщения пластовой нефти, МПа Reservoir oil saturation pressure, MPa	6,04–10,60	12,56	12,56
Плотность нефти в условиях пласта, кг/м³ Oil density in reservoir conditions, kg/m³	887–932	915	914,18
Вязкость нефти в условиях пласта, мПа·с Oil viscosity in reservoir conditions, mPa·s	33,9–112,2	71,6	62,42
Плотность нефти в стандартных условиях, кг/м³ Oil density under standard conditions, kg/m³	927–960	947	957,5
Вязкость дегазированной нефти в стандартных условиях, мПа·с Degassed oil viscosity under standard conditions, mPa·s	141,5–1885,0	841,9	708,35

Модель скважины

Для построения модели добывающей скважины необходимы данные о траектории скважины (рис. 2), конструкции колонны (рис. 3) и сведения о внутрискважинном оборудовании (табл. 3, 4).

Таблица 3. Данные о скважинном фильтре

Table 3. Well filter data

Тип фильтра/Filter type	Проволочный/Wire
Размер зазора, мкм/Gap size, μm	150

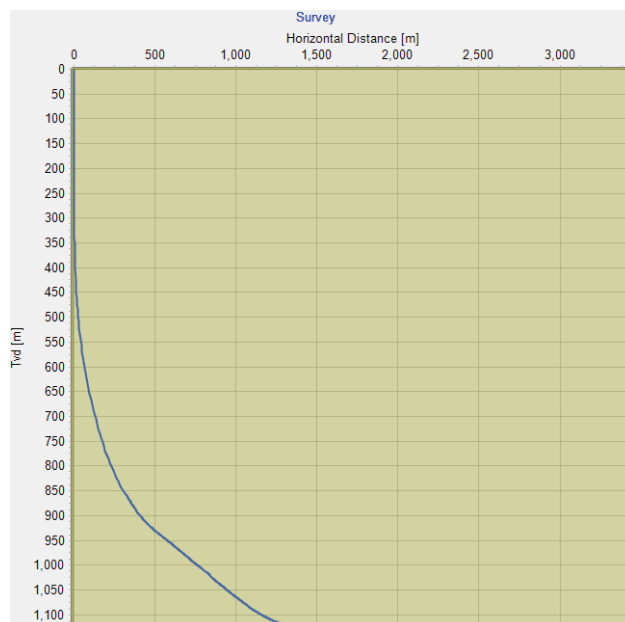


Рис. 2. Траектория скважины № 1 Северо-Комсомольского месторождения

Fig. 2. Well no. 1 trajectory of the Severo-Komsomolskoe field

Таблица 4. Параметры работы насоса

Table 4. Pump parameters

Марка насоса Pump brand	УЭЦН-5А-160-1600 Installation of an electric centrifugal pump 5A-160-1600
Глубина установки насоса, м Pump installation depth, m	1607
Фактическая вертикальная глубина установки насоса, м Actual vertical depth of pump installation, m	1043
Номинальная подача, м³/сут. Nominal flow, m³/day	160
Номинальный напор, м/Nominal head, m	1600
Количество ступеней, шт. Number of steps, pcs.	334
Частота работы насоса, Гц Pump frequency, Hz	40

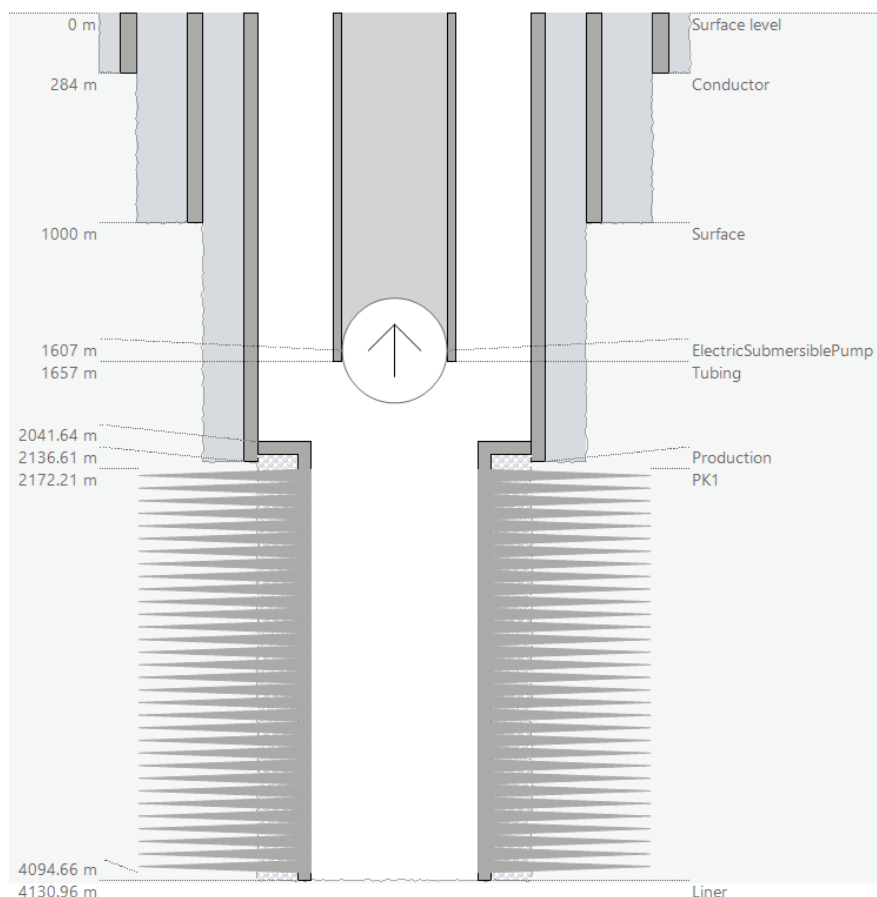


Рис. 3. Конструкция скважины № 1 Северо-Комсомольского месторождения

Fig. 3. Design of well no. 1 of the Severo-Komsomolskoe field

Приток жидкости в скважину поступает равномерно вдоль горизонтального участка длиной ~2000 м [11–13].

Работа скважины смоделирована в программном комплексе OLGA. Согласно результатам моделирования, дебит жидкости стабилизируется на

уровне 115 м³/сут. (рис. 4). Текущий дебит скважины № 1 Северо-Комсомольского месторождения составляет 116 м³/сут. Таким образом, можно считать, что созданная модель достоверно отражает режим работы скважины.

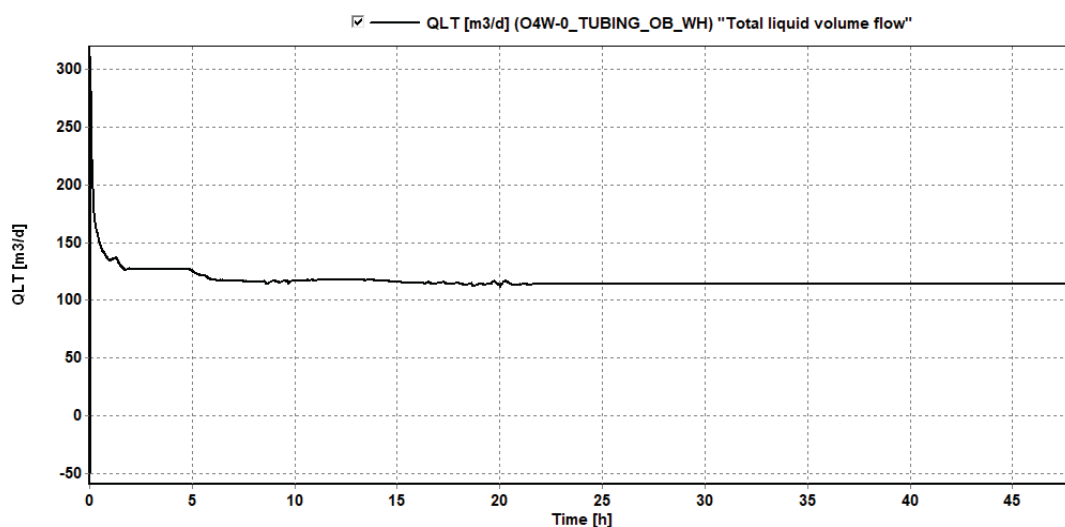


Рис. 4. Дебит жидкости по скважине № 1 Северо-Комсомольского месторождения

Fig. 4. Fluid flow rate for well no. 1 of the Severo-Komsomolskoe field

Таблица 5. Размер частиц D90 (мкм), проходящих через фильтр при фильтрации смеси

Table 5. Particle size D90 (μm) passing through the filter when filtering the mixture

Размер зазора, мкм/Gap size, μm	Состав смеси, об./об./Mixture composition, vol./vol.						
	нефть/oil	нефть/вода/oil/water			нефть/газ/oil/gas		
	%						
	100	90/10	50/50	30/70	70/30	50/50	10/90
75	67,132	61,982	44,561	50,992	38,213	13,933	73,166
100	37,707	90,143	60,137	41,698	34,563	20,967	42,156
150	92,653	72,069	100	69,954	41,698	41,681	46,379
200	64,503	83,609	83,609	91,491	87,352	67,615	44,106

Поступление твёрдых частиц в скважину через фильтр

Для продуктивного пласта ПК₁ Северо-Комсомольского месторождения характерно высокое содержание мелких частиц. На Северо-Комсомольском месторождении используются проволочные скважинные фильтры, устанавливаемые при заканчивании. Размер зазора на фильтре составляет 75, 100, 150 или 200 мкм и подбирается в зависимости от геологических условий [14, 15].

При проведении лабораторных исследований замечено, что размер частиц, проходящих через фильтр, зависит не только от размера зазора на фильтре, но и от состава фильтруемого флюида. Проведены тесты для смесей в различных соотношениях (нефть/вода и нефть/газ), и определён размер зёрен D90 (90 % частиц, проходящих через фильтр, будут иметь меньший диаметр). Результаты лабораторных исследований приведены в табл. 5.

В дальнейших расчётах диаметр частиц, проходящих через фильтр, будет приниматься согласно данным, представленным в табл. 5.

Определение режима движения песка в скважине

В настоящий момент на скважине № 1 Северо-Комсомольского месторождения установлен проволочный фильтр с размером зазора 150 мкм [16–18]. В текущих условиях (при обводнённости продукции 4 %) в скважину попадают частицы размером ~72 мкм (согласно данным лабораторных испытаний) (табл. 5). Для моделирования процесса переноса песка в скважине необходимо задать параметры механических примесей (табл. 6).

Таблица 6. Характеристика твёрдых частиц

Table 6. Characterization of solid particles

Показатель Index	Среднее значение Average value
КВЧ, мг/л Amount of suspended particles, mg/l	525
Концентрация песка, об./об. Sand concentration, vol./vol.	0,00025
Размер частицы, мкм/Particle size, μm	72
Плотность частиц, кг/м ³ Particle density, kg/m ³	2650

При работе скважины с дебитом жидкости, установившимся на уровне 115 м³/сут., в скважине будет следующий режим движения песка (рис. 5). Красным цветом на графике регистрируется режим песка: 1 – неподвижный песок; 2 – движение песка по дну трубы; 3 – суспензия (все твёрдые частицы уносятся потоком); чёрным цветом обозначена геометрия скважины.

Режим неподвижного песка наблюдается на половине горизонтального участка, ближе к носку скважины, и в нижней части эксплуатационной колонны (где происходит резкое снижение скорости жидкости вследствие перехода потока из хвостовика с диаметром 99 мм в эксплуатационную колонну с диаметром 161 мм). Соответственно при работе скважины в таком режиме песок неизбежно будет накапливаться в горизонтальном окончании. Данный факт впоследствии приведёт к пересыпанию продуктивного интервала и постепенному снижению дебита [19–22].

Влияние обводнённости продукции на работу скважины в условиях выноса механических примесей

Чтобы оценить влияние обводнённости на работу скважин и движение твёрдых частиц вдоль ствола скважины, проведём серию модельных исследований в программном обеспечении OLGA.

Рост обводнённости с 4 до 50 % приводит к увеличению дебита жидкости в скважине с 115 до 121 м³/сут. Дальнейший рост обводнённости до 70 % приведёт к ещё большему увеличению дебита до 164 м³/сут. При обводнённости 90 % дебит стабилизируется на уровне 177 м³/сут. Данный эффект связан со снижением общей вязкости перекачиваемой жидкости и, следовательно, с уменьшением нагрузки на УЭЦН.

По мере увеличения обводнённости склонность к образованию неподвижного слоя песка снижается. За счёт роста дебита увеличивается скорость жидкости в трубах, поэтому в горизонтальном стволе появляются зоны с подвижным песком. Таким образом, на большей длине скважины выполняется условие по обеспечению движения твёрдых частиц (рис. 6–8). Лучше всего песок переносится при обводнённости продукции ~70 %.

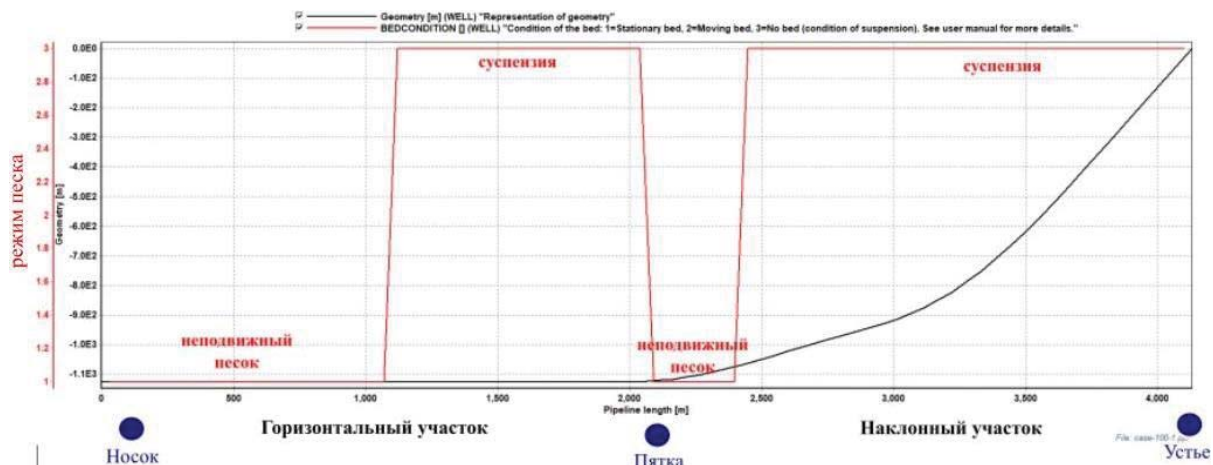


Рис. 5. Режим движения песка диаметром 72 мкм при дебите скважины 115 м³/сут.

Fig. 5. Mode of movement of sand with a diameter of 72 μm at a well flow rate of 115 m³/day

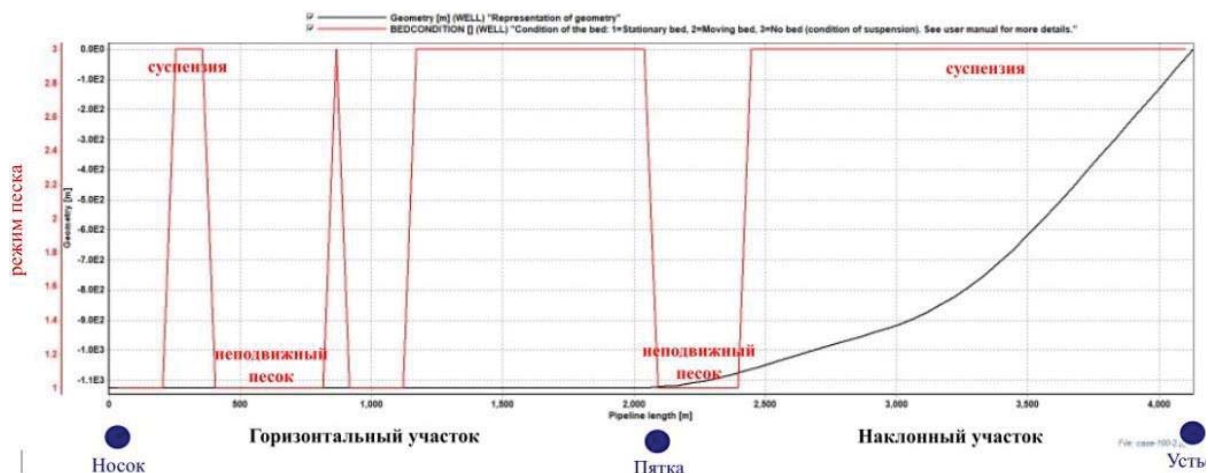


Рис. 6. Режим движения песка диаметром 100 мкм при дебите скважины 121 м³/сут. (обводнённость 50 %)

Fig. 6. Mode of movement of sand with a diameter of 100 μm at a well flow rate of 121 m³/day (water cut 50%)

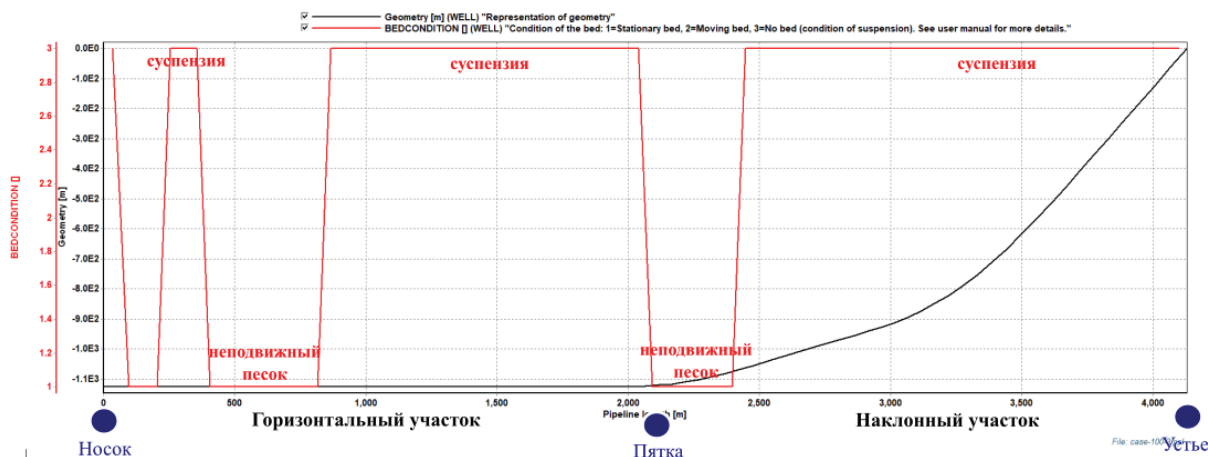


Рис. 7. Режим движения песка диаметром 69 мкм при дебите скважины 164 м³/сут. (обводнённость 70 %)

Fig. 7. Mode of movement of sand with a diameter of 69 μm at a well flow rate of 164 m³/day (water cut 70%)

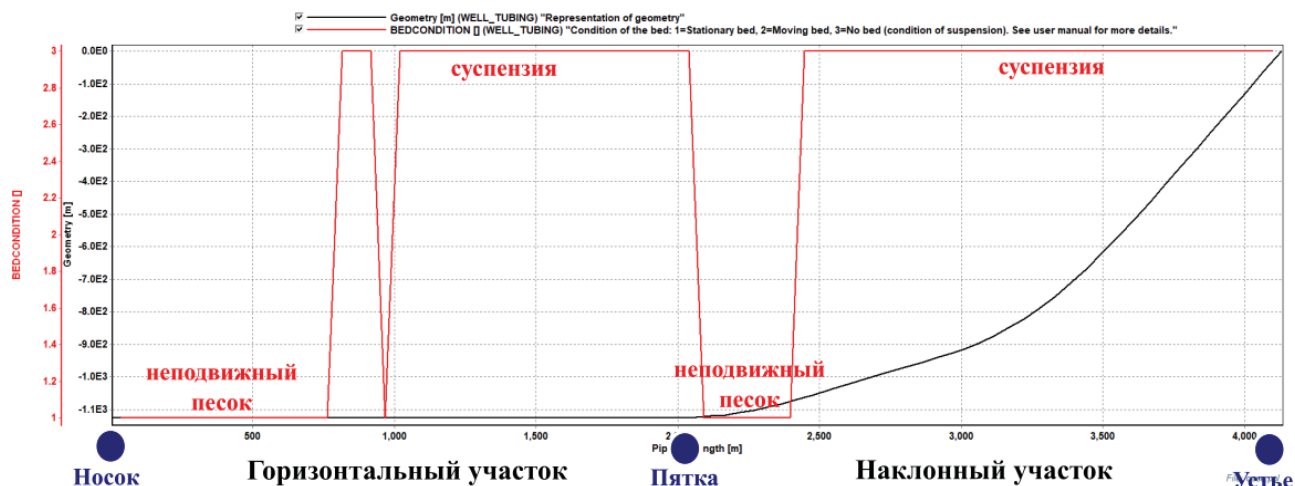


Рис. 8. Режим движения песка диаметром 70 мкм при дебите скважины 177 м³/сут. (обводнённость 90 %)
Fig. 8. Mode of movement of sand with a diameter of 70 μm at a well flow rate of 177 m³/day (water cut 90%)

Влияние газа на работу скважины в условиях выноса механических примесей

Для оценки влияния газа на транспорт песка в горизонтальном и наклонном участках скважины нами проведены следующие расчёты. При увеличении газового фактора с 49 до 100 м³/т произойдёт снижение дебита жидкости скважины до 71 м³/сут. Рост газового фактора приводит к увеличению количества свободного газа на приёме насоса и снижению КПД установки.

В связи с уменьшением дебита снижается средняя скорость потока жидкости в трубах, и её величина недостаточна для обеспечения переноса твёрдых частиц. Согласно расчётам, на всей длине горизонтального участка наблюдается режим неподвижного песка (рис. 9).

Работа скважины с высоким газовым фактором достаточно быстро приведёт к пересыпанию перфорационных отверстий, снижению дебита и образованию песчаной пробки. Дальнейшее увеличение газового фактора сверх 100 м³/т приведёт к срыву подачи насоса и полной остановке скважины [23–26].

Влияние количества твёрдых частиц на перенос песка

В рамках исследования оценивалось, как количество взвешенных частиц влияет на движение песка в скважине. Расчёты показали, что в диапазоне КВЧ от 200 до 2000 мг/л концентрация не влияет на перенос песка в стволе скважины (рис. 10).

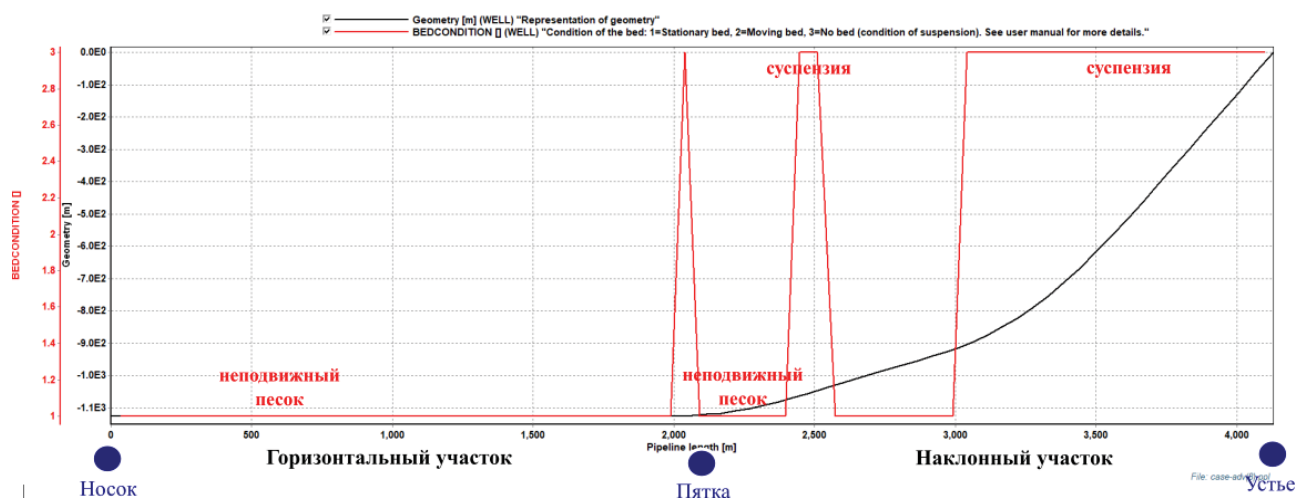


Рис. 9. Режим движения песка с диаметром 45 мкм при дебите скважины 71 м³/сут. (газовый фактор=100 м³/т)
Fig. 9. Mode of movement of sand with a diameter of 45 μm at a well flow rate of 71 m³/day (gas factor=100 m³/tons)



Рис. 10. Режим движения песка диаметром 72 мкм при дебите скважины 115 м³/сут. (концентрация взвешенных частиц=2000 мг/л)

Fig. 10. Mode of movement of sand with a diameter of 72 μm at a well flow rate of 115 m³/day (amount of suspended particles=2000 mg/l)

Таким образом, при росте количества песка, выносимого из пласта, ожидается образование песчаных дюн и пробок в тех же участках, что и при низком КВЧ. Однако следует ожидать, что накопление песка будет происходить быстрее и песчаная пробка образуется раньше [27, 28].

Определение критической скорости потока

Одной из задач исследования было определение критической скорости потока для условий Северо-Комсомольского месторождения. Все корреляции основываются на лабораторных испытаниях, проводимых для потока песка в воде. Физические характеристики воды значительно отличаются от характеристик нефти, в особенности высоковязкой нефти.

Более того, многие из рассматриваемых моделей адаптированы лишь для суспензий с высокими

концентрациями взвешенных частиц, например, пульп. Для нефтегазовой отрасли значение КВЧ в скважинах и трубопроводах намного ниже [29, 30].

Нами проведено параметрическое исследование для частиц различного диаметра при разной обводнённости и разном газовом факторе. Критическая скорость определялась графоаналитическим способом по графикам, построенным в результате математического моделирования (рис. 11). Чёрным цветом обозначена линия, показывающая объёмную долю частиц, оседающих на дно трубы; красным цветом обозначена скорость потока. Как видно из графика, при снижении скорости потока до 149 м/с частицы диаметром 300 мкм при обводнённости продукции 20 % начнут формировать неподвижный слой.

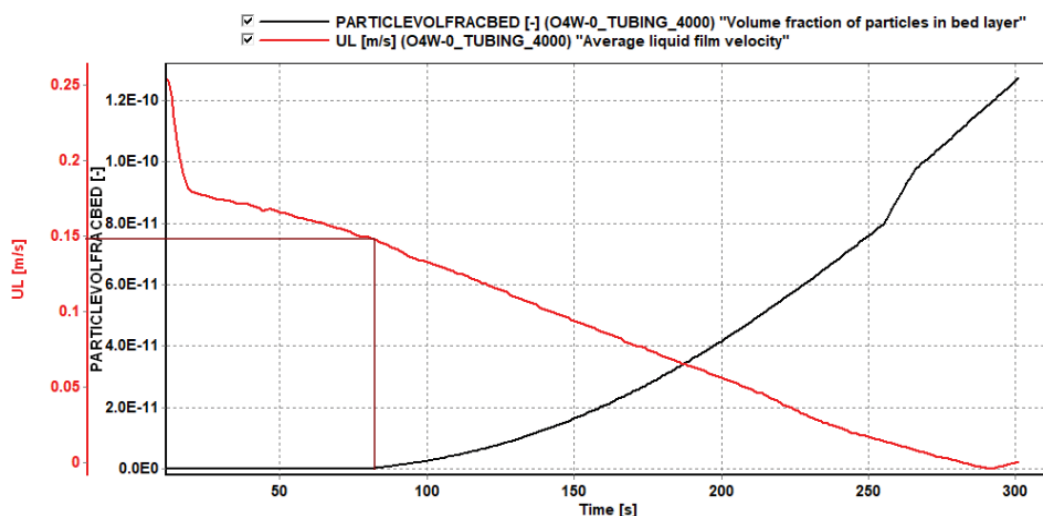


Рис. 11. Критическая скорость для песка диаметром 600 мкм и обводнённостью 0 %

Fig. 11. Critical speed for sand with a diameter of 600 μm and a water cut of 0%

Критическая скорость потока зависит как от размера частиц, так и от объёмной доли воды (рис. 12). При этом результаты, полученные при численном моделировании смеси «нефть–вода», идут вразрез с общепринятым мнением, что рост линейного размера частицы приводит к увеличению критической скорости потока.

Зарегистрированы следующие зависимости:

- 1) при течении чистой нефти (обводнённость 0 %) увеличение линейного размера зёрен песка приводит к росту критической скорости потока, что согласуется с общепринятым представлением о характере переноса песка;
- 2) для смесей с малым содержанием воды (обводнённость 5, 10, 20 %) критическая скорость не зависит от диаметра песчинок;
- 3) для высокообводнённой нефти (обводнённость 50, 70 %) критическая скорость не изменяется для частиц в диапазоне диаметров 100–1000 мкм. При этом значение критической скорости для мелких частиц (50 мкм) выше, чем для более крупных.

Скорее всего, при обводнённости 50–70 % в нижней части трубы образуется слой воды, низкая вязкость которой не позволяет «подхватить» и обеспечить перенос частиц с размером менее 50 мкм.

Увеличение количества воды в потоке приводит к росту критической скорости, так как вода обладает меньшей способностью обеспечивать перенос песка в горизонтальном участке (рис. 12, 13).

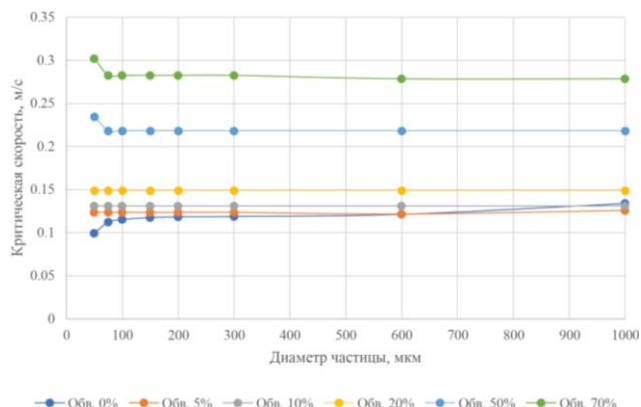


Рис. 12. Критическая скорость для разного диаметра частиц и обводнённости

Fig. 12. Critical speed for different particle diameters and water cut

Так как размер частиц незначительно влияет на критическую скорость в исследуемом диапазоне (50–1000 мкм), предлагается корреляция для нахождения критической скорости потока в зависимости от обводнённости высоковязкой нефти пласта ПК₁ (рис. 13):

$$v = 0,1172e^{0,0124WC},$$

где v – критическая скорость, м/с; WC – обводнённость продукции, %.

Коэффициент детерминации для предлагаемого выражения равен 0,9985.

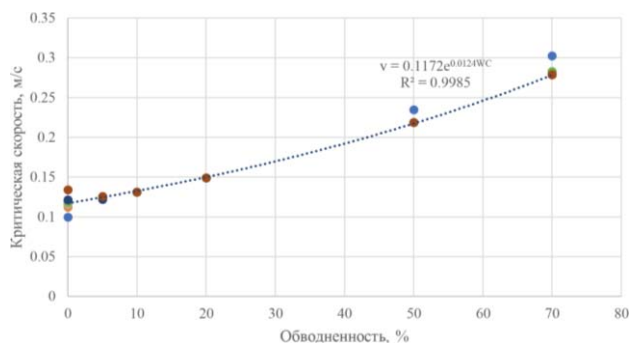


Рис. 13. Зависимость критической скорости от объёмной доли воды

Fig. 13. Dependence of the critical speed on water volume fraction

Аналогично изучалось влияние величины газового фактора и диаметра частиц на критические скорости для газожидкостной смеси (рис. 14). Рост газового фактора приводит к увеличению критической скорости потока. При этом скорость увеличивается и с ростом размера твёрдой частицы.

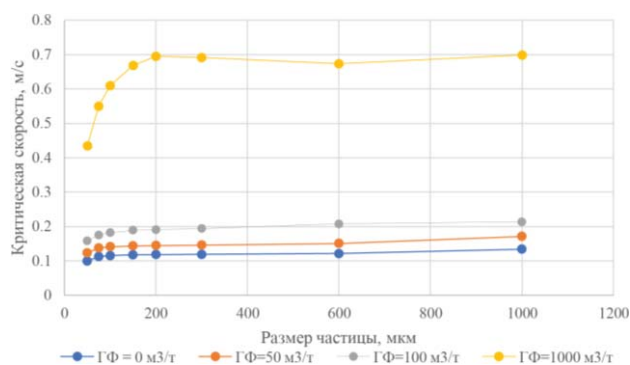


Рис. 14. Критическая скорость для разного диаметра частиц и газового фактора

Fig. 14. Critical speed for different particle diameters and gas factor

В данном случае увеличение диаметра частиц ожидаемо приводит к росту критической скорости, что согласуется с математическими моделями, рассмотренными ранее.

Увеличение количества газа снижает вязкость и плотность нефти, что приводит к уменьшению силы сопротивления, действующей на твёрдую ча-

стицу со стороны флюида. Способность жидкости обеспечить движение песка снижается [31–33].

Расчёт времени образования песчаной пробки

Для планирования планово-предупредительных ремонтных работ по очистке скважины от накопившегося песка полезным будет определение времени образования песчаной пробки. Программный комплекс OLGA позволяет рассчитать высоту накопленного песчаного слоя. Проведено моделирование работы скважины при текущих режимных параметрах (табл. 7) в течение 65 сут.

Таблица 7. Технологический режим работы скважины № 1

Table 7. Technological mode of operation of well no. 1

Показатель/Index	Значение/Value
Дебит жидкости, м³/сут./Fluid flow rate, m³/day	115
Обводнённость/Water cut, %	4
Газовый фактор, м³/т/Gas factor, m³/tons	49
КВЧ, мг/л/Amount of suspended particles, mg/l	525
Размер твёрдых частиц, мкм/Solid particle size, µm	73

Как было ранее определено, режим неподвижного песка регистрируется в половине горизонтального участка (ближе к носку) и в нижней части эксплуатационной колонны (в месте перехода потока из хвостовика в эксплуатационную колонну). В этих зонах будет происходить накопление песчаных дюн (рис. 15, 16). За 65 сут. в горизонтальном

стволе образуется песчаный слой высотой ~12 мм, а в нижней части эксплуатационной колонны высота песчаного слоя составит ~74 мм.

Зная внутренний диаметр колонн (хвостовик – 99 мм, эксплуатационная колонна – 161,8 мм), можем рассчитать время полного перекрытия поперечного сечения трубы:

- 1) через 145 сут. образуется песчаная пробка в эксплуатационной колонне;
- 2) через 940 сут. образуется песчаная пробка в горизонтальном хвостовике.

Так как образование песчаной пробки в эксплуатационной колонне наступит раньше, чем полное пересыпание горизонтального участка, следует ожидать, что остановка скважины произойдёт ориентировочно через 145 сут. после запуска.

Высота песчаной пробки в эксплуатационной колонне составит ~50 м. В горизонтальном стволе длина участка, где накапливается песок, составит ~974 м (51 % длины продуктивного интервала).

Оценка эрозионного разрушения глубинно-насосного оборудования

Как известно, наличие механических примесей в добываемой жидкости влияет также на эрозионное разрушение глубинно-насосного оборудования. Внутренней нормативной документацией компании регламентировано отнесение скважины к осложнённому фонду по причине эрозии, если КВЧ более 200 мг/л и выполняются условия, приведённые в табл. 8.

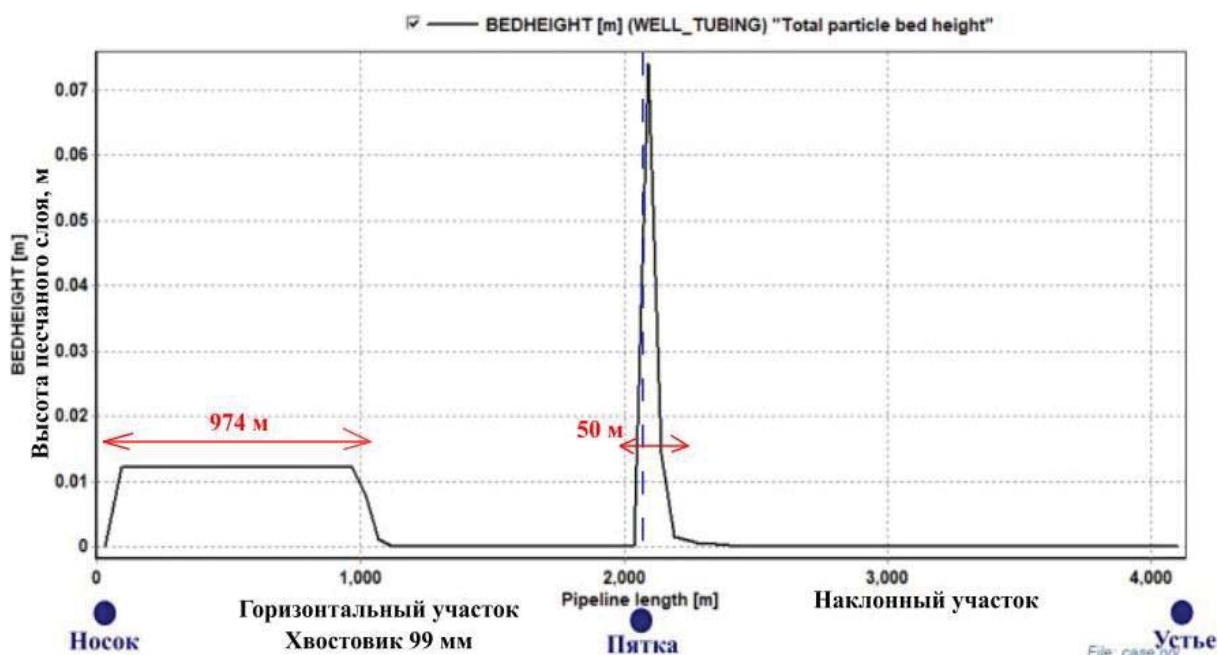


Рис. 15. Высота накопленного песчаного слоя через 65 сут.
Fig. 15. Height of the accumulated sand layer in 65 days

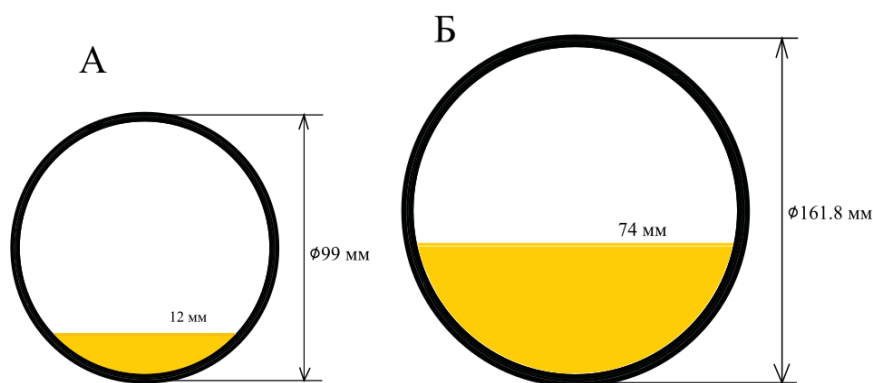


Рис. 16. Высота накопленного песчаного слоя через 65 сут.: А) горизонтальный хвостовик; Б) эксплуатационная колонна

Fig. 16. Height of the accumulated sand layer after 65 days: А) horizontal liner; Б) production string

Таблица 8. Эрозионные агрессивные факторы, влияющие на вероятность эрозионного отказа глубинно-насосного оборудования

Table 8. Erosive aggressive factors affecting the probability of erosive failure of downhole pumping equipment

Показатели Indicators	Значения Values	Рассчитанные значения для скважины № 1 Calculated values for well no. 1	Выполнение условий Fulfillment of conditions
Абразивный износ ЭЦН/Abrasive wear of electric centrifugal pump			ДА/YES
Индекс агрессивности КВЧ (AI) Amount of suspended particles aggressiveness index (AI)	50 и более 50 and more	81,7	
Гидроабразивный износ НКТ/Hydroabrasive wear of tubing			НЕТ/NO
Количество кварцевых частиц размером более 100 мкм в составе КВЧ Quantity of quartz particles larger than 100 μm in amount of suspended particles composition	13 кг/сут. и более 13 kg/day and more	6,09 кг/сут. kg/day	
Скорость потока в НКТ, м/с Flow rate in tubing, m/s	1,22 м/с и более 1.22 m/s and more	0,44 м/с m/s	
Гидроабразивный износ ПЭД/Hydroabrasive wear of a submersible electric motor			НЕТ/NO
Количество кварцевых частиц размером более 100 мкм в составе КВЧ Quantity of quartz particles larger than 100 μm in amount of suspended particles composition	13 кг/сут. и более 13 kg/day and more	6,09 кг/сут. kg/day	
Скорость потока между ПЭД и эксплуатационной колонной, м/с Flow rate between a submersible electric motor and production string, m/s	1,22 м/с и более 1.22 m/s and more	0,136 м/с m/s	
Гидроабразивный износ УЭЦН Hydroabrasive wear of installation of an electric centrifugal pump			НЕТ/NO
Количество кварцевых частиц размером более 100 мкм в составе КВЧ Quantity of quartz particles larger than 100 μm in amount of suspended particles composition	100 мг/л и более 100 mg/l and more	52,5 мг/л mg/l	
Частота вращения ЭЦН Speed of electric centrifugal pump	более 50 Гц over 50 Hz	40 Гц Hz	

Оценим риск эрозионного износа ГНО на скважине № 1 Северо-Комсомольского месторождения. Износ рабочих органов УЭЦН способны вызывать частицы с твердостью более 5 по шкале Мооса. Индекс агрессивности характеризует способность частиц песка вызывать абразивный износ оборудования и может быть рассчитан по формуле:

$$AI = 0,3P_{d<250} + 10(1 - K_{окр}) + 10(1 - K_{сфер}) + 0,25P_{нер} + 0,25P_{кварц},$$

где $P_{d<250}$ – массовая доля частиц размером меньше 250 мкм в пробе, %; $K_{окр}$ – средний коэффициент

округлости твердых частиц по шкале API; $K_{сфер}$ – средний коэффициент сферичности твердых частиц по шкале API; $P_{нер}$ – массовая доля частиц нерастворимого в кислоте остатка, %; $P_{кварц}$ – массовая доля кварца в изучаемой пробе, %.

Для пласта ПК₁ значение коэффициента сферичности и округлости принимается равным 0,9.

Скорость потока в НКТ и скорость потока между ПЭД и эксплуатационной колонной рассчитываются по формулам:

$$v_{нкт} = \frac{Q_{ж}}{86400 \cdot S_{нкт}} = \frac{115}{86400 \cdot 0,003} = 0,44;$$

$$v_{\text{нкт}} = \frac{Q_{\text{ж}}}{86400 \cdot (S_{\text{жк}} - S_{\text{пзд}})} = \frac{115}{86400 \cdot (0,0205 - 0,0107)} = 0,136.$$

Чтобы определить количество кварцевых частиц, размер которых более 100 мкм, вспомним, что ранее нами определено, что доля частиц размером меньше 73 мкм будет составлять 90 %. Соответственно, доля частиц с размером более 100 мкм не может превышать 10 %.

Оценка показала, что скважина № 1 Северо-Комсомольского месторождения будет входить в осложнённый фонд по причине эрозионной агрессивности. Существует вероятность абразивного износа электроцентробежного насоса [34–36].

Применение моделирования не подразумевает улучшения экономических показателей разработки месторождения за счёт увеличения добычи нефти. Однако, зная режимы движения песка в скважине, зоны и время образования песчаных пробок, может быть спланирован планово-предупредительный ремонт скважины.

Моделирование добывающих скважин с учётом транспорта песка по стволу позволит более грамотно подходить к планированию и оптимизации работ, в том числе позволит своевременно проводить планово-предупредительную очистку скважины от накопившегося песка.

Заключение

На основании проведённой работы можно сделать следующие выводы:

1. При текущих режимных параметрах работы скважины № 1 Северо-Комсомольского месторождения неизбежно образование песчаной пробки как в эксплуатационной колонне, так и в горизонтальном хвостовике. В горизонтальной части скважины накопление песка будет происходить в зоне, ближней к «носки» скважины. Высокий риск образования песчаной пробки в месте стыковки хвостовика и эксплуатационной колонны из-за резкого снижения скорости потока.
2. Обеспечение полного выноса механических частиц может быть достигнуто только за счёт увеличения скорости потока, т. е. за счёт увеличения дебита жидкости на скважине. Для предотвращения образования песчаной пробки в эксплуатационной колонне при обводнённости 4 % критическая скорость потока жидкости должна

превышать 0,123 м/с, что соответствует дебиту 214 м³/сут.

3. Увеличение обводнённости продукции на скважине № 1 благоприятно скажется на транспорте песка в горизонтальном участке за счёт роста дебита жидкости и скорости соответственно.
4. Рост газового фактора, наоборот, негативно повлияет на режим движения песка. Большое количество свободного газа на приёме насоса снижает КПД установки и приводит к снижению дебита и скорости потока.
5. Количество взвешенных частиц в изучаемых пределах (от 20 до 2000 мг/л) не оказывает значительного влияния на транспорт песка в скважине. Зоны с неподвижным песком наблюдаются в одних и тех же участках. Однако увеличение КВЧ приведёт к более быстрому накоплению песка и раннему образованию песчаной пробки.
6. Критическая скорость для смеси «нефть–вода» мало зависит от размера частиц. Однако для смеси «нефть–газ» увеличение диаметра частиц приводит к росту скорости.
7. Критические скорости для потоков с частицами диаметром 50 и 200 мкм практически одинаковы. По этой причине нет необходимости устанавливать скважинные фильтры с маленьким размером зазора. Рекомендуется устанавливать проволочные фильтры с апертурой 200 мкм вместо 150 мкм, что позволит снизить перепад давления на фильтре и увеличить коэффициент продуктивности скважины.
8. При текущих режимных параметрах работы скважины № 1 ожидается образование песчаной пробки в эксплуатационной колонне через 145 сут. после начала добычи. Рекомендуется провести очистку скважины заранее (через 120–130 сут.).
9. На скважине присутствует риск абразивного износа электроцентробежного насоса, так как для механических примесей характерно высокое значение индекса агрессивности.

Оценить, способна ли скважина обеспечивать вынос твёрдых частиц из горизонтального участка, можно с помощью моделирования в специализированных программных продуктах. Для условий рассматриваемого Северо-Комсомольского нефтегазо-конденсатного месторождения проведение лабораторных исследований совместно с моделированием позволит сделать выбор наиболее эффективного скважинного фильтра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Северо-Комсомольское нефтегазоконденсатное месторождение // Горные ведомости. – 2006. – № 11 (30). – С. 78–85.
2. Галиев А.В. Оптимизация проектной длины горизонтальных скважин при добыче высоковязкой нефти Северо-Комсомольского месторождения // Проблемы и тенденции развития инновационной экономики: международный опыт и российская практика: материалы VI Международной научно-практической конференции. – Уфа, 31 октября 2017. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2017. – С. 81–84.

3. Разработка новой системы противопесочных фильтров с повышенной устойчивостью к эрозионному воздействию на примере скважин Северо-Комсомольского месторождения / М.Т. Нухаев, Д.С. Котов, А.А. Голубь, В.А. Кабанов // Горизонтальные скважины 2022: сборник материалов 5-й научно-практической конференции. – Сочи, 10–14 октября 2022. – М.: ООО «ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ», 2022. – С. 12–15.
4. Grigorev M.B., Tananykhin D.S., Poroshin M.A. Sand management approach for a field with high viscosity oil // Journal of Applied Engineering Science. – 2020. – Vol. 18. – № 1. – P. 64–69. DOI: 10.5937/jaes18-24541
5. Шиян С.И., Шаблий И.И. Пескопроявления в скважинах: предупреждение и борьба с ними. – Краснодар: Изд-во «КубГТУ», 2022. – 263 с.
6. Экспериментальные исследования пропускной способности фильтра тонкой очистки / Р.Н. Бахтизин, К.Р. Уразаков, С.В. Смольников, М.Е. Политов // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 9. – С. 122–124.
7. Разработка физико-химических моделей и методов прогнозирования состояния пород-коллекторов / Д.А. Березовский, А.В. Лаврентьев, О.В. Савенко, А.Т. Кошелев // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 9. – С. 84–86.
8. Близиюков В.Ю., Еганынц Р.Т. Пескопроявление и предупреждение повреждения обсадных колонн в процессе эксплуатации скважин // Инженер-нефтяник. – 2008. – № 1. – С. 13–15.
9. О механизме пескопроявления при разработке слабосцементированных песчаных пластов с АВПД / В.Ю. Близиюков, А.Г. Гилаев, Р.Ф. Исламов, З.Х. Моллаев // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2010. – № 11. – С. 16–20.
10. Гаджиев А.А., Толепбергенов Е.К. Промысловые испытания нового состава для крепления слабосцементированных пород призабойной зоны скважин // Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР. – 2015. – № 4. – С. 31–35.
11. Бабадзе Э.М. Роль интеллектуальных скважин в осуществлении контроля над пескопроявлением // Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР. – 2011. – № 3. – С. 39–43.
12. Дроздов Н.А. Фильтрационные исследования на кернах и насыпных моделях Уренгойского месторождения для определения эффективности водогазового воздействия на пласт при извлечении конденсата из низконапорных коллекторов и нефти из нефтяных оторочек // Записки Горного института. – 2022. – Т. 257. – С. 783–794. DOI: 10.31897/PMI.2022.71
13. Жуков В.С., Кузьмин Ю.О. Экспериментальная оценка коэффициентов сжимаемости трещин и межзерновых пор коллектора нефти и газа // Записки Горного института. – 2021. – Т. 251. – С. 658–666. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.5
14. Курочкин М.К. Применение гидрофобного полимерного тампонажного состава для предупреждения и ликвидации пескопроявлений в скважинах // Инженер-нефтяник. – 2012. – № 1. – С. 18–20.
15. Мардашов Д.В., Лиманов М.Н. Повышение эффективности глушения нефтяных скважин на месторождениях Волго-Уральской нефтегазоносной провинции с аномально низкими пластовыми давлениями // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 7. – С. 185–194. DOI: 10.18799/24131830/2022/7/3707
16. Раджаоалисон Х., Злотковский А., Рамболаманана Ж. Определение механических свойств песчаника неразрушающим методом // Записки Горного института. – 2020. – Т. 241. – С. 113–117. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.113
17. Arutyunyan A.S., Petrushin E.O., Kusova L.G. Improvement of hydraulic facing technology by modeling permeability formed cracks for specific mining and geological conditions // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Series «International Science and Technology Conference “Earth Science”», ISTC EarthScience 2022. – Chapter 3. – 2022. – P. 042021. DOI: 10.1088/1755-1315/988/4/042021
18. Савенко О.В. Разработка принципов, методов и технологий ресурсосбережения для нефтедобычи с учётом комплекса факторов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № S46. – С. 3–60.
19. Тананыхин Д.С., Петухов А.В., Шагиахметов А.М. Химический способ крепления слабосцементированных песчаников в эксплуатационных скважинах подземного газохранилища // Записки Горного института. – 2013. – Т. 206. – С. 107–111. URL: <https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/5448> (дата обращения 15.08.2023).
20. Karakan E., Shimobe S., Sezer A. Effect of clay fraction and mineralogy on fall cone results of clay-sand mixtures // Engineering Geology. – 2020. – Vol. 279. – P. 105887.
21. The effect of granularity on surface roughness and contact angle in wood sanding process / B. Luo, J. Zhang, X. Bao, H. Liu, L. Li // Measurement. – 2020. – Vol. 165. – P. 108133.
22. Effectiveness of an eco-friendly polymer composite sand-fixing agent on sand fixation / G. Ma, F. Ran, E. Feng, Zh. Dong, Z. Lei // Water, Air & Soil Pollution. – 2015. – Vol. 226. – № 7. – P. 1–12.
23. Собога И., Маларев В.И., Коптева А.В. Расчёт теплопроводности нефтенасыщенных песчаных грунтов // Записки Горного института. – 2019. – Т. 238. – С. 443–449. DOI: 10.31897/PMI.2019.4.443
24. Шиян С.И., Шаблий И.И. Применение беструбного гидробура для удаления песчаных пробок // RESEARCH. ENGINEERING. EXTREME. 2021: материалы Международной научно-практической конференции. – Краснодар, 03 июня 2021. – Краснодар: ООО «Издательский Дом – Юг», 2021. – С. 362–370.
25. A comparison between the consistency limits of lateritic soil fractions passing through sieve numbers 40 and 200 / L.O. Afolagboye, Yu.A. Abdu-Raheem, D.E. Ajayi, A.O. Talabi // Innovative Infrastructure Solutions. – 2021. – Vol. 6. – № 2. – P. 1–8.
26. Biodegradation of atrazine in sand sediments and in a sand-filter / S.J. Goux, M. Ibanez, M. van Hoorick, P. Debongnie, S.N. Agathos, L. Pussemier // Applied Microbiology and Biotechnology. – 2000. – Vol. 54. – № 4. – P. 0589–0596.
27. A new approach for selecting sand-control technique in horizontal openhole completions / M. Parlar, R.J. Tibbles, B. Gadiyar, B. Stamm // SPE Drilling and Completion. – 2016. – Vol. 31. – № 1. – P. 4–15.
28. Peretomode E., Oluyemi G., Faisal N.H. Sand production due to chemical-rock interaction. A review // Engineering failure analysis. – 2022. – P. 106745.
29. Experience in the application of hydrocarbon optical studies in oil field development / I.R. Raupov, E.U. Safiullina, R.N. Burkhanov, A.A. Lutfullin, A.V. Maksyutin, A.D. Lebedev // Energies. – 2022. – Vol. 15. – № 10. DOI: 10.3390/en15103626

30. Saychenko L.A., Tananykhin D.S., Ashena R. Prevention of scale in the downhole equipment and productive reservoir during the oil well operation // *Journal of Applied Engineering Science*. – 2021. – Vol. 19. – № 2. – P. 363–368. DOI: 10.5937/jaes0-29696
31. Мардашов Д.В., Бондаренко А.В., Раупов И.Р. Методика расчёта технологических параметров закачки в нефтяную скважину неньютоновских жидкостей при подземном ремонте // *Записки Горного института*. – 2022. – Т. 258. – С. 881–894. DOI: 10.31897/PMI.2022.16
32. Shahsavari M.H., Khamsehchi E. Optimum selection of sand control method using a combination of MCDM and DOE techniques // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 171. – P. 229–241.
33. Srikanth V., Mishra A.K. A laboratory study on the geotechnical characteristics of sand-bentonite mixtures and the role of particle size of sand // *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*. – 2016. – Vol. 2. – № 1. – P. 1–10.
34. Experimental evaluation of the multiphase flow effect on sand production process: prepack sand retention testing results / D.S. Tananykhin, M.B. Grigorev, M.I. Korolev, T.I. Solovyev, N.N. Mikhailov, M.A. Nesterov // *Energies*. – 2022. – Vol. 15. – № 13. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15134657>
35. Effect of wire design (profile) on sand retention parameters of wire-wrapped screens for conventional production: prepack sand retention testing results / D.S. Tananykhin, M.B. Grigorev, E. Simonova, M.I. Korolev, I.A. Stecyuk, L. Farrakhov // *Energies*. – 2023. – Vol. 16. – № 5. – P. 2438. <https://doi.org/10.3390/en16052438>
36. Xie L., Dong Zh., Zheng X. Experimental analysis of sand particles' lift-off and incident velocities in wind-blown sand flux // *Acta Mechanica Sinica*. – 2006. – Vol. 21. – № 6. – P. 564–573.

Информация об авторах

Ольга Вадимовна Савенок, доктор технических наук, профессор кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2. Savenok_OV@pers.spmi.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1312-4312>

Наиля Халимовна Жарикова, кандидат технических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2. Zharikova_Nkh@pers.spmi.ru; <https://orcid.org/0009-0006-2943-4760>

Александр Евгеньевич Верисокин, кандидат технических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, Северо-Кавказский федеральный университет, Россия, 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1. verisokin.aleksandr@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6530-4126>

Абдул-Гапур Гусейнович Керимов, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой геофизических методов поисков и разведки месторождений полезных ископаемых, Северо-Кавказский федеральный университет, Россия, 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1. akerimov@ncfu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4880-787X>

Ашот Страевич Арутюнян, кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики, Кубанский государственный технологический университет, Россия, 350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2. mereniya@mail.ru

Поступила 31.08.2023

Прошла рецензирование: 27.09.2023

Принята к публикации: 23.05.2024

REFERENCES

1. Severo-Komsomolskoe oil and gas condensate field. *Mining statements*, 2006, no. 11 (30), pp. 78–85. (In Russ.)
2. Galiev A.V. Optimization of the design length of horizontal wells in the production of high-viscosity oil of the Severo-Komsomolskoe field. *Problems and trends in the development of the innovative economy: international experience and Russian practice. Materials of the VI International scientific and practical conference*. Ufa, Ufa State Oil Technical University Publ., 2017. pp. 81–84. (In Russ.)
3. Nukhaev M.T., Kotov D.S., Golub A.A., Kabanov V.A. Development of a new system of anti-sand filters with increased resistance to erosion effects on the example of wells of the Severo-Komsomolskoe field. *Horizontal wells 2022. Collection of materials of the 5th scientific and practical conference*. Moscow, «EAGE GEOMODEL» LLC Publ., 2022. pp. 12–15. (In Russ.)
4. Grigorev M.B., Tananykhin D.S., Poroshin M.A. Sand management approach for a field with high viscosity oil. *Journal of Applied Engineering Science*, 2020, vol. 18, no. 1, pp. 64–69. DOI: 10.5937/jaes18-24541
5. Shiyani S.I., Shabliy I.I. *Sand shows in wells: prevention and control*. Krasnodar, Kuban State Technological University Publ., 2022. 263 p. (In Russ.)
6. Bakhtizin R.N., Urzakov K.R., Smolnikov S.V., Politov M.E. Experimental studies of the throughput of a fine filter. *Oil industry*, 2014, no. 9, pp. 122–124. (In Russ.)
7. Berezovskiy D.A., Lavrentiev A.V., Savenok O.V., Koshelev A.T. Developing physic-chemical models and methods for forecasting reservoirs the condition. *Oil industry*, 2014, no. 9, pp. 84–86. (In Russ.)
8. Bliznyukov V.Yu., Eganyants R.T. Sand manifestation and prevention of damage to casing strings during well operation. *Petroleum Engineer*, 2008, no. 1, pp. 13–15. (In Russ.)

9. Bliznukov V.Yu., Gilaev A.G., Islamov R.F., Mollaev Z.Kh. Some aspects of sand appearance during development of weakly-cemented sand formations with abnormally high formation pressure. *Construction of oil and gas wells on land and offshore*, 2010, no. 11, pp. 16–20. (In Russ.)
10. Gadzhiev A.A., Tolepbergenov E.K. Field tests of a new composition for fastening weakly cemented rocks in the bottomhole zone of wells. *Scientific works of NIPI Neftegaz SOCAR*, 2015, no. 4, pp. 31–35. (In Russ.)
11. Babazade E.M. The role of smart wells in controlling sand production. *Scientific works of NIPI Neftegaz SOCAR*, 2011, no. 3, pp. 39–43. (In Russ.)
12. Drozdov N.A. Filtration studies on cores and sand packed tubes from the Urengoy field for determining the efficiency of simultaneous water and gas injection on formation when extracting condensate from low-pressure reservoirs and oil from oil rims. *Journal of Mining Institute*, 2022, vol. 257, pp. 783–794. (In Russ.) DOI: 10.31897/PMI.2022.71
13. Zhukov V.S., Kuzmin Yu.O. Experimental evaluation of compressibility coefficients for fractures and intergranular pores of an oil and gas reservoir. *Journal of Mining Institute*, 2021, vol. 251, pp. 658–666. (In Russ.) DOI: 10.31897/PMI.2021.5.5
14. Kurochkin M.K. The use of a hydrophobic polymer cement composition for the prevention and elimination of sand in wells. *Petroleum Engineer*, 2012, no. 1, pp. 18–20. (In Russ.)
15. Mardashov D.V., Limanov M.N. Improving the efficiency of oil well killing at the fields of the Volga-Ural oil and gas province with abnormally low reservoir pressure. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 7, pp. 185–194. (In Russ.)
16. Rajaoalison H., Zlotkowski A., Rambolamanana G. Mechanical properties of sandstone using non-destructive method. *Journal of Mining Institute*, 2020, vol. 241, pp. 113–117. (In Russ.) DOI: 10.31897/PMI.2020.1.113
17. Arutyunyan A.S., Petrushin E.O., Kusova L.G. Improvement of hydraulic facing technology by modeling permeability formed cracks for specific mining and geological conditions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Series «International Science and Technology Conference «Earth Science»», ISTC EarthScience 2022. Chapter 3», 2022, p. 042021. DOI: 10.1088/1755-1315/988/4/042021*
18. Savenok O.V. Development principle, methods and technology of resources saving for oil producing with provision for complex factors. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2013, no. S46, pp. 3–60. (In Russ.)
19. Tananykhin D.S., Petukhov A.V., Shagiakhmetov A.M. Chemical method of fastening weakly cemented sandstones in production wells of an underground gas storage. *Journal of Mining Institute*, 2013, vol. 206, pp. 107–111. (In Russ.)
20. Karakan E., Shimobe S., Sezer A. Effect of clay fraction and mineralogy on fall cone results of clay-sand mixtures. *Engineering Geology*, 2020, vol. 279, p. 105887.
21. Luo B., Zhang J., Bao X., Liu H., Li L. The effect of granularity on surface roughness and contact angle in wood sanding process. *Measurement*, 2020, vol. 165, p. 108133.
22. Ma G., Ran F., Feng E., Dong Zh., Lei Z. Effectiveness of an eco-friendly polymer composite sand-fixing agent on sand fixation. *Water, Air & Soil Pollution*, 2015, vol. 226, no. 7, pp. 1–12.
23. Sobota J., Malarev V.I., Kopteva A.V. Calculation of oil-saturated sand soils' heat conductivity. *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 238, pp. 443–449. (In Russ.) DOI: 10.31897/PMI.2019.4.443
24. Shiyan S.I., Shabliy I.I. The use of a tubeless hydraulic drill for removing sand plugs. *Research. Engineering. Extreme. 2021. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. Krasnodar, Yug Publ. House, 2021. pp. 362–370. (In Russ.)
25. Afolagboye L.O., Abdu-Raheem Yu.A., Ajayi D.E., Talabi A.O. A comparison between the consistency limits of lateritic soil fractions passing through sieve numbers 40 and 200. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2021, vol. 6, no. 2, pp. 1–8.
26. Goux S.J., Ibanez M., Van Hoorick M., Debongnie P., Agathos S.N., Pussemier L. Biodegradation of atrazine in sand sediments and in a sand-filter. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2000, vol. 54, no. 4, pp. 0589–0596.
27. Parlar M., Tibbles R.J., Gadiyar B., Stamm B. A new approach for selecting sand-control technique in horizontal openhole completions. *SPE Drilling and Completion*, 2016, vol. 31, no. 1, pp. 4–15.
28. Peretomode E., Oluyemi G., Faisal N.H. Sand production due to chemical-rock interaction. A review. *Engineering failure analysis*, 2022, p. 106745.
29. Raupov I.R., Safiullina E.U., Burkhanov R.N., Lutfullin A.A., Maksyutin A.V., Lebedev A.D. Experience in the application of hydrocarbon optical studies in oil field development. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 10. DOI: 10.3390/en15103626
30. Saychenko L.A., Tananykhin D.S., Ashena R. Prevention of scale in the downhole equipment and productive reservoir during the oil well operation. *Journal of Applied Engineering Science*, 2021, vol. 19, no. 2, pp. 363–368. DOI: 10.5937/jaes0-29696
31. Mardashov D.V., Bondarenko A.V., Raupov I.R. Technique for calculating technological parameters of non-Newtonian liquids injection into oil well during workover. *Journal of Mining Institute*, 2022, vol. 258, pp. 881–894. (In Russ.) DOI: 10.31897/PMI.2022.16
32. Shahsavari M.H., Khamehchi E. Optimum selection of sand control method using a combination of MCDM and DOE techniques. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 171, pp. 229–241.
33. Srikanth V., Mishra A.K. A laboratory study on the geotechnical characteristics of sand-bentonite mixtures and the role of particle size of sand. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2016, vol. 2, no. 1, pp. 1–10.
34. Tananykhin D.S., Grigorev M.B., Korolev M.I., Solovyev T.I., Mikhailov N.N., Nesterov M.A. Experimental evaluation of the multiphase flow effect on sand production process: prepack sand retention testing results. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 13. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15134657>
35. Tananykhin D.S., Grigorev M.B., Simonova E., Korolev M.I., Stecyuk I.A., Farrakhov L. Effect of wire design (profile) on sand retention parameters of wire-wrapped screens for conventional production: prepack sand retention testing results. *Energies*, 2023, vol. 16, no. 5, p. 2438. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16052438>
36. Xie L., Dong Zh., Zheng X. Experimental analysis of sand particles' lift-off and incident velocities in wind-blown sand flux. *Acta Mechanica Sinica*, 2006, vol. 21, no. 6, pp. 564–573.

Information about the authors

Olga V. Savenok, Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg Mining University, 2, 21 line, Vasilievsky Island, Saint Petersburg, 199106, Russian Federation. Savenok_OV@pers.spmi.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1312-4312>

Nailya Kh. Zharikova, Cand. Sc., Associate Professor, Saint Petersburg Mining University, 2, 21 line, Vasilievsky Island, Saint Petersburg, 199106, Russian Federation. Zharikova_Nkh@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0009-0006-2943-4760>

Alexander E. Verisokin, Cand. Sc., Associate Professor, North Caucasian Federal University, 1, Pushkin street, Stavropol, 355017, Russian Federation. verisokin.aleksandr@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6530-4126>

Abdul-Gapur H. Kerimov, Dr. Sc., Associate Professor, North Caucasian Federal University, 1, Pushkin street, Stavropol, 355017, Russian Federation. akerimov@ncfu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4880-787X>

Ashot S. Arutyunyan, Cand. Sc., Associate Professor, Kuban State Technological University, 2, Moskovskaya street, Krasnodar, 350072, Russian Federation. mereniya@mail.ru

Received: 31.08.2023

Revised: 27.09.2023

Accepted: 23.05.2024

УДК 681.5.075, 621.313.3
DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4735
Шифр специальности ВАК: 2.4.2

Критический экспертный анализ методов идентификации и наблюдателей переменных состояния синхронных электродвигателей с постоянными магнитами

А.С. Глазырин^{1,2}, Е.И. Попов³, В.А. Копырин^{3✉}, В.З. Ковалев^{2,1}, Е.В. Боловин^{1,4},
С.С. Попов^{1,5}, С.Н. Кладиев¹, А.А. Филипас¹, Р.Н. Хамитов^{3,6}

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

² Югорский государственный университет, Россия, г. Ханты-Мансийск

³ Тюменский индустриальный университет, Россия, г. Тюмень

⁴ ООО ИНТ АО «ЭлеСи», Россия, г. Томск

⁵ ООО «НПФ Мехатроника-Про», Россия, г. Томск

⁶ Омский государственный технический университет, Россия, 644050, г. Омск

✉ kopyrinva@gmail.com

Аннотация. Актуальность. В последние годы в нефтедобывающей отрасли наблюдается тенденция перевода малодебитных нефтяных скважин в режим циклической эксплуатации. Нерегулируемый и разомкнутый регулируемый электроприводы установок электроцентробежных насосов на базе синхронных электродвигателей с постоянными магнитами, как правило, оказываются мало пригодны для задач циклической эксплуатации скважин, поскольку не могут обеспечить плавный пуск и требуемые показатели качества переходных процессов, что ведет к еще большему снижению добычи нефти. Синтез замкнутой системы управления электроприводом погружных установок возможен только с применением алгоритмов косвенной оценки неизмеряемых координат электропривода – методов идентификации переменных состояния, наблюдателей угловой скорости ротора и момента сопротивления на валу. Поскольку установка соответствующих датчиков погружного электродвигателя сопряжена с техническими трудностями, отсутствует необходимость существенной модернизации аппаратных решений существующей системы электрооборудования. На сегодняшний день теория идентификации нелинейных динамических систем широко применяется для получения косвенной оценки неизмеряемых переменных состояния синхронных электродвигателей с постоянными магнитами. Большое количество методов, представленных в научных источниках, требует сравнительного анализа относительно их достоинств и недостатков с целью выбора наилучшего метода идентификации, удовлетворяющего требованиям технологического процесса добычи нефти и учитывающего его специфику и особенности. При этом приоритетны системы идентификации, ориентированные на минимизацию вычислительных мощностей или на работу в реальном времени. **Цель:** определение наилучшего в смысле вычислительной сложности и удобства практического использования метода идентификации переменных состояния синхронных электродвигателей с постоянными магнитами, эксплуатирующихся в погружных насосных установках скважинной добычи нефти, на основе сравнительного анализа существующих методов, представленных в российских и зарубежных источниках. **Методы:** методы системного анализа и идентификации динамических систем, метод критического экспертного анализа. **Результаты и выводы.** Подробно рассмотрены наиболее распространенные методы идентификации и наблюдатели переменных состояния синхронных электродвигателей с постоянными магнитами, дана общая характеристика каждой группе методов, выявлены их достоинства и недостатки. Путем сравнительного критического экспертного анализа установлено, что для задач электропривода погружных установок электроцентробежных насосов в большей степени может быть рекомендован наблюдатель Люенберкера, отличающийся относительно малой вычислительной сложностью и простотой настройки в инженерной практике.

Ключевые слова: критический экспертный анализ, синхронный электродвигатель с постоянными магнитами, методы идентификации динамических систем, наблюдатель переменных состояния

Благодарности: Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FENG-2023-0001 «Предиктивное управление потоками энергии электрогенерирующих комплексов Арктики и Крайнего Севера, при стохастических характерах потребления и генерации электрической энергии: теория, синтез, эксперимент»).

Для цитирования: Критический экспертный анализ методов идентификации и наблюдателей переменных состояния синхронных электродвигателей с постоянными магнитами / А.С. Глазырин, Е.И. Попов, В.А. Копырин, В.З. Ковалев, Е.В. Боловин, С.С. Попов, С.Н. Кладиев, А.А. Филипас, Р.Н. Хамитов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 6. – С. 240–256. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4735

UDC 681.5.075, 621.313.3
DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4735

Critical expert analysis of permanent magnet synchronous motors identification methods and state variable observers

A.S. Glazyrin^{1,2}, E.I. Popov³, V.A. Kopyrin^{3✉}, V.Z. Kovalev^{2,1}, E.V. Bolovin^{1,4},
S.S. Popov^{1,5}, S.N. Kladiev¹, A.A. Filipas¹, R.N. Khamitov^{3,6}

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

² Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russian Federation

³ Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

⁴ LLC «INT» of JSC «EleSy», Tomsk, Russian Federation

⁵ «NPF Mechatronica-Pro» LTD, Tomsk, Russian Federation

⁶ Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

✉ kopyrinva@gmail.com

Abstract. Relevance. In recent years, the oil industry has seen a tendency to transfer low-yield oil wells to intermittent mode. Unregulated electric drive and the open-loop controlled electric drive of electric centrifugal pumping with permanent magnet synchronous motors are typically not suitable for tasks of intermittent operation of wells. Due to objective reasons, there may not be smooth starts and required quality indicators of transient processes, which leads to even more reduction in oil production. The synthesis of a closed-loop electric drive control system of submersible installations is possible only using algorithms for indirect estimation of non-measured mechanical coordinates of the electric drive – state variables identification methods, observers of the rotor angular velocity and the load torque. The installation of sensors of angular velocity and torque on the shaft of the submersible electric motor is associated with technical difficulties, therefore, there is no need for significant modernization of the hardware solutions of the existing electrical equipment system. To date, the theory of identifying non-linear dynamic systems is widely used to derive an indirect estimate of the non-measured state variables of the permanent magnet synchronous motors. The large number of methods presented in scientific sources requires comparative analysis regarding their benefits and disadvantages in order to select the best identification method that meets the requirements of the oil production and takes into account its specificity and features. In this case, identification systems that are focused on minimizing computing power or operating in real time are given priority. **Aim.** To determine the best in terms of computational complexity and the convenience of practical use method of identifying state variables of permanent magnet synchronous motors operating in submersible oil well pumping units based on comparative analysis of existing methods presented in Russian and foreign sources. **Methods.** Methods for system analysis and identification of dynamic systems, a method of critical expert analysis. **Result and conclusions.** The most common methods for identifying and observing the state variables of synchronous motors with permanent magnets have been described in detail, given the general performance of each group of methods, their benefits and disadvantages were reviewed. By comparative critical expert analysis, it was found that for tasks of submersible electric centrifugal pump units electric drive a Luenberger observer, characterized by relatively low computational complexity and ease of setup in engineering practice, can be recommended.

Keywords: critical expert analysis, permanent magnet synchronous motor, identification of dynamic systems methods, state variables observer

Acknowledgements: The research was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme no. FENG-2023-0001 "Predictive control of energy flows of power generating complexes of the Arctic and the Far North, with stochastic nature of consumption and generation of electrical energy: theory, synthesis, experiment").

For citation: Glazyrin A.S., Popov E.I., Kopyrin V.A., Kovalev V.Z., Bolovin E.V., Popov S.S., Kladiev S.N., Filipas A.A., Khamitov R.N. Critical expert analysis of permanent magnet synchronous motors identification methods and state variable observers. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 6, pp. 240–256. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4735

Введение

В последние два десятилетия синхронные электродвигатели с постоянными магнитами (СДПМ) получают все большее распространение в промыш-

ленности. Сфера применения СДПМ охватывает как высокомоментные электроприводы электровозов и прокатных станов, так и высокооборотистые электроприводы, используемые в погружных

насосных установках, а также прецизионные электроприводы и сервоприводы [1]. Основные подходы к управлению скоростью и моментом СДПМ, включающие полеориентированное управление и прямое управление моментом, были разработаны в 80-е гг. прошлого века и остаются наиболее распространенными по настоящее время [2].

Как известно, для реализации обеих стратегий управления необходимо знать информацию о текущих скорости и положении ротора СДПМ. С каждым этапом технического прогресса технологические установки, использующие электропривод, все больше усложняются, и применение датчиков скорости ротора и момента сопротивления на валу может оказаться невозможным из технических или экономических соображений. В особенности данная проблема актуальна для электроприводов погружных насосных установок. При этом со временем к электроприводу предъявляются все более жесткие требования по качеству переходных процессов и точности регулирования.

На сегодняшний день бездатчиковый электропривод остается одной из наиболее актуальных и стремительно развивающихся технологий в электротехнике. Для удовлетворения высоких требований современных технологических процессов к бездатчиковому электроприводу применяются методы косвенной оценки неизмеряемых переменных состояния электродвигателей – наблюдатели состояния. Характерной особенностью СДПМ является то, что они представляют собой сложную, сильно нелинейную динамическую систему. Для линейных систем методы и алгоритмы идентификации переменных состояния в достаточной степени изучены [3–5] и могут быть применены в инженерной практике, например, для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением, описанного линейной математической моделью при соответствующих допущениях.

В случае нелинейных систем задача идентификации переменных состояния является некорректной и не может быть решена в общем виде. Вследствие этого на сегодняшний день существует довольно много подходов к проблеме восстановления вектора переменных состояния нелинейных динамических систем, обладающих своими достоинствами и недостатками и различающихся степенью сложности с точки зрения вычислений. Отсутствие универсального метода идентификации переменных состояния СДПМ обуславливает необходимость определения наилучшего метода из представленных на данный момент в российских и зарубежных источниках на основе сравнительного критического экспертного анализа, что является целью данной работы.

В данной работе наибольший интерес представляют вопросы идентификации переменных состоя-

ния погружных электродвигателей на базе синхронной машины с постоянными магнитами в составе установок электроцентробежных насосов (УЭЦН) добычи нефти. Особенности технологического процесса УЭЦН не позволяют реализовывать системы управления с достаточно большими вычислительными мощностями, а значит, наибольшее внимание при проведении сравнительного анализа должно уделяться вычислительным возможностям рассматриваемых методов и алгоритмов идентификации наблюдателей переменных состояния СДПМ. Приоритет при проведении критического экспертного анализа должен отдаваться методам идентификации, направленным на минимизацию вычислительных затрат или на работу в режиме реального времени при программно-алгоритмической реализации.

Наблюдатели Люенбергера

Наблюдатель, предложенный Давидом Люенбергером для линейных систем [3, 5], нашел широкое применение в задачах векторного управления электроприводом, в частности, в схемах полеориентированного управления при питании электродвигателя от преобразователя частоты с векторной широтно-импульсной модуляцией [6–10]. Распространенность наблюдателя Люенбергера (Luenberger observer) обусловлена простотой математического описания [11] и низкой вычислительной сложностью при реализации на цифровых сигнальных процессорах [12]. Типовая структурная схема наблюдателя в системе электропривода изображена на рис. 1.

Ядром наблюдателя Люенбергера может выступать настраиваемая математическая модель как всего электродвигателя [13], построенная на усилении невязки токов статора объекта и модели, так и его механической подсистемы, например, в системах бездатчикового управления с регуляторами в скользящем режиме [14, 15].

Определенный интерес представляет работа [16]. В ней предложен наблюдатель с каскадной структурой, в котором вычисление оценок всех переменных состояния СДПМ производится только на основании измерения тока звена постоянного тока преобразователя частоты. В статье представлена также и дискретная реализация наблюдателя. Предложенный подход позволяет сократить количество датчиков тока в системе электропривода, однако при этом существенно возрастают вычислительные операции микропроцессора. Кроме того, как следует из результатов работы, наблюдатель имеет большое время отклика на изменение нагрузки двигателя, вследствие чего остаются открытыми вопросы об устойчивости к параметрическим возмущениям (робастности) разработанного наблюдателя.

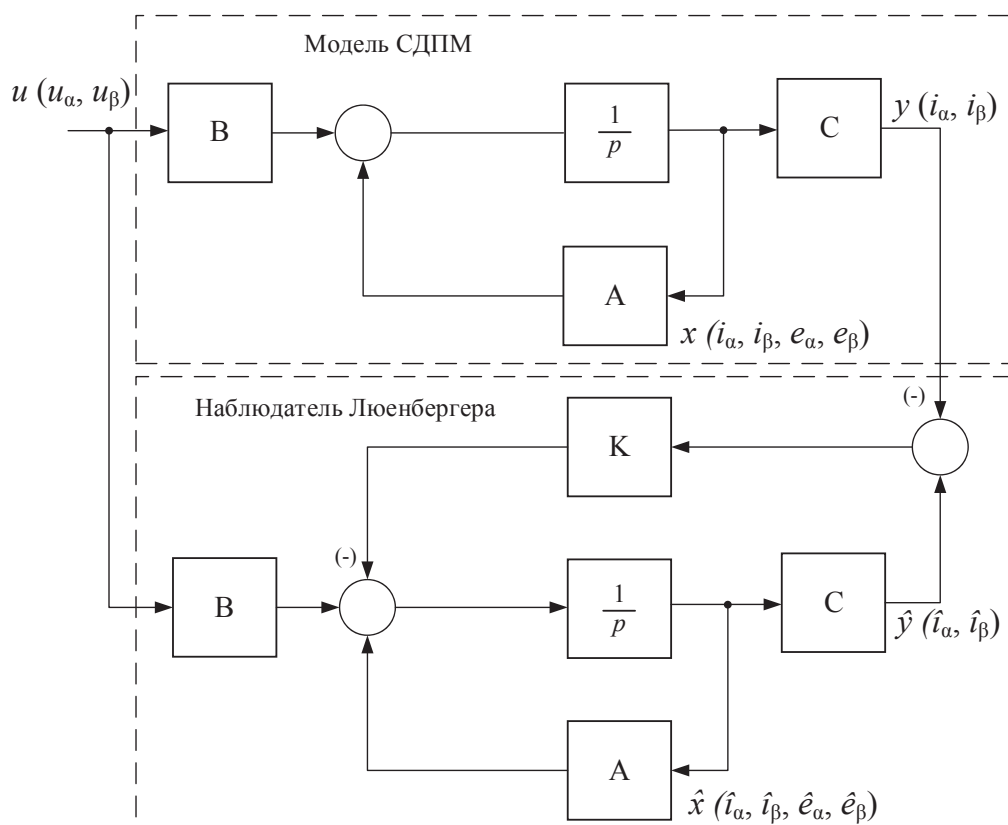


Рис. 1. Структурная схема типового наблюдателя Льюенбергера (наблюдатель потокосцепления) для СДПМ [9] (A – матрица системы; B – матрица управления; C – матрица наблюдаемых параметров; K – матрица коэффициентов наблюдателя; u – вектор управляющих воздействий; x – вектор переменных состояния; y – вектор наблюдаемых переменных состояния; \hat{x} – вектор оценок переменных состояния; \hat{y} – вектор оценок наблюдаемых переменных состояния)

Fig. 1. Basic structure of the traditional Luenberger observer (flux linkage observer) for permanent magnet synchronous motor (PMSM) [9] (A – system matrix; B – control matrix; C – observed parameter matrix; K – observer coefficient matrix; u – vector of controls; x – vector of state variables; y – vector of the observed state variables; \hat{x} – vector of estimates of state variables; \hat{y} – vector of estimates of observed state variables)

Как известно, для СДПМ существует проблема определения начального положения ротора при пуске двигателя. В статье [17] авторы рассматривают систему электропривода с вентиляторным моментом нагрузки. Основная идея работы заключается в частотном пуске электродвигателя с разомкнутой системой управления с регулятором тока до момента времени, когда наблюдатель скорости «подхватит» движение электродвигателя, и последующим переходом на замкнутую систему управления. Результаты данной работы не решают проблему определения начального положения ротора, однако экспериментально подтверждают возможность устойчивой работы системы электропривода с векторным управлением при неизвестном начальном положении ротора. Тем не менее необходимо отметить, что требование к отработке рассогласования начальных условий по скорости наблюдателя и электродвигателя является стандартным [18], следовательно, аналогичное требова-

ние при некоторых допущениях может быть выдвинуто и по углу начального положения ротора, однако в общем случае рассогласование начальных условий по положению ротора может привести к потере устойчивости системы.

Несмотря на простоту реализации, высокую робастность и время отклика на возмущение, наблюдатель Льюенбергера не получил широкого распространения в системах управления СДПМ. К основным проблемам наблюдателя в системах электропривода можно отнести снижение точности оценки неизмеряемых переменных состояния наблюдателем как на низких рабочих частотах вращения вала ротора электродвигателя [8–10], так и при наличии шумов в измерительных каналах по сравнению с другими типами наблюдателей [15, 19].

Однако положительные стороны наблюдателя Льюенбергера позволяют рекомендовать его для применения в системах электропривода установок электроцентробежных насосов, функционирующих

в режиме циклической эксплуатации и требующих, в связи с этим, перехода на замкнутые по основным переменным состояния системы автоматического управления [20].

Фильтры Калмана

Альтернативой классическому наблюдателю Люенбергера для систем электроприводов, к которым предъявляются высокие требования по качеству переходных процессов или характеризующихся сильной зашумленностью измерительных каналов, является расширенный фильтр Калмана (Extended Kalman filter). В работе [21] показано, что отработка синхронным сервоприводом режима реверса с системой управления, замкнутой по скорости через расширенный фильтр Калмана (РФК), происходит быстрее и с меньшим перерегулированием и пульсациями электромагнитного момента, чем системой управления, замкнутой через типовой наблюдатель потокосцепления (Люенбергера).

В инженерной практике расширенный фильтр Калмана получил распространение в системах векторного управления СДПМ с прямым управлением моментом, так как позволяет не только восстанавливать механические координаты вектора переменных состояния, но и производить идентификацию параметров схемы замещения [22, 23], либо выполнять фильтрацию измеряемых электромагнитных переменных состояния в уже существующей системе электропривода.

Так, например, в работах [24, 25] авторами разработан и исследован алгоритм, позволяющий улучшить гармонический состав тока электродвигателя путем компенсации «мертвого времени» автономного инвертора напряжения, на основе оценки вектора состояния электродвигателя РФК. Показано, что коэффициент гармонических искажений тока в установившихся режимах в рамках проведенных вычислительного и физического экспериментов снижен с 6,22 до 0,74 %, тем самым достигается уменьшение пульсаций электромагнитного момента в переходных и установившихся режимах.

Несмотря на явные преимущества РФК по сравнению с наблюдателями потокосцепления (Люенбергера), его возможности при решении сильно нелинейных задач остаются ограниченными вследствие использования метода линеаризации, снижающего точность и устойчивость алгоритма фильтрации, а также оказывающего высокую вычислительную нагрузку на микроконтроллер при вычислении матрицы Якоби [26]. Как известно, данных недостатков лишен ансцентный фильтр Калмана (Uncented Kalman filter) (АФК).

В работах [27, 28] авторами был проведен сравнительный анализ АФК и РФК для задач бездатчикового управления СДПМ. Как следует из статей,

РФК показывает лучшие характеристики в процессе пуска двигателя, однако АФК имеет выше точность оценки переменных состояния, особенно в переходных процессах, а также в условиях большей зашумленности измеренных сигналов и при неизвестном начальном положении ротора. По данным физического эксперимента [28] относительное среднее значение ошибки оценки скорости, полученной с РФК, составляет 3,27 %, для АФК – 1,93 %.

Анализ публикаций показывает, что в настоящее время для задач прямого управления моментом в системах бездатчикового электропривода именно АФК преобладает над РФК [27–30]. Это обусловлено низкими вычислительными затратами АФК в сравнении с РФК, позволяющими использовать более сложные и точные математические модели электродвигателя. Однако в случае простых задач все еще имеет место применение РФК, поскольку на практике настройка и оптимизация его параметров проще относительно АФК [27].

Отдельного рассмотрения заслуживает работа [31], в которой авторы предлагают использовать оптимальный нелинейный фильтр инвариантного погружения, представляющий собой обобщенный фильтр Калмана–Бьюси (ОФКБ), в бездатчиковой системе векторного управления вентильным двигателем на базе синхронной машины с постоянными магнитами. Настройка фильтра, как и в случае РФК, производится заданием матриц ковариаций шумов самой модели и измерительных каналов. Однако, в отличие от РФК, ОФКБ выполняет фильтрацию в непрерывном времени, а объект наблюдения моделируется стохастическими дифференциальными уравнениями [32].

Фильтр инвариантного погружения [31] представляет собой систему двадцатого порядка, редуцированный фильтр – систему девятого порядка. Высокий порядок математической модели системы затрудняет ее реализацию на микроконтроллерах. Редуцированный фильтр показывает худшую в сравнении с фильтром полного порядка динамику в переходных процессах и характеризуется большей колебательностью. Следовательно, на данный момент ОФКБ ни полного, ни редуцированного порядка не может быть рекомендован для применения в цифровых системах управления электроприводами.

Наблюдатели, принцип работы которых основан на теории Калмановской фильтрации, характеризуются высокими вычислительными затратами и сложностью в настройке в сравнении с наблюдателями Люенбергера. При повышении порядка математической модели системы, например, в задачах идентификации динамических систем типа «длинный кабель – погружной электродвигатель» эти недостатки будут особенно существенны.

Наблюдатели на основе скользящих режимов

В настоящее время все большее распространение приобретают методы идентификации динамических систем на основе наблюдателей, работающих по принципу скользящих режимов (Sliding Mode Observers – SMO). В отечественной и зарубежной литературе [33–35] рассматривается применение наблюдателей на основе скользящих режимов в линейных моделях стационарных и нестационарных технических систем с целью идентификации дефектов (функционального диагностирования). Идея метода заключается в построении редуцированной модели исходной системы, которая обладала бы избирательной чувствительностью к дефектам и возмущениям, с целью синтеза отказоустойчивой системы управления.

При построении систем управления СДПМ наблюдатели на основе скользящих режимов, как правило, представляют собой наблюдатели потокоцепления постоянного магнита ротора (или противо-ЭДС двигателя) для получения оценки скорости вращения ротора [36–39]. К достоинствам наблюдателей на основе скользящего режима можно отнести простую структуру, высокую робастность и хорошие динамические свойства. Основным недостатком наблюдателей на основе скользящих режимов – существенные пульсации и искажение гармонического состава оцениваемых величин, поэтому в схемах классических скользящих наблюдателей (рис. 2) предусмотрен фильтр низких частот. Тем не менее использование пассивных фильтров приводит к фазовой задержке и ослаблению амплитуды сигналов, что негативно сказывается на динамических характеристиках наблюдателя.

Современные варианты реализации наблюдателя на основе скользящих режимов включают в себя различные способы для снижения пульсаций сигналов. Так, в работе [38] предложено заменить в структуре наблюдателя релейную функцию сигмоидной и применить адаптивный фильтр нижних частот с переменной частотой среза, зависящей от

оценки положения ротора. Интересной также представляется работа [40], в которой релейная функция заменяется блоком нечеткой логики, функция принадлежности выходного сигнала которого зависит от знака произведения невязки токов и ее производной. Идеи применения нечеткой логики, схем фазовой автоподстройки частоты или сигмоидных функций в структуре наблюдателя на основе скользящих режимов в различных вариантах исполнения [40–42] получили значительное распространение в системах управления СДПМ.

Иное применение наблюдателей на основе скользящих режимов заключается в идентификации дефектов СДПМ. В серии работ [43–45] авторами рассмотрен способ определения размагничивания ротора, основанный на использовании скользящего наблюдателя потокоцепления постоянного магнита. Подавление шумов и пульсаций на выходе релейного элемента реализовано с помощью алгоритма суперскручивания – одного из наиболее распространенных алгоритмов стабилизации динамических систем с неопределенным возмущением только по вектору выхода системы [46], что позволяет получить оценку потокоцепления с высокой степенью точности.

К недостаткам наблюдателей на основе скользящих режимов можно отнести сильную зашумленность сигналов оценки переменных состояния (особенно остро эта проблема проявляется при работе двигателя на низких скоростях, что выражается в возрастании пульсаций электромагнитного момента), свойственную любым скользящим режимам, а также существенное усложнение структуры наблюдателя при попытках преодолеть эту проблему. Включение в структуру наблюдателя блока нечеткой логики ведет к увеличению вычислительных затрат при его реализации на микроконтроллере, а также требует привлечения опытного эксперта для настройки лингвистических правил.

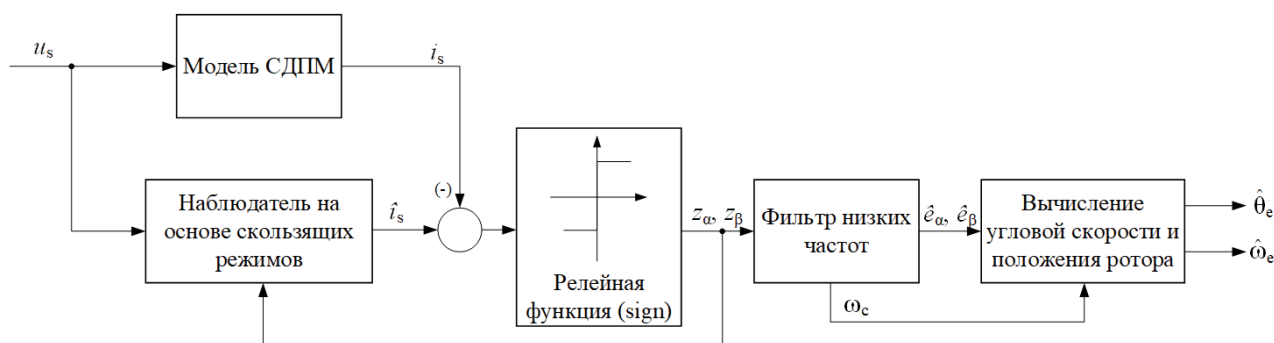


Рис. 2. Структурная схема наблюдателя на основе скользящих режимов в классическом варианте исполнения [38]
Fig. 2. Structure of the conventional sliding mode observer [38]

Наблюдатели возмущений

Как уже отмечалось ранее, в сложных эксплуатационных условиях электродвигатель подвержен влиянию как внешних возмущений, так и вариации внутренних параметров, которые оказывают значительное влияние на качество функционирования электродвигателя. При этом они могут быть существенно нелинейны, что сильно усложняет их количественную оценку, а моделирование некоторой аналитической или эмпирической приближенной функцией может быть вовсе недоступно.

Идентификация сложных возмущений может быть осуществлена с помощью наблюдателей возмущений (Disturbance observer). Данные наблюдатели могут быть применены для широкого круга задач. Они могут включать в себя, например, робастное управление скоростью электродвигателя как в достаточно простых электроприводах [47], так и в технических системах сложных технологических процессов, имеющих многомассовую механическую подсистему [48, 49].

Определенный интерес представляют вопросы применения наблюдателей возмущений в системах электропривода с регуляторами скорости, работающими в скользящем режиме [50–52]. Как известно [53], задача управления в скользящем режиме состоит в обеспечении независимости движения динамической системы от внешних возмущений. В случае СДПМ инвариантность ди-

намической системы по отношению к внешним возмущениям можно обеспечить только при известных входных воздействиях. Если же поведение момента нагрузки во времени имеет сложный стохастический характер, его идентификация возможна только построением высокоточного наблюдателя момента нагрузки с хорошими динамическими свойствами, малым временем отклика и глобальной асимптотической устойчивостью, представляющий собой наблюдатель возмущений [54]. Особенно это актуально для высокомоментных электроприводов, функционирующих на низких скоростях вращения [51]. Структурная схема типового наблюдателя возмущений в составе СДПМ приведена на рис. 3.

Использование наблюдателя возмущений также возможно и в системах электропривода с робастным управлением током, в том числе и при работе адаптивного регулятора тока в скользящем режиме в условиях изменяющихся во времени параметров схемы замещения электродвигателя [55]. Кроме того, наблюдатели возмущений находят применение в задачах оценки и снижения пульсаций электромагнитного момента с улучшением гармонического состава тока в системах электропривода с классическими ПИ-регуляторами тока [56], а значит, могут быть востребованы при разработке малощумных электроприводов.

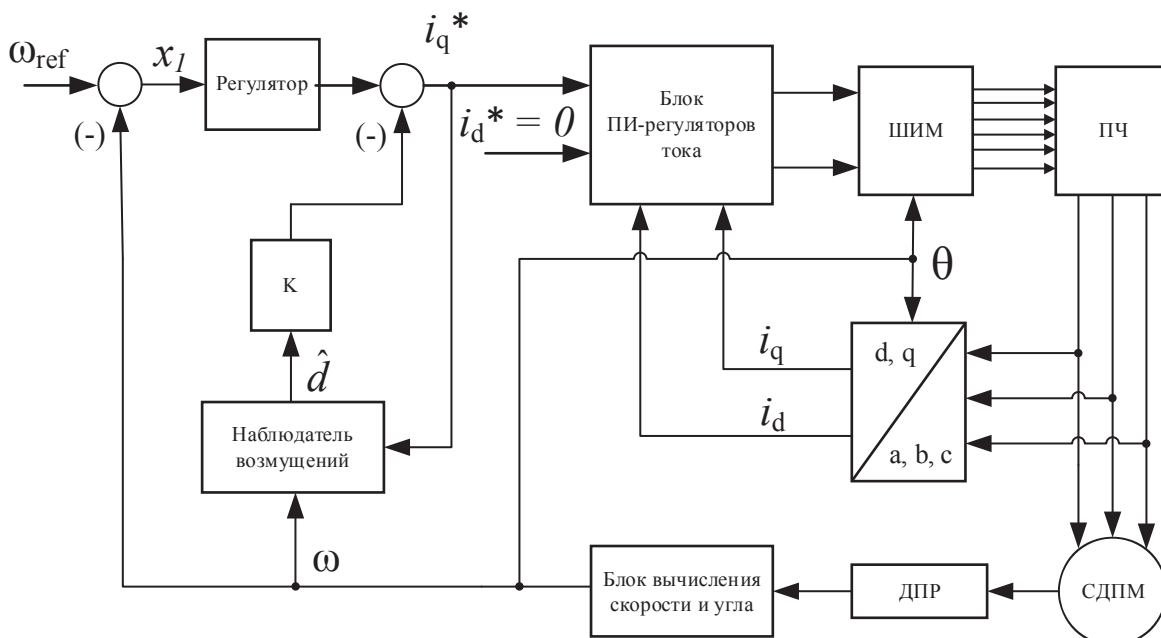


Рис. 3. Один из вариантов исполнения наблюдателя возмущений в структуре системы управления СДПМ [50] (ШИМ – блок широтно-импульсной модуляции; ПЧ – преобразователь частоты; ДПП – датчик положения ротора)

Fig. 3. One of disturbance observer options in PMSM control system [50] (ШИМ – pulse width modulation block; ПЧ – frequency converter; ДПП – rotor position sensor)

Основным недостатком наблюдателя возмущений, как видно из рис. 3, является необходимость точно знать скорость вращения или угловое положение ротора электродвигателя, которое может быть получено только либо с помощью датчиков, установка которых не всегда возможна, либо с другого наблюдателя, что является существенным усложнением системы управления электроприводом. На практике это ограничивает область применения наблюдателя возмущений электротранспортом [50, 51] или прецизионными и сервоприводами [54].

Наблюдатели на основе MRAS

Еще одну самостоятельную группу методов идентификации образуют наблюдатели на основе адаптивных систем с эталонной моделью (Model Reference Adaptive System – MRAS). Принцип работы MRAS основан на обеспечении неизменности динамических характеристик всей системы при изменении параметров объекта управления за счет введения в контур управления модели-эталона и закона адаптации параметров контура управления (рис. 4).

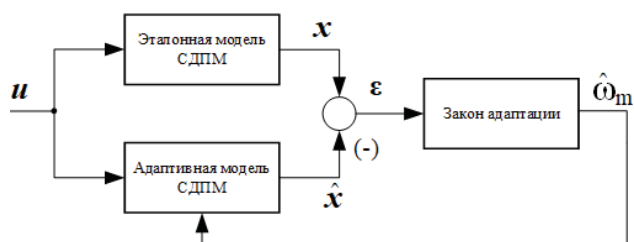


Рис. 4. Структурная схема наблюдателя на основе адаптивной системы с эталонной моделью (MRAS) в общем виде

Fig. 4. General block scheme of MRAS-type observer

Наблюдатели на основе MRAS характеризуются относительной простотой реализации на микроконтроллерах, вследствие чего находят применение в бездатчиковых цифровых системах управления электроприводами для восстановления оценки скорости электродвигателя или идентификации параметров его схемы замещения [57–60]. При этом закон адаптации может быть задан как аналитически, так и с применением метаэвристических алгоритмов, например, искусственных нейронных сетей [61, 62].

Нередко данные наблюдатели выполняются совмещенными с какими-либо другими типами наблюдателей. Так, например, в работе [63] в систему электропривода дополнительно вводится скользящий наблюдатель для реализации feed-forward регулятора с целью улучшения гармониче-

ского состава тока и снижения пульсаций электромагнитного момента при работе электродвигателя в диапазоне частот выше номинальной.

Определенный интерес представляет работа [64]. Поскольку за счет наблюдателя на основе адаптивной системы с эталонной моделью невозможно получить одновременную оценку угловой скорости и момента на валу, оценка последнего производится отдельно с помощью наблюдателя Люенбергера. При этом сигнал получаемой оценки момента нагрузки оказывается достаточно зашумленным, а скорость отработки наблюдателем наброса нагрузки уступает классическим наблюдателям Люенбергера полного порядка.

К недостаткам адаптивных систем с эталонной моделью можно отнести высокую сложность настройки и сильную чувствительность к параметрам электродвигателя, выражающуюся в потере точности оценки скорости и нарушении устойчивости работы наблюдателя (особенно в диапазоне низких и высоких скоростей) [65]. Как правило, эти проблемы частично решаются использованием в системе управления электроприводом различных дополнительных алгоритмов, что ведет к усложнению системы управления и трудности в реализации на цифровых сигнальных процессорах.

Метаэвристические методы идентификации

В теории автоматического управления все большую популярность обретают метаэвристические алгоритмы, к которым можно отнести искусственные нейронные сети (ИНС), генетические алгоритмы, методы дифференциальной эволюции, методы оптимизации муравьиной колонии и др. В системах управления электроприводами наибольшее распространение получили методы на основе ИНС, что объясняется их способностью с высокой точностью моделировать сильно нелинейную динамику СДПМ.

Как следствие, наблюдатели на основе ИНС широко применяются в бездатчиковых сервоприводах на базе СДПМ [66, 67], к которым предъявляются крайне высокие требования по точности и устойчивости функционирования при заранее неизвестной нагрузке. При этом предложенные в работах [66–68] архитектуры систем управления отличаются высокой сложностью (вплоть до применения в архитектуре ИНС закона адаптации весов в реальном времени) и связанными с этим трудностями при реализации наблюдателей на микроконтроллерах. Такой подход оправдан для управления электроприводом роботов-манипуляторов, требовательным к высокой точности и скорости отработки наблюдателя, однако не может быть реализован на практике в системах управления электроприводом погружных насосов, вычислительная

способность микропроцессоров которых сильно ограничена.

Сравнительно более простой в реализации наблюдатель на основе ИНС представлен в работе [69]. В качестве регулятора скорости ротора и электромагнитного момента в работе рассматривается регулятор в скользящем режиме, порождающий высокочастотные колебания и пульсации скорости и момента электродвигателя. Изложенные в статье результаты имитационного моделирования отражают достаточно высокую точность оценки механических координат электропривода наблюдателем. Однако авторами не приводится описание обучения нейросети, от которого, как известно, критически зависит работоспособность ИНС. Кроме того, отсутствуют результаты апробации предложенного подхода в рамках физического эксперимента для валидации работоспособности наблюдателя.

Определенный интерес представляет серия работ [70, 71], в которой разработан и исследован нейросетевой адаптивный наблюдатель состояния на основе теоремы об устойчивости на конечном промежутке времени и метода бэкстеппинга. Как утверждают авторы, существующие методы адаптивного управления для построения наблюдателей состояния электродвигателей выполнены согласно теореме Ляпунова об асимптотической устойчивости, тогда как для электроприводов, управляемых в скользящем режиме или работающих в условиях переменной и сильно нелинейной нагрузки, должны быть предъявлены требования по устойчивости на конечном интервале времени.

Представленные в работах [70, 71] результаты имитационного моделирования свидетельствуют о том, что предложенная структура нейросетевого наблюдателя обеспечивает устойчивую оценку переменных состояния на необходимом конечном интервале времени, что обеспечивает более высокую робастность и точность работы наблюдателя в динамических режимах при стохастическом характере нагрузки. Необходимо отметить, что архитектура предложенной системы управления остается достаточно громоздкой, а сам наблюдатель относительно сложен в настройке.

Среди метаэвристических методов идентификации в последние годы получили распространение методы на основе генетических алгоритмов. Однако, как показывает практика, на данный момент их применение остается ограниченным только идентификацией параметров технических систем [72, 73], и вопрос использования генетических алгоритмов для восстановления вектора переменных состояния электропривода на базе СДПМ остается открытым.

Недостатки метаэвристических методов оценки переменных состояния на основе ИНС заключаются в высокой вычислительной сложности таких систем, а также необходимости выполнять обучение ИНС, что представляет собой отдельную самостоятельную научно-техническую задачу.

Обобщенный критерий экспертной оценки эффективности способов построения наблюдателей состояния синхронного электродвигателя с постоянными магнитами

Проведенный анализ работ [5–71] не позволяет выявить наилучший метод для идентификации переменных состояния СДПМ с точки зрения его применения в системах управления электроприводов УЭЦН. Для проведения сравнительного анализа рассмотренных методов идентификации воспользуемся методом критического экспертного анализа, изложенным в [74]. Для применения экспертного анализа необходимо сформировать критерии, отражающие работоспособность методов идентификации переменных состояния:

- точность отработки наблюдателя;
- быстродействие отклика наблюдателя;
- простота метода идентификации, заключающаяся в легкой настройке и использовании метода оператором;
- низкая вычислительная сложность при высоком порядке математической модели объекта – динамической системы;
- чувствительность к точности задания параметров схемы замещения;
- устойчивость к шумам в измерительных каналах;
- простота реализации дискретного варианта наблюдателя.

Методы идентификации переменных состояния синхронных электродвигателей с постоянными магнитами пронумерованы следующим образом:

- М1 – методы идентификации на основе наблюдателя Люенбергера [5–19];
- М2 – методы идентификации на основе фильтра Калмана [21–32];
- М3 – методы идентификации на основе наблюдателей на основе скользящих режимов [33–46];
- М4 – методы идентификации на основе наблюдателей возмущений [47–56];
- М5 – методы идентификации на основе адаптивных систем с эталонной моделью (MRAS) [57–65];
- М6 – метаэвристические методы идентификации [66–71].

Результаты критического экспертного анализа сведем в таблицу. Критерии в таблице обозначены К1–К7 по порядку их нумерации. P_i – ранжирование каждого критерия; BK_i – весовой коэффициент

для каждого критерия; E_i – оценка эксперта соответствия метода идентификации критерию; R_i – приведенная оценка с учетом весового коэффициента по каждому критерию.

Согласно методу критического экспертного анализа [74], эксперт после анализа каждой группы методов идентификации переменных состояния СДПМ выставляет оценку по каждому критерию (3 – полностью соответствует критерию, 2 – частично соответствует критерию, 1 – полностью не соответствует критерию). Затем критериям выставляется уровень ранжирования согласно важности данного критерия относительно всего списка. Далее для каждого критерия вычисляется весовой коэффициент:

$$BK_i = \frac{P_i}{\sum_i P_i}.$$

Приведенная оценка соответствия метода идентификации критерию с учетом весового коэффициента вычисляется по формуле:

$$R_i = BK_i \cdot E_i.$$

Все приведенные оценки R_i суммируются и выставляются в ячейке столбика «сумма» для каждого метода.

В качестве примера рассмотрим оценку эксперта по первому критерию К1 для первой группы методов идентификации М1. Оценка эксперта по данному критерию – 2, что означает, что наблюдатели Люенбергера имеют точность отработки в переходных режимах ниже, чем наблюдатели на основе метаэвристических алгоритмов (ИНС) группы М6, однако достаточную для инженерной практики.

Поскольку сумма всех уровней ранжирования равна 28, весовой коэффициент BK_1 для К1 составляет 0,071. Следовательно, приведенная оценка для группы методов М1 по первому критерию К1 равна 0,143. Аналогичная последовательность операций производится для каждой группы методов по каждому критерию.

Наибольший приоритет отдается критерию К4, связанному с объемом вычислительных затрат при программно-алгоритмической реализации метода идентификации. Кроме того, при проведении критического экспертного анализа повышенное внимание уделялось критериям К5 и К7, ориентированным на простоту применения методов идентификации в инженерной практике с учетом специфики технологического процесса нефтедобычи.

Наибольшую взвешенную сумму оценок в 2,393 по заявленным критериям, согласно таблице, получила группа методов идентификации переменных состояния на основе наблюдателей Люенбергера. Относительно трех основных критериев: К4, К5,

К7, взвешенная сумма оценок группы М1 составляет 1,750. Сравнимый уровень взвешенной суммы оценок демонстрируют группы М2 (методы идентификации на основе фильтров Калмана) и М3 (наблюдатели на основе скользящих режимов), имеющие оценку 2,286, что уступает методам группы М1 на 4,5 %. При рассмотрении приоритетных критериев К4, К5, К7 взвешенная сумма оценок для групп М2, М3 составляет 1,464, что меньше взвешенной суммы оценок для группы М1 на 16,3 %.

Таблица. Критический экспертный анализ методов идентификации переменных состояния синхронных электродвигателей с постоянными магнитами с позиции технологического процесса УЭЦН

Table. Critical expert analysis of PMSM state variables identification methods from an electrical submersible pump technological process perspective

М	К	Критерий Criteria							Сумма Total
		К1	К2	К3	К4	К5	К6	К7	
М1	E_i	2	1	3	3	2	1	3	15
	R_i	0,143	0,036	0,321	0,750	0,357	0,143	0,643	2,393
М2	E_i	3	2	1	2	3	3	2	16
	R_i	0,214	0,071	0,107	0,500	0,536	0,429	0,429	2,286
М3	E_i	1	3	2	2	3	3	2	16
	R_i	0,071	0,107	0,214	0,500	0,536	0,429	0,429	2,286
М4	E_i	2	2	3	1	2	2	2	15
	R_i	0,143	0,071	0,321	0,250	0,357	0,286	0,429	1,857
М5	E_i	3	3	2	2	1	1	2	14
	R_i	0,214	0,107	0,214	0,500	0,179	0,143	0,429	1,786
М6	E_i	3	3	1	1	3	3	1	15
	R_i	0,214	0,107	0,107	0,250	0,536	0,429	0,214	1,857
P_i		2	1	3	7	5	4	6	28
BK_i		0,071	0,036	0,107	0,250	0,179	0,143	0,214	

На основе произведенного критического экспертного анализа, как следует из анализа таблицы, можно сделать вывод, что для инженерной практики, в особенности для синтеза систем управления электроприводами УЭЦН, в качестве метода идентификации переменных состояния СДПМ в большей степени могут быть рекомендованы наблюдатели Люенбергера, поскольку они просты в настройке, малочувствительны к точности задания параметров схемы замещения электродвигателя и не требуют больших вычислительных мощностей при реализации наблюдателя на цифровых сигнальных процессорах.

Сопоставимым уровнем взвешенной суммы оценок обладают методы на основе фильтров Калмана и наблюдателей на основе скользящих режимов. Расширенные фильтры Калмана обладают большей устойчивостью к шумам в измерительных каналах, однако подбор параметров ковариационных матриц в инженерной практике, как правило,

более сложный процесс, чем настройка коэффициентов отработки невязки для наблюдателей Люенбергера. Наблюдатели на основе скользящих режимов также обладают большей устойчивостью к шумам и неопределенности задания параметров динамической системы, однако их точность восстановления вектора переменных состояния ниже в сравнении с фильтрами Калмана и наблюдателями Люенбергера как в интегральном смысле, так и установившихся режимах.

Наиболее подходящей областью применения методов идентификации на основе разновидностей фильтра Калмана и метаэвристических алгоритмов являются системы прецизионных электроприводов, а также системы управления, характеризующиеся большой зашумленностью измерительных каналов. Наблюдатели на основе скользящих режимов, в свою очередь, могут быть рекомендованы для систем управления электроприводами, к которым предъявляются повышенные требования к параметрической робастности, а также меньшие требования к точности отработки задания и качеству переходных процессов.

Заключение

Идентификация переменных состояния таких многосвязных нелинейных динамических систем, как СДПМ, представляет собой сложную научно-техническую проблему, которая на данный момент далека от своего разрешения. Множество существующих способов и алгоритмов эффективной оценки неизмеряемых координат электродвигате-

лей лишь подчеркивает актуальность данной проблемы и отсутствие универсального метода идентификации переменных состояния.

Стоит отметить, что применение методов идентификации и наблюдателей состояния синхронного электродвигателя не ограничивается оценкой переменных состояния. Идентификация таких дефектов электродвигателя, как размагничивание постоянного магнита ротора, смещение оси ротора и др., является не менее важным инструментом при эксплуатации электродвигателя и синтезе отказоустойчивых систем управления.

Выбор того или иного метода идентификации зависит от конкретных условий и технических требований, предъявляемых технологическим процессом. Тем не менее, исходя из проведенного критического экспертного анализа, можно утверждать, что для большинства инженерных задач в большей степени могут быть рекомендованы методы идентификации на основе наблюдателей Люенбергера.

Дальнейшее развитие методов идентификации на основе наблюдателей Люенбергера видится авторами в повышении устойчивости методов к шумам в каналах связи. Кроме того, большой интерес представляют вопросы аппроксимации оценок переменных состояния и их «доопределения» до аналитических функций, что позволит в реальном времени аналитически применять весь математический аппарат теории автоматического управления для повышения эффективности и качества функционирования регулируемых электроприводов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панкратов В.В. Вентильный электропривод: от стиральной машины до металлорежущего станка и электровоза // Электронные компоненты. – 2007. – № 2. – С. 68–77.
2. Bodkhe S. Steady-state analysis and comparison of control strategies for PMSM // Modelling and Simulation in Engineering, 2015. – Vol. 15. – P. 1–11.
3. Luenberger D.G. Observing the state of linear system // IEEE Trans. Mil. Electron. – 1964. – Vol. Mil-8, April. – P. 74–80.
4. Kalman R.E. A new approach to linear filtering and prediction problems // Journal of Basic Engineering. – 1960. – Vol. 82. – P. 35–45.
5. Luenberger D.G. An introduction to observers // IEEE Transactions of Automatic Control. – 1971. – Vol. AC-16. – № 6. – P. 596–602.
6. Grouz F., Sbita L. Speed sensorless IFOC of PMSM based on adaptive Luenberger observer // International Journal of Computer and Information Engineering. – 2010. – Vol. 4. – № 8. – P. 1256–1262.
7. Henwood N., Malaize J., Praly L. A robust nonlinear Luenberger observer for the sensorless control of SM-PMSM: rotor position and magnets flux estimation // 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. – Montreal, Quebec, Canada, 2012. – P. 1625–1630.
8. Brandstetter P., Rech P., Simonik P. Sensorless control of permanent magnet synchronous motor using Luenberger observer // Progress in Electromagnetics Research Symposium, PIERS. – Cambridge, USA, 2010. – P. 424–428.
9. Luo R., Wang Z., Sun Y. Optimized Luenberger observer-based PMSM sensorless control by PSO // Modelling and Simulation in Engineering. – 2022. – Vol. 2022. – P. 1–17.
10. Busca C. Open loop low speed control for PMSM in high dynamic. – Denmark: Aalborg University, 2010. – 119 p.
11. Глазырин А.С. Бездатчиковое управление асинхронным электроприводом с синергетическим регулятором // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 321. – № 4. – С. 107–111.
12. He L., Wang F. Zynq Implemented Lunenberger disturbance observer based predictive control scheme for PMSM drives // IEEE Transaction on Power Electronics. – 2020. – Vol. 35. – I. 2. – P. 1770–1778.
13. Разработка наблюдателя полного порядка с оперативным мониторингом момента сопротивления для погружных асинхронных электродвигателей / А.С. Глазырин, С.Н. Кладиев, К.С. Афанасьев, В.В. Тимошкин, И.Г. Слепнёв и др. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 2. – С. 118–126.

14. Robust sensorless sliding mode control with Luenberger observer design applied to permanent magnet synchronous motor / I. Bakhti, S. Chaouch, A. Makouf, T. Douadi // 5th International Conference on Systems and Control. – Marrakesh, Morocco, 2016. – P. 204–210.
15. Saihi L., Bouter A. Robust sensorless sliding mode control of PMSM with MRAS and Luenberger extended observer // 8th International on Modelling and Control. – Algeria, Algiers, 2016. – P. 174–179.
16. Hafez B. Single-sensor-based three-phase permanent-magnet synchronous motor drive system with Luenberger observers for motor line current reconstruction / B. Hafez, A. Abdel-Khalik, A.M. Massoud, S. Ahmed, R.D. Lorenz // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2014. – Vol. 50. – Iss. 4. – P. 2602–2613.
17. Observer-based sensorless speed control of PMSM: a focus on drive's startup / O. Arafa, G.A. Aziz, M.I. El-Sebah, A.A. Mansour // Journal of Electrical Systems and Information Technology. – 2016. – Vol. 3. – Iss. 2. – P. 181–209.
18. Глазырин А.С. Пропорциональный и пропорционально-интегральный принципы отработки невязки в наблюдателе полного порядка электромеханического объекта с линеаризованной моделью // Научный вестник НГТУ. – 2015. – Т. 58. – № 1. – С. 28–39.
19. Букреев В.Г., Шандарова Е.Б., Перевошиков Ф.В. Анализ точности оценивания состояний асинхронного электропривода алгоритмами Люенбергера и Калмана // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2023. – Т. 23. – № 1. – С. 35–43.
20. Кладиев С.Н. Обзор и критический анализ современного состояния и путей совершенствования систем электропитания и автоматического управления установок электроцентробежных насосов в прерывистых режимах эксплуатации нефтяных скважин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 9. – С. 203–215.
21. Huang M.C., Moses A.J., Anayi F. The comparison of sensorless estimation techniques for PMSM between extended Kalman filter and flux-linkage observer // Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. – Dallas, TX, USA, 2006. – P. 654–659.
22. Xu Z., Rahman M.F. An extended Kalman filter observer for the direct torque controlled interior permanent magnet synchronous motor drive // The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems. – Singapore, 2003. – P. 686–691.
23. Tety P., Konate A., Asseu O. A robust extended Kalman filter for speed-sensorless control of a linearized and decoupled PMSM drive // Engineering. – 2015. – Vol. 7. – P. 691–699.
24. Buchta L., Otava L. Compensation of dead-time effects based on Kalman filter for PMSM drives // IFAC PapersOnLine. – 2018. – Vol. 51. – Iss. 6. – P. 18–23.
25. Buchta L., Bartik O. Dead-time compensation strategies based on Kalman filter algorithm for PMSM drives // 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – Lisbon, Portugal, 2019. – P. 986–991.
26. Сопоставительный анализ ансцентного и расширенного фильтров Калмана при вторичной обработке информации в спутниковых радионавигационных системах / А.Н. Мороз, П.А. Хмарский, С.А. Шабан, О.В. Сидорович // Доклады БГУИР. – 2014. – № 4. – С. 66–72.
27. A comparative study of Kalman filtering for sensorless control of a permanent-magnet synchronous motor drive / P. Borsje, T.F. Chan, Y.K. Wong, S.L. Ho // IEEE International Conference on Electric Machines and Drives. – San Antonio, TX, USA, 2005. – P. 815–822.
28. Chen Z., Wang L., Liu X. Sensorless direct torque control of PMSM using unscented Kalman filter // Proceedings of the 18th World Congress The International Federation of Automatic Control. – Milano, Italy, 2011. – P. 4380–4385.
29. Ndjana H.J.N., Lautier Ph. Sensorless vector control of an IPMSM using unscented Kalman filtering // IEEE International Symposium on Industrial Electronics. – Montreal, QC, Canada, 2006. – P. 2242–2247.
30. Janiszewski D. Unscented Kalman filter for sensorless PMSM drive with output filter fed by PWM converter // 38th Annual Conf. IEEE Industrial Electronics Society. – Montreal, Quebec, Canada, 2012. – P. 4660–4665.
31. Хафизов Г.Т., Курносов Д.А., Воронин С.Г. Использование фильтров инвариантного погружения в бездатчиковой системе векторного управления вентильным двигателем // Известия УГТУ. – 2016. – № 4. – С. 72–75.
32. Браммер К., Зиффлинг Г. Фильтр Калмана-Бьюси. – М.: Наука, 1982. – 200 с.
33. On the robust fault detection via a sliding mode disturbance observer / T. Floquet, J. Barbot, W. Perruquetti, M. Djemai // Intern. J. Control. – 2004. – Vol. 77. – P. 622–629.
34. Жирабок А.Н., Зуев А.В., Шумский А.Е. Диагностирование линейных динамических систем: подход на основе скользящих наблюдателей // АиТ. – 2020. – № 2. – С. 18–35.
35. Идентификация дефектов в нестационарных системах на основе скользящих наблюдателей / А.В. Зуев, А.Н. Жирабок, В.Ф. Филаретов, А.А. Проценко // Мехатроника, автоматизация, управление, 2021. – Т. 22. – № 12. – С. 625–633.
36. Wang G., Zhan H. A new speed adaptive estimation method based on an improved flux sliding-mode observer for the sensorless control of PMSM drives // ISA Transactions. – 2022. – Vol. 128. – P. 675–685.
37. Gaballah M.M., El Bardini M., Sharaf M. Chattering-free sliding mode observer for speed sensorless control of PMSM // Applied Computing and Informatics. – 2017. – Vol. 13. – Iss. 2. – P. 169–174.
38. A sliding mode speed and position observer for a surface-mounted PMSM / Y. Chen, M. Li, Y. Gao, Z. Chen // ISA Transactions. – 2019. – Vol. 87. – P. 17–27.
39. Ye S. Design and performance analysis of an iterative flux sliding-mode observer for the sensorless control of PMSM drives // ISA Transactions. – 2019. – Vol. 94. – P. 255–264.
40. Ye S. Fuzzy sliding mode observer with dual SOGI-FLL in sensorless control of PMSM drives // ISA Transactions. – 2019. – Vol. 94. – P. 161–176.
41. Ye S. A novel fuzzy flux sliding-mode observer for the sensorless speed and position tracking of PMSMs // Optik. – 2018. – Vol. 171. – P. 319–325.
42. Lin S., Zhang W. An adaptive sliding-mode observer with a tangent function-based PLL structure for position sensorless PMSM drives // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2017. – Vol. 88. – P. 64–74.

43. Demagnetization fault reconstruction for six-phase permanent magnet synchronous motor by improved super-twisting algorithm-based sliding-mode observer / K. Zhao, A. Leng, R. Zhou et al. // *Measurement*. – 2021. – Vol. 172. – P. 1–9.
44. Zhao K. Robust model-free super-twisting sliding-mode control method based on extended sliding-mode disturbance observer for PMSM drive system / K. Zhao, N. Jia, J. She et al. // *Control Engineering Practice*. – 2023. – Vol. 139. – P. 105657.
45. An improved equivalent-input-disturbance approach for PMSM drive with demagnetization fault / G. Huang, J. Li, E.F. Fukushima et al. // *ISA Transactions*. – 2020. – Vol. 105. – P. 120–128.
46. Moreno J.A., Ovalle L., Fridman L. Multivariable super-twisting algorithm for systems with uncertain input matrix and perturbations // *IEEE Transactions on Automatic Control*. – 2022. – Vol. 67. – Iss. 12. – P. 6716–6722.
47. Speed control of PMSM using disturbance observer / A.A. Apte, V.A. Joshi, R.A. Walambe, A.A. Godbole // *IFAC-PapersOnLine*. – 2016. – Vol. 49. – Iss. 1. – P. 308–313.
48. Composite disturbance-observer-based control and control for high speed trains with actuator faults / H. Dong, X. Lin, X. Yao, B. Ning // *Asian Journal of Control*. – 2018. – Vol. 20. – P. 735–745.
49. Disturbance-observer based prescribed-performance fuzzy sliding mode control for PMSM in electric vehicles / Y. Dai, S. Ni, D. Xu, L. Zhang, X. Yan // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. – 2021. – Vol. 104. – P. 3752–3775.
50. Hou Q., Ding S., Yu X. Composite super-twisting sliding mode control design for PMSM speed regulation problem based on a novel disturbance observer // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. – 2021. – Vol. 36. – P. 2591–2599.
51. Disturbance rejection control for PMSM using integral sliding mode based composite nonlinear feedback control with load observer / E. Lu, S. Wang, W. Zhang, C. Luo // *ISA Transactions*. – 2021. – Vol. 116. – P. 203–217.
52. Speed regulation for PMSM with super-twisting sliding-mode controller via disturbance observer / M. Hu, H. Ann, Y. Chung, K. You // *Mathematics*. – 2023. – Vol. 11. – P. 1–15.
53. Уткин В.И. Скользящие режимы и их применение в системах с переменной структурой. – М.: Изд-во «Наука», 1974. – 272 с.
54. Lu X., Lin H., Junlin H. Load disturbance observer-based control method for sensorless PMSM drive // *IET Electric Power Applications*. – 2016. – Vol. 10. – Iss. 8. – P. 735–743.
55. Adaptive sliding mode current control with sliding mode disturbance observer for PMSM drives / Y. Deng, J. Wang, H. Li et al. // *ISA Transactions*. – 2019. – Vol. 88. – P. 113–126.
56. A disturbance observer based approach to current control of PMSM drives for torque ripple reduction / Y. Kim, K. Choi, S. Kim, L. Kim // *IFAC-PapersOnLine*. – 2019. – Vol. 52. – Iss. 4. – P. 206–209.
57. Khlaief A., Boussak M., Chaari A. A MRAS-based stator resistance and speed estimation for sensorless vector controlled IPMSM drive // *Electric Power Systems Research*. – 2014. – Vol. 108. – P. 1–15.
58. Multi-sliding mode current disturbance suppression scheme based model reference adaptive system for sensorless control of permanent magnet synchronous motor / S. Zhang, A. Shen, X. Luo et al. // *ISA Transactions*. – 2023. – Vol. 137. – P. 615–628.
59. Vesely I., Vesely L., Bradac Z. MRAS identification of permanent magnet synchronous motor parameters // *IFAC-PapersOnLine*. – 2018. – Vol. 51. – Iss. 6. – P. 250–255.
60. Sensorless speed control of high-speed permanent magnet synchronous motor based on model reference adaptive system / L. Tian, Y. He, M. Lu et al. // *Chinese Control Conference*. – Guangzhou, China, 2019. – P. 3126–3131.
61. Zolfaghari V., Taher S.A., Munuz D.V. Neural network-based sensorless direct power control of permanent magnet synchronous motor // *Ain Shams Engineering Journal*. – 2016. – Vol. 7. – Iss. 2. – P. 729–740.
62. Gaduo S.M., Giaouris D., Finch J.W. A neural network based stator current MRAS observer for speed sensorless induction motor drives // *Industrial Electronics Conference*. – Washington, D.C. USA, 2008. – P. 650–655.
63. A ripple suppression of sensorless FOC of PMSM electrical drive system based on MRAS / X. Chi, C. Wang, Q. Wu et al. // *Results in Engineering*. – 2023. – Vol. 20. – P. 1–9.
64. Zorgani Y.A., Koubaa Y., Boussak M. MRAS state estimator for speed sensorless ISFOC induction motor drives with Luenberger load torque estimation // *ISA Transactions*. – 2016. – Vol. 61. – P. 308–317.
65. Korzonek M., Tarchala G., Orlowska-Kowalska T. A review on MRAS-type speed estimators for reliable and efficient induction motor drives // *ISA Transactions*. – 2019. – Vol. 93. – P. 1–13.
66. Wang M., Syamsiana I.N., Lin F. Sensorless speed control of permanent magnet synchronous motors by neural network algorithm // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2014. – Vol. 2019. – P. 1–7.
67. Neural network dynamic surface position control of n-joint robot driven by PMSM with unknown load observer / Q. Yang, H. Yu, X. Meng, Y. Shang // *IET Control Theory & Applications*. – 2022. – Vol. 16. – P. 1208–1226.
68. Tan L.N., Cong T.P., Cong D.P. Neural network observers and sensorless robust optimal control for partially unknown PMSM with disturbances and saturating voltages // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2021. – Vol. 36. – Iss. 10. – P. 12045–12056.
69. Hussain S., Bazaz M.A. Sensorless control of PMSM drive using neural network observer // *IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems*. – Delphi, India, 2016. – P. 1–5.
70. Zhuo S., Li Y., Tong S. Finite-time adaptive neural network event-triggered output feedback control for PMSMs // *Neurocomputing*. – 2023. – Vol. 533. – P. 10–21.
71. Observer-based finite-time adaptive neural network control for PMSM with state constraints / S. Zhou, S. Sui, Y. Li, S. Tong // *Neural Computing and Applications*. – 2022. – Vol. 35. – P. 6635–6645.
72. Gao Y., Wang X., Chen Q. Characteristic model-based adaptive control with genetic algorithm estimators for four-PMSM synchronization system // *International Journal of Control, Automation and Systems*. – 2020. – Vol. 18. – P. 1605–1616.
73. Liu K., Zhu Z.Q. Quantum genetic algorithm based parameter estimation of PMSM under variable speed control accounting for system identifiability and VSI nonlinearity // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2014. – Vol. 62. – Iss. 4. – P. 2363–2371.
74. Юрьев В.Н. Оценка качества и конкурентоспособности программных продуктов // *Прикладная информатика*. – 2013. – № 5 (47). – С. 104–111.

Информация об авторах

Александр Савельевич Глазырин, доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; профессор Политехнической школы Югорского государственного университета, Россия, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16; asglazyrin@tpu.ru

Евгений Игоревич Попов, ассистент кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38; <https://orcid.org/0000-0003-2088-4280>, porovei72@mail.ru

Владимир Анатольевич Копырин, кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38; <https://orcid.org/0000-0002-7515-4018>; kopyrinva@gmail.com

Владимир Захарович Ковалев, доктор технических наук, профессор Политехнической школы Югорского государственного университета, Россия, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16; профессор отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; <https://orcid.org/0000-0002-4512-6868>; vz_kovalev@mail.ru

Евгений Владимирович Боловин, кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; инженер-программист ООО ИНТ АО «ЭлеСи», Россия, 634021, г. Томск, ул. Алтайская, 161А, <https://orcid.org/0000-0002-8483-8999>; orange@tpu.ru

Семен Семенович Попов, аспирант отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; инженер-программист ООО «НПФ Мехатроника-Про», Россия, г. Томск, пр. Фрунзе, 119е; <https://orcid.org/0009-0004-4139-8032>ssm@tpu.ru; ssp14@tpu.ru

Сергей Николаевич Кладиев, кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; <https://orcid.org/0000-0001-9432-0176>; kladiev@tpu.ru

Александр Александрович Филипас, кандидат технических наук, доцент отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, <https://orcid.org/0000-0002-5376-5416>; filipas@tpu.ru

Рустам Нуриманович Хамитов, доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики Института промышленных технологий и инжиниринга, Тюменский индустриальный университет, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38; профессор кафедры электрической техники Энергетического института, Омский государственный технический университет, Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11, <https://orcid.org/0000-0001-9876-5471>; apple_27@mail.ru

Поступила в редакцию: 13.05.2024

Поступила после рецензирования: 11.06.2024

Принята к публикации: 14.06.2024

REFERENCES

1. Pankratov V.V. Valve electric drive: from washing machine to metal-cutting machine and electric locomotive. *Elektronnyye komponenty*, 2007, no. 2, pp. 68–77. (In Russ.)
2. Bodkhe S. Steady-state analysis and comparison of control strategies for PMSM. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2015, vol. 15, pp. 1–11.
3. Luenberger D.G. Observing the state of linear system. *IEEE Trans. Mil. Electron.*, 1964, vol. Mil-8, April, pp. 74–80.
4. Kalman R.E. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of Basic Engineering*, 1960, vol. 82, pp. 35–45.
5. Luenberger D.G. An introduction to observers. *IEEE Transactions of Automatic Control*, 1971, vol. AC-16, no. 6, pp. 596–602.
6. Grouz F., Grouz F., Sbita L. Speed sensorless IFOC of PMSM based on adaptive Luenberger observer. *International Journal of Computer and Information Engineering*, 2010, vol. 4, no. 8, pp. 1256–1262.
7. Henwood N., Malaize J., Praly L. A robust nonlinear Luenberger observer for the sensorless control of SM-PMSM: rotor position and magnets flux estimation. *38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. Montreal, Quebec, Canada, 2012. pp. 1625–1630.
8. Brandstetter P., Rech P., Simonik P. Sensorless control of permanent magnet synchronous motor using Luenberger observer. *Progress in Electromagnetics Research Symposium, PIERS*. Cambridge, USA, 2010. pp. 424–428.

9. Luo R., Wang Z., Sun Y. Optimized Luenberger observer-based PMSM sensorless control by PSO. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2022, vol. 2022, pp. 1–17.
10. Busca C. *Open loop low speed control for PMSM in high dynamic*. Denmark, Aalborg University, 2010. 119 p.
11. Glazyrin A.S. Sensorless control of asynchronous electric drive with synergetic regulator. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 321, no. 4, pp. 107–111. (In Russ.)
12. He L., Wang F. Zynq Implemented Luenberger disturbance observer based predictive control scheme for PMSM drives. *IEEE Transaction on Power Electronics*, 2020, vol. 35, Iss. 2, pp. 1770–1778.
13. Glazyrin A.S., Kladiev S.N., Afanasiev K.S., Timaskin V.V., Slepnev I.G. Design of full order observer with real time monitoring of load torque for submersible induction motors. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 2, pp. 118–126. (In Russ.)
14. Bakhti I., Chaouch S., Makoug A., Douadi T. Robust sensorless sliding mode control with Luenberger observer design applied to permanent magnet synchronous motor. *5th International Conference on Systems and Control*. Marrakesh, Morocco, 2016. pp. 204–210.
15. Saihi L., Bouter A. Robust sensorless sliding mode control of PMSM with MRAS and Luenberger extended observer. *8th International on Modelling and Control*. Algeria, Algiers, 2016. pp. 174–179.
16. Hafez B., Abdel-Khalik A., Massoud A.M., Ahmed S., Lorenz R.D. Single-sensor-based three-phase permanent-magnet synchronous motor drive system with Luenberger observers for motor line current reconstruction. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2014, vol. 50, Iss. 4, pp. 2602–2613.
17. Arafat O., Aziz G.A., El-Sebah M.I., Mansour A.A. Observer-based sensorless speed control of PMSM: a focus on drive's startup. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 2016, vol 3, I. 2, pp. 181–209.
18. Glazyrin A.S. Proportional and proportional-integral principles of residual processing in the observer of the full order of the electromechanical object with a linearized model. *Nauchny vestnik NGTU*, 2015, vol. 58, no. 1, pp. 28–39. (In Russ.)
19. Bukreev V.G., Shandarova E.B., Perevoshchikov F.V. State estimation analysis of an induction electric drive by algorithms of Luenberger and Kalman. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 1, pp. 35–43. (In Russ.)
20. Kladiev S.N. Review and critical analysis of the current state and ways to improve regulated power supplies and automatic control systems for electric centrifugal pumping units in intermittent operation of oil wells. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 9, pp. 203–215. (In Russ.)
21. Huang M.C., Moses A.J., Anayi F. The comparison of sensorless estimation techniques for PMSM between extended Kalman filter and flux-linkage observer. *Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*. Dallas, TX, USA, 2006. pp. 654–659.
22. Xu Z., Rahman M.F. An extended Kalman filter observer for the direct torque controlled interior permanent magnet synchronous motor drive. *The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems*. Singapore, 2003. pp. 686–691.
23. Tety P., Konate A., Asseu O. A robust extended Kalman filter for speed-sensorless control of a linearized and decoupled PMSM drive. *Engineering*, 2015, vol. 7, pp. 691–699.
24. Buchta L., Otava L. Compensation of dead-time effects based on Kalman filter for PMSM drives. *IFAC PapersOnLine*, 2018, vol. 51, Iss. 6, pp. 18–23.
25. Buchta L., Bartik O. Dead-time compensation strategies based on Kalman filter algorithm for PMSM drives. *45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Lisbon, Portugal, 2019. pp. 986–991.
26. Moroz A.N., Khamarski P.A., Haban S.A., Sidorovich O.V. The comparative analysis of unscented and extended Kalman filters for global positioning systems receiver data processing. *Doklady BGUIR*, 2014, no. 4, pp. 66–72. (In Russ.)
27. Borsje P., Chan T.F., Wong Y.K., Ho S.L. A comparative study of Kalman filtering for sensorless control of a permanent-magnet synchronous motor drive. *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives*, San Antonio, TX, USA, 2005. pp. 815–822.
28. Chen Z., Wang L., Liu X. Sensorless direct torque control of PMSM using unscented Kalman filter. *Proceedings of the 18th World Congress. The International Federation of Automatic Control*. Milano, Italy, 2011. pp. 4380–4385.
29. Ndjana H.J.N., Lautier Ph. Sensorless vector control of an IPMSM using unscented Kalman filtering. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. Montreal, QC, Canada, 2006. pp. 2242–2247.
30. Janiszewski D. Unscented Kalman filter for sensorless PMSM drive with output filter fed by PWM converter. *38th Annual Conf. IEEE Industrial Electronics Society*. Montreal, Quebec, Canada, 2012. pp. 4660–4665.
31. Khaphizov G.T., Kurnosov D.A., Voronin S.G. Usage of invariant immersion filters in sensorless system of vector control of PMSM. *News of the Ural Mining University*, 2016, no. 4, pp. 72–75. (In Russ.)
32. Brammer K., Ziffing G. *Kalman–Bucy filter*. Moscow, Nauka Publ., 1982. 200 p. (In Russ.)
33. Floquet T., Barbot J., Perruquetti W., Djemai M. On the robust fault detection via a sliding mode disturbance observer. *Intern. J. Control*, 2004, vol. 77, pp. 622–629.
34. Zhirabok A.N., Zuev A.N., Shumskij A.E. Diagnosis of linear dynamic systems: an approach based on sliding mode observers. *AiT*, 2020, no. 2, pp. 18–35. (In Russ.)
35. Zuev A.V., Zhirabok A.N., Filaretov V.F., Protchenko A.A. Fault identification in non-stationary systems based on sliding mode observers. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, no. 22 (12), pp. 625–633. (In Russ.)
36. Wang G., Zhan H. A new speed adaptive estimation method based on an improved flux sliding-mode observer for the sensorless control of PMSM drives. *ISA Transactions*, 2022. vol. 128, pp. 675–685.
37. Gaballah M.M., El Bardini M., Saraf M. Chattering-free sliding mode observer for speed sensorless control of PMSM. *Applied Computing and Informatics*, 2017, vol. 13, Iss. 2, pp. 169–174.
38. Chen Y., Li M., Gao Y., Chen Z. A sliding mode speed and position observer for a surface-mounted PMSM. *ISA Transactions*, 2019, vol. 87, pp. 17–27.

39. Ye S. Design and performance analysis of an iterative flux sliding-mode observer for the sensorless control of PMSM drives. *ISA Transactions*, 2019, vol. 94, pp. 255–264.
40. Ye S. Fuzzy sliding mode observer with dual SOGI-FLL in sensorless control of PMSM drives. *ISA Transactions*, 2019, vol. 94, pp. 161–176.
41. Ye S. A novel fuzzy flux sliding-mode observer for the sensorless speed and position tracking of PMSMs. *Optik*, 2018, vol. 171, pp. 319–325.
42. Lin S., Zhang W. An adaptive sliding-mode observer with a tangent function-based PLL structure for position sensorless PMSM drives. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2017, vol. 88, pp. 64–74.
43. Zhao K., Leng A., Zhou R. Demagnetization fault reconstruction for six-phase permanent magnet synchronous motor by improved super-twisting algorithm-based sliding-mode observer. *Measurement*, 2021, vol. 172, pp. 1–9.
44. Zhao K., Jia N., She J. Robust model-free super-twisting sliding-mode control method based on extended sliding-mode disturbance observer for PMSM drive system. *Control Engineering Practice*, 2023, vol. 139, pp. 105657.
45. Huang G., Li J., Fukushima E.F. An improved equivalent-input-disturbance approach for PMSM drive with demagnetization fault. *ISA Transactions*, 2020, vol. 105, pp. 120–128.
46. Moreno J.A., Ovalle L., Fridman L. Multivariable super-twisting algorithm for systems with uncertain input matrix and perturbations. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2022, vol. 67, Iss. 12, pp. 6716–6722.
47. Apte A.A., Joshi V.A., Walambe R.A., Godbole A.A. Speed control of PMSM using disturbance observer. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, vol. 49, Iss. 1, pp. 308–313.
48. Dong. H., Lin X., Yao X., Ning B. Composite disturbance-observer-based control and control for high speed trains with actuator faults. *Asian Journal of Control*, 2018, vol. 20, pp. 735–745.
49. Dai Y., Ni S., Xu D., Zhang L., Yan X. Disturbance-observer based prescribed-performance fuzzy sliding mode control for PMSM in electric vehicles. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2021, vol. 104, pp. 3752–3775.
50. Hou Q., Ding S., Yu X. Composite super-twisting sliding mode control design for PMSM speed regulation problem based on a novel disturbance observer. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2021, vol. 36, pp. 2591–2599.
51. Lu E., Wang S., Zhang W., Luo C. Disturbance rejection control for PMSM using integral sliding mode based composite nonlinear feedback control with load observer. *ISA Transactions*, 2021, vol. 116, pp. 203–217.
52. Hu M., Ann H., Chung Y., You K. Speed regulation for PMSM with super-twisting sliding-mode controller via disturbance observer. *Mathematics*, 2023, vol. 11, pp. 1–15.
53. Utkin V.I. *Sliding modes and their use in variable structure systems*. Moscow, Nauka Publ., 1974. 272 p. (In Russ.)
54. Lu X., Lin H., Junlin H. Load disturbance observer-based control method for sensorless PMSM drive. *IET Electric Power Applications*, 2016, vol. 10, Iss. 8, pp. 735–743.
55. Deng Y., Wang J., Li H. Adaptive sliding mode current control with sliding mode disturbance observer for PMSM drives. *ISA Transactions*, 2019, vol. 88, pp. 113–126.
56. Kim Y., Choi K., Kim S., Kim L. A disturbance observer based approach to current control of PMSM drives for torque ripple reduction. *IFAC-PapersOnLine*, 2019, vol. 52, Iss. 4, pp. 206–209.
57. Khlaief A., Boussak M., Chaari A. A MRAS-based stator resistance and speed estimation for sensorless vector controlled IPMSM drive. *Electric Power Systems Research*, 2014, vol. 108, pp. 1–15.
58. Zhang S., Shen A., Luo X. Multi-sliding mode current disturbance suppression scheme based model reference adaptive system for sensorless control of permanent magnet synchronous motor. *ISA Transactions*, 2023, vol. 137, pp. 615–628.
59. Vesely I., Vesely L., Bradac Z. MRAS identification of permanent magnet synchronous motor parameters. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, vol. 51, Iss. 6, pp. 250–255.
60. Tian L., He Y., Lu M. Sensorless speed control of high-speed permanent magnet synchronous motor based on model reference adaptive system. *Chinese Control Conference*. Guangzhou, China, 2019. pp. 3126–3131.
61. Zolfaghari V., Taher S.A., Munuz D.V. Neural network-based sensorless direct power control of permanent magnet synchronous motor. *Ain Shams Engineering Journal*, 2016, vol. 7, Iss. 2, pp. 729–740.
62. Gaduo S.M., Giaouris D., Finch J.W. A neural network based stator current MRAS observer for speed sensorless induction motor drives. *Industrial Electronics Conference*. Washington, D.C. USA, 2008. pp. 650–655.
63. Chi X., Wang C., Wu Q. A ripple suppression of sensorless FOC of PMSM electrical drive system based on MRAS. *Results in Engineering*, 2023, vol. 20, pp. 1–9.
64. Zorgani Y.A., Koubaa Y., Boussak M. MRAS state estimator for speed sensorless ISFOC induction motor drives with Luenberger load torque estimation. *ISA Transactions*, 2016, vol. 61, pp. 308–317.
65. Korzonek M., Tarchala G., Orlowska-Kowalska T. A review on MRAS-type speed estimators for reliable and efficient induction motor drives. *ISA Transactions*, 2019, vol. 93, pp. 1–13.
66. Wang M., Syamsiana I.N., Lin F. Sensorless speed control of permanent magnet synchronous motors by neural network algorithm. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, vol. 2019, pp. 1–7.
67. Yang Q., Yu H., Meng X., Shang Y. Neural network dynamic surface position control of n-joint robot driven by PMSM with unknown load observer. *IET Control Theory & Applications*, 2022, vol. 16, pp. 1208–1226.
68. Tan L.N., Cong T.P., Cong D.P. Neural network observers and sensorless robust optimal control for partially unknown PMSM with disturbances and saturating voltages. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, vol. 36, Iss. 10, pp. 12045–12056.
69. Hussain S., Bazaz M.A. Sensorless control of PMSM drive using neural network observer. *IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems*. Delphi, India, 2016. pp. 1–5.
70. Zhuo S., Li Y., Tong S. Finite-time adaptive neural network event-triggered output feedback control for PMSMs. *Neurocomputing*, 2023, vol. 533, pp. 10–21.
71. Zhuo S., Sui S., Li Y., Tong S. Observer-based finite-time adaptive neural network control for PMSM with state constraints. *Neural Computing and Applications*, 2022, vol. 35, pp. 6635–6645.

72. Gao Y., Wang X., Chen Q. Characteristic model-based adaptive control with genetic algorithm estimators for four-PMSM synchronization system. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2020, vol. 18, pp. 1605–1616.
73. Liu K., Zhu Z.Q. Quantum genetic algorithm based parameter estimation of PMSM under variable speed control accounting for system identifiability and VSI nonlinearity. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, vol. 62, Iss. 4, pp. 2363–2371.
74. Yriev V.N. Quality and competitiveness evaluation of software products. *Prikladnaya informatika*, 2013, no. 5 (47), pp. 104–111. (In Russ.)

Information about the authors

Alexander S. Glazyrin, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; Professor, Yugra State University, 16, Chekhov street, Khanty-Mansiysk, 628012, Russian Federation. asglazyrin@tpu.ru

Evgeniy I. Popov, Assistant, Industrial University of Tyumen, 38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0003-2088-4280>, popovei72@mail.ru

Vladimir A. Kopyrin, Cand. Sc., Associate Professor, Industrial University of Tyumen, 38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0002-7515-4018>; kopyrinva@gmail.com

Vladimir Z. Kovalev, Dr. Sc., Professor, Yugra State University, 16, Chekhov street, Khanty-Mansiysk, 628012, Russian Federation; Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0002-4512-6868>; vz_kovalev@mail.ru

Evgeniy V. Bolovin, Cand. Sc., Associate Professor National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; Software Engineer, LLC «INT» of JSC «EleSy», 161A, Altaiskaya street, Tomsk, 634021, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0002-8483-8999>; orange@tpu.ru

Semen S. Popov, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; Software Engineer «NPF Mechatronica-Pro» LTD, 119e, Frunze avenue, Tomsk, 634513, Russian Federation. ssp14@tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0004-4139-8032>

Sergey N. Kladiev, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0001-9432-0176>; kladiev@tpu.ru

Alexander A. Filipas, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0002-5376-5416>; filipas@tpu.ru

Rustam N. Khamitov, Dr. Sc., Professor, Tyumen Industrial University, 38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russian Federation; Professor, Omsk State Technical University, 11, Mira avenue, Omsk, 644050, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0001-9876-5471>; apple_27@mail.ru

Received: 13.05.2024

Revised: 11.06.2024

Accepted: 14.06.2024

Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Корректура и перевод на английский язык *С.В. Жаркова*
Дизайн обложки *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива
Валерия Касаткина

Руководство для авторов и образец оформления статьи: izvestiya.tpu.ru

Подписано к печати 26.06.2024. Дата выхода журнала: 28.06.2024.
Формат 60х84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 29,89. Уч.-изд. л. 27,04.
Заказ 224-24. Тираж 500 экз. Цена свободная.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Адрес учредителя, редакции, издателя, типографии:
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, каб. 139.

