

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 333, № 7, 2022

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Семилетов И.П., гл. редактор, д-р геогр. наук (Россия)
Оствальд Р.В., канд. хим. наук (Россия)
Савичев О.Г., д-р геогр. наук (Россия)
Покровский О.С., канд. геол.-минерал. наук (Франция)
Старостенко В.И., д-р физ.-мат. наук (Украина)
Конторович А.Э., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Белозеров В.Б., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Никитенков Н.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Силкин В.М., д-р физ.-мат. наук (Испания)
Коротеев Ю.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Уленекс О.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Борисов А.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Коршунов А.В., д-р хим. наук (Россия)
Пестряков А.Н., д-р хим. наук (Россия)
Тойпель У., Dsc (Германия)
Джин-Чун Ким, Dsc (Южная Корея)
Заворин А.С., д-р техн. наук (Россия)
Ханьялич К., Dsc (Нидерланды)
Маркович Д.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Алексеев С.В., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Воропай Н.И., д-р техн. наук (Россия)
Чогегуров А.И., канд. техн. наук (Россия)
Руи Д., PhD (Португалия)
Зиатдинов Р.А., канд. физ.-мат. наук (Южная Корея)
Спицын В.Г., д-р техн. наук (Россия)
Муравьев С.В., д-р техн. наук (Россия)
Пойлов В.З., д-р техн. наук (Россия)
Лотов В.А., д-р техн. наук (Россия)
Софронов В.Л., д-р хим. наук (Россия)
Бузник В.М., д-р хим. наук (Россия)
Захаров Ю.А., д-р хим. наук (Россия)
Антипенко В.Р., д-р хим. наук (Россия)
Голик В.И., д-р техн. наук (Россия)
Абуталипова Е.М., д-р техн. наук (Россия)
Полищук В.И., д-р техн. наук (Россия)
Хамитов Р.Н., д-р техн. наук (Россия)
Зюев А.М., д-р техн. наук (Россия)
Третьяк А.Я., д-р техн. наук (Россия)
Арбузов С.И., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Ковалев В.З., д-р техн. наук (Россия)
Романенко С.В., д-р хим. наук (Россия)
Кириянова Л.Г., канд. филос. наук (Россия)
Глазырин А.С., выпуск. редактор, д-р техн. наук (Россия)
Строкова Л.А., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Мазуров А.К., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Боярко Г.Ю., д-р экон. наук, канд. геол.-минерал. наук (Россия)
Стрижак П.А., д-р физ.-мат. 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, 2022

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

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

Учредителем является Томский политехнический университет.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

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

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

Volume 333, № 7, 2022

EDITORIAL BOARD

Semiletov I.P., editor in chief, Dr. Sc. (Russia)
Ostvald R.V., Cand. Sc. (Russia)
Savichev O.G., Dr. Sc. (Russia)
Pokrovsky O.S., Cand. Sc. (France)
Starostenko V.I., Dr. Sc. (Ukraine)
Kontorovich A.E., Dr. Sc. (Russia)
Belozеров V.B., Dr. Sc. (Russia)
Nikitenkov N.N., Dr. Sc. (Russia)
Silkin V.M., PhD (Spain)
Koroteev Yu.M., Dr. Sc. (Russia)
Ulenekov O.N., Dr. Sc. (Russia)
Borisov A.M., Dr. Sc. (Russia)
Korshunov A.V., Dr. Sc. (Russia)
Pestryakov A.N., Dr. Sc. (Russia)
Teipel U., Dsc (Germany)
Jin-Chun Kim, Dsc (South Korea)
Zavorin A.S., Dr. Sc. (Russia)
Hanjalic K., Dsc (Netherlands)
Markovich D.M., Dr. Sc. (Russia)
Aleksenko S.V., Dr. Sc. (Russia)
Voropai N.I., Dr. Sc. (Russia)
Kochegurov A.I., Cand. Sc. (Russia)
Rui D., PhD (Portugal)
Ziatdinov R.A., Cand. Sc. (South Korea)
Muravyov S.V., Dr. Sc. (Russia)
Spitsyn V.G., Dr. Sc. (Russia)
Poilov V.Z., Dr. Sc. (Russia)
Lotov V.A., Dr. Sc. (Russia)
Sofronov V.L., Dr. Sc. (Russia)
Bouzunik 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)
Glazyrin A.S., managing editor, Dr. Sc. (Russia)
Ludmila A. Strokova, Dr. Sc. (Russia)
Alexey K. Mazurov, Dr. Sc. (Russia)
Boyarko G.Yu., Dr. Sc., Cand. Sc. (Russia)
Strizhak P.A., 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.

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

- Взаимодействие капель огнетушащих составов с фрагментами горючих материалов**
Жданова А.О., Исламова А.Г., Копылов Н.П. 7
Interaction of drops of fire-extinguishing compositions with fragments of combustible materials
Zhdanova A.O., Islamova A.G., Kopylov N.P.
- Обоснование оптимальных параметров стабилизирующих колонковых компоновок при бурении скважин в условиях естественного искривления**
Буглов Н.А., Пушмин П.С. 20
Substantiation of optimal parameters of stabilizing column arrangements when drilling wells in conditions of natural curvature
Buglov N.A., Pushmin P.S.
- Применение метода локальных бинарных шаблонов для сравнительной оценки взаимосвязи между структурой и свойствами наполненных техническим углеродом эластомеров**
Минакова Н.Н., Ушаков В.Я. 30
Application of the method of local binary templates for a comparative evaluation of the relationship between the structure and properties of carbon black-filled elastomers
Minakova N.N., Ushakov V.Ya.
- Оценка качества расчёта анизотропии проницаемости на примере терригенного пласта**
Коровин М.О. 38
Estimation of permeability anisotropy calculation quality on the example of a terrigenous formation
Korovin M.O.
- Внедрение волнового торцевого кинематического редуктора в насосные технологии добычи тяжелой высоковязкой нефти в экстремальных условиях**
Джасем М.А., Крауинш П.Я. 45
Introduction of a wave face kinematic reducer in pumping technologies for the extraction of high-viscous oil in extreme conditions
Jasem M.A., Krauinsh P.Ya.
- Литолого-фациальная характеристика и коллекторский потенциал осинского продуктивного горизонта Большетирского месторождения (Восточная Сибирь)**
Вараксина И.В., Иванова Н.А. 54
Lithofacial characteristic and petroleum potential of the Osinsky productive horizon of the Bolshetirsk deposit (Eastern Siberia)
Varaksina I.V., Ivanova N.A.
- Изменение гидрогеологических условий Шумихинского месторождения угля (Предуралье) под влиянием подземных горных работ**
Имайкин А.К., Имайкин К.К. 64
Changes in hydrogeological conditions of the Shumikhinsky coal deposit (Pre-Urals) as a result of underground mining
Imaykin A.K., Imaykin K.K.
- Исследование температуры массива горных пород Березовского рудника ОАО «Беларуськалий»**
Зайцев А.В., Бородавкин Д.А., Бублик С.А., Агеева К.М. 76
Study of rock temperature distribution in the Berezovsky mine field of Belaruskali company
Zaitsev A.V., Borodavkin D.A., Bublik S.A., Ageeva K.M.
- Обоснование аналитической модели гидравлической извилистости поровых каналов коллекторов Западной Сибири по данным капиллярных исследований**
Ахметов Р.Т., Кулешова Л.С., Велиев Э.Ф. о.глы, Мухаметшин В.В., Сафиуллина А.Р. 86
Substantiation of an analytical model of reservoir pore channels hydraulic tortuosity in Western Siberia based on capillary research data
Akhmetov R.T., Kuleshova L.S., Veliyev E.F. o.gly, Mukhametshin V.V., Safiullina A.R.
- Оценка вязкости водных растворов ксантановых смол**
Ламбин А.И., Аверкина Е.В., Ерыгина А.Н., Красинская А.С. 96
Evaluation of the viscosity of aqueous solutions of xanthan resins
Lambin A.I., Averkina E.V., Erygina A.N., Krasinskaya A.S.
- Микроэлементы в воде малых рек бассейна реки Анюй (западный макросклон северного Сихотэ-Алиня)**
Шестеркина Н.М., Шестеркин В.П. 104
Trace elements in the water of small rivers of the Anyu river basin (western macro-slope of the northern Sikhote-Alin)
Shesterkina N.M., Shesterkin V.P.
- Прогнозирование потребления электрической энергии промышленным предприятием с помощью методов машинного обучения**
Моргоева А.Д., Моргоев И.Д., Ключев Р.В., Гаврина О.А. 115
Forecasting of electric energy consumption by an industrial enterprise using machine learning methods
Morgoeva A.D., Morgoev Ir.D., Klyuev R.V., Gavrina O.A.
- Тяжелые металлы и мышьяк в почвах района размещения промышленных предприятий и атомной электростанции (на примере Белоярской АЭС)**
Панов А.В., Трапезников А.В., Коржавин А.В., Сидорова Е.В., Корнеев Ю.Н. 126
Heavy metals and arsenic in soils in the vicinity of industrial enterprises and nuclear power plant (by the example of the Beloyarsk NPP)
Panov A.V., Trapeznikov A.V., Korzhavin A.V., Sidorova E.V., Korneev Yu.N.
- Геохимические особенности солевых образований питьевых вод Южного Казахстана**
Шарипова Б.У., Какабаев А.А., Барановская Н.В., Арынова Ш.Ж., Корогод Н.П. 137
Geochemical features of salt formations of drinking water in Southern Kazakhstan
Sharipova B.U., Kakabayev A.A., Baranovskaya N.V., Arynova Sh.Zh., Korogod N.P.
- Повышение эффективности разделения жидких систем на основе улучшения энергетических характеристик в роторах фильтрующих центрифуг различных конструкций**
Хабибуллин М.Я. 149
Increasing the efficiency of separating liquid systems on the basis of improving energy characteristics in rotors of filtering centrifuges of various designs
Khabibullin M.Ya.

- Перколяционный подход при гидродинамическом моделировании воздействия на призабойную зону скважины**
Сентемов А.А., Дорфман М.Б.
- Режимы работы установок электропитания центробежных насосов с многоуровневой широтно-импульсной модуляцией**
Михальченко С.Г., Тимошкин В.В., Воронина Н.А., Семенов С.М., Попов С.С., Афанасьев К.С.
- Антропогенный фактор в усилении оползневой деятельности в сахалинской области на примере схода оползня и разрушения инфраструктуры резервуара чистой воды в п. Синегорск**
Сахаров В.А., Ильин В.В., Ильин Н.В., Строкин К.Б., Новиков Д.Г.
- Повышение эффективности глушения нефтяных скважин на месторождениях Волго-Уральской нефтегазоносной провинции с аномально низкими пластовыми давлениями**
Мардашов Д.В., Лиманов М.Н.
- Химический состав родников как индикатор природно-техногенной эволюции городской экосистемы (на примере города Томска, юго-восток Западной Сибири)**
Пасечник Е.Ю., Лготин В.А., Савичев О.Г., Чилингер Л.Н., Хвашчевская А.А., Чжоу Дань
- 157 **Percolation approach in reservoir simulation of well treatment methods**
Sentemov A.A., Dorfman M.B.
- 166 **Supply modes of electric submersible pumps with multilevel pulse-width modulation**
Mikalchenko S.G., Timoshkin V.V., Voronina N.A., Semenov S.M., Popov S.S., Afanasiev K.S.
- 178 **Anthropogenic factor in enhancing landslide activity in Sakhalin region on the example of a landslides and destruction of the infrastructure of a pure water reservoir in Sinegorsk**
Sakharov V.A., Ilin V.V., Ilin N.V., Strokin K.B., Novikov D.G.
- 185 **Improving the efficiency of oil well killing at the fields of the Volga-Ural oil and gas province with abnormally low reservoir pressure**
Mardashov D.V., Limanov M.N.
- 195 **Chemical composition of springs as an indicator of natural-technogenic evolution of the urban ecosystem (on the example of Tomsk city, south-east of Western Siberia)**
Pasechnik E.Yu., Savichev O.G., Lgotin V.A., Chilingier L.N., Khvashchevskaya A.A., Zhou Dan

УДК 614.841.42; 532.64

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КАПЕЛЬ ОГНЕТУШАЩИХ СОСТАВОВ С ФРАГМЕНТАМИ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Жданова Алёна Олеговна¹,
zhdanovaao@tpu.ru

Исламова Анастасия Гомильевна¹,
agi2@tpu.ru

Копылов Николай Петрович²,
np.nanpb@mail.ru

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

² Научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России,
Россия, 143903, г. Балашиха, микрорайон ВНИИПО, 12.

Актуальность. Наиболее распространенным огнетушащим составом для локализации и ликвидации возгораний природного и техногенного характера является вода. Практически ежегодное увеличение площадей возгораний бореальной зоны, а также удаленности очагов возгорания от водоисточников обуславливает необходимость повышения ресурсоэффективности тушения. Основной задачей при тушении техногенных возгораний является снижение расхода огнетушащих средств, что позволит снизить риск чрезмерного заливания водой помещений и сократить материальные затраты на восстановление объектов. Для этих целей целесообразно совершенствовать существующие и разрабатывать новые огнетушащие составы. Недостаточная изученность процессов, происходящих при взаимодействии капель различных типичных огнетушащих жидкостей с поверхностью горючих материалов, и высокая научно-практическая значимость подобных исследований обуславливает актуальность.

Цель: установление закономерностей смачивания, растекания и испарения капель огнетушащих составов по поверхностям горючих материалов при кондуктивном нагреве.

Объект: огнетушащие составы (вода; растворы антипирена, ФР-Лес, бишофита; суспензии бентонита; эмульсии пенообразователя) различной концентрации.

Методы. Исследование процессов смачивания и испарения капель огнетушащих составов проводилось методом «неподвижной» капли (размещенной на твердой поверхности с помощью электронного дозатора). Для определения геометрических характеристик капель применялась теневая оптическая система, полученные изображения обрабатывались с помощью специального программного обеспечения методами «тангенциальный 1» и «Юнга–Лапласа».

Результаты. Установлены основные закономерности смачивания и испарения капель огнетушащих составов на поверхностях горючих материалов (листья березы, древесины, ламинированной древесно-стружечной плите, линолеуме и поливинилхлориде). Показано, что при подавлении пиролиза горючих материалов в глубине слоя более эффективными будут составы с меньшим поверхностным натяжением, проникающие в более глубокие слои горючего материала. В таких условиях охлаждаются нагретые до высоких температур фрагменты материалов и подавляется процесс генерации горючего – газообразных продуктов термического разложения. Установлено, что доминирующим механизмом подавления горения и пиролиза при тушении горючих материалов (а именно при использовании антипиренов, бишофита, бентонита, ФР-Лес) является формирование защитного слоя на поверхности элементов веществ и материалов, а не поглощение теплоты при испарении растворителя. Зависимости средних по времени скоростей испарения капель огнетушащих составов от температуры нагрева поверхности описаны экспоненциальной кривой $W_E = a \cdot T^b$.

Ключевые слова:

Смачивание, капля, пожаротушение, огнетушащие составы, горючий материал.

Введение

Проблема возгораний природного [1–3] и техногенного [4–7] характера является острой для всего мирового сообщества. Зарегистрировано увеличение на 20 % площади возгораний бореальной зоны на территории России в 2021 г. по сравнению с 2020 г. до 18,2 млн га [8]. Чрезвычайные происшествия подобного рода наносят существенный урон для населения и государства в целом. Возгорания влекут за собой значительные экономические, социальные и другие потери [5]. Вследствие пожаров под угрозой находятся жизни специалистов пожарных служб и мирного населения. Повышение огнестойкости зда-

ний и сооружений [5] является актуальным направлением в научной среде. Восстановление помещений и здания в целом после пожара может занимать длительный период времени. Продолжительный по времени простой помещений может нанести существенные убытки. Применение технологий распыления мелкодисперсной огнетушащей жидкости [9–11], позволяет снизить риск чрезмерного заливания помещений водой и сократить расход водного ресурса планеты. Применение на практике систем с распылением воды позволяет запустить одновременно несколько основополагающих механизмов подавления горения, а именно отвод тепла, вытеснение кислорода из зоны горения и ослабление теплового излучения

очага пожара [12]. Однако не всегда удается достоверно определить критические значения расхода водяного аэрозоля для ограниченных пространств помещений [12].

Вода является наиболее распространенным огнетушащим составом. Установлено [13], что около 95 % жидкости из-за низких смачивающих свойств стекает по поверхности элементов лесного горючего материала, а 5 % поглощается почвой, что влечет за собой увеличение расхода воды. Одним из способов повышения огнетушащей эффективности воды является добавление к ней неорганических соединений (антипиренов). Химические добавки широко применяются для тушения лесных пожаров в Северной Америке, Австралии и странах Средиземноморского бассейна [13]. Так, например, антипирены используются при тушении лесных пожаров с целью снижения скорости распространения пламенного горения. Химическими элементами, в наибольшей степени ответственными за замедление горения, являются фосфор, сурьма, хлор, бром, бор и азот [14]. Благодаря разнообразной группе химических веществ антипиренов еще одним практическим применением специализированной добавки является снижение воспламеняемости материалов (посредством добавления антипиренов в состав последних), таких как пластмасса, текстиль и изделия из древесины [15]. В области пожарной охраны проведены подобные исследования по измерению относительной пожароопасности хвои *Pinus halepensis* [16]. В частности, огнезащитные характеристики 28 различных неорганических химических соединений (Cu, Fe, Al₂O₃, Fe₂O₃, SiO₂·H₂O, NaHCO₃, KI, KBr, KCl, NaCl, CaCO₃, MnSO₄·5H₂O, CuSO₄·5H₂O, MgCl₂·6H₂O, Na₂B₄O₇·10H₂O, Na₂HPO₄, Na₂CO₃, Na₂SiO₃, ZnSO₄·7H₂O, Zn₃(PO₄)₂·2H₂O, NH₄Br, NH₄Cl, NH₄HCO₃, (NH₄)₂CO₃, NH₄H₂PO₄ (MAP), DAP, AS, Fire-Trol GTS-R) были протестированы в условиях измерения относительной пожароопасности горючего материала (хвои), обработанного перечисленной группой веществ [16]. Установлено, что среди исследованных химических соединений наилучшие характеристики показали фосфаты аммония, за ними следуют сульфаты аммония и кремнезем. Антипирены диссоциируют на радикалы, которые прерывают процесс горения. Что касается галогенов, эффективность антипирена увеличивается в порядке F < Cl < Br < I, установленная последовательность соответствует уменьшению стабильности связи углерод–галоген [17]. На практике в основном применяются только антипирены на основе хлора и брома [17] по причине неэффективности и высокой стоимости фторидов, а также нестабильности соединений с йодом. Также следует отметить исследование влияния двух антипиренов (NH₄)₂SO₄ и (NH₄)₂HPO₄ на пиролиз целлюлозы [18]. Наличие химических соединений (NH₄)₂SO₄ и (NH₄)₂HPO₄ привело к выделению двух этапов разложения целлюлозы. Первому этапу соответствует сдвиг температуры разложения целлюлозы и увеличение количества выделяющейся H₂O в 6–8 раз (вероятно, в результате реакции с гидроксильными группами). На втором этапе образуется обугливающийся

остаток (следует отметить его увеличение в 2,5 раза [18]) наряду с тем, что увеличение количества CO₂ в 2,5 раза выше при наличии соединений (NH₄)₂SO₄ и (NH₄)₂HPO₄.

На энергетических объектах, в частности хранилищах топлива, для предотвращения самопроизвольного возгорания угля традиционно применяется пропитка последнего растворами со специализированными органическими и неорганическими добавками [14]. Однако основное действие ингибиторов горения реализуется при нормальной температуре окружающей среды. При более высоких температурах (около 300 °C) протекают химические реакции между углем и добавками [14]. Изучено [14] с помощью термического анализа влияние CaCl₂ и мочевины на процесс торможения окисления угля. Установлено, что при температуре выше 200 °C мочевина выступает скорее как катализатор, чем как ингибитор горения. В тех же условиях применение CaCl₂ приводит к подавлению горения. Следует отметить [17], что суперабсорбирующие гидрогели, приготовленные путем смешивания бентонитового порошка и акриламида, могут быть эффективными для ослабления активности различных кислородсодержащих функциональных групп в угольных породах. Результаты экспериментов по ускорению окисления угля показали, что приготовленные глинистые суспензии, стабилизированные альгинатными жидкими гелями, могут улучшить термическую стабильность угля и эффективно ингибировать процесс самопроизвольного окисления угля за счет увеличения температуры пиролиза и снижения выбросов CO [19].

В условиях возгорания огонь может распространиться на обширные территории за относительно короткий промежуток времени. На основании этого первостепенной и основной задачей специалистов пожарных служб является подавление пламенного горения и реакции термического разложения горящих материалов за минимальный временной период. Установлено, что скорость проникновения растворов смачивателей через слой рыхлой гниющей древесины выше в 68 раз по сравнению с водой [20]. Одним из основополагающих механизмов подавления горения является блокирование поступления в зону горения горючего компонента (газообразных продуктов термического разложения горючих материалов). В условиях подавления реакции пиролиза нагретых до высоких температур материалов особенно важным становится изучение свойств смачиваемости огнетушащих составов [21]. Так, например, измерение контактного угла до и после термической обработки показало значительное увеличение гидрофобности древесины [22–25]. Следует отметить результаты исследований [23] по оценке динамического смачивания термически модифицированной древесины, образцов тополя китайского (*Populus cathayana* Rehd.) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Материалы подвергали термической модификации в печи при температурах 160, 180, 200, 220 и 240 °C в течение 4 часов [23]. Установлено [23], что термическая модификация снизила динамическую смачиваемость древесины

(уменьшились скорости распространения и проникновения капель воды). Также в ряде исследований зарегистрирована термическая модификация тика (180 и 200 °С) [24], ели обыкновенной и сосны обыкновенной (170, 190, 210 и 230 °С) [25], белого ясеня и мягкого клена (205–215 °С). По результатам проведенных опытов [24, 25] зарегистрировано снижение смачиваемости образцов. Отмечено [26], что химический состав поверхности древесины коррелирует со статической смачиваемостью последней.

При организации процесса локализации и ликвидации горения природных пожаров на обширных территориях погодные условия влияют на процесс подавления пламенного горения и реакции термического разложения горючих материалов. Так, можно отметить, анализ [27] взаимосвязи между влагоемкостью древесного полога и смачиваемостью листьев при изменении моделируемой температуры осадков. Установлено, что повышение температуры воды привело к уменьшению контактных углов на поверхностях листьев и хвои и, следовательно, увеличило их смачиваемость. В частности [27], повышение температуры осадков на 1 °С привело к уменьшению контактных углов на 3,15° у листьев дуба (наименьший эффект) и на 3,71° у хвои ели (наибольший эффект), и увеличена влагоемкость лиственных пород с 1,35 до 1,89 г/г и хвойных пород с 1,43 до 1,71 г/г. Определено [28], что с увеличением высоты произрастания смачиваемость листьев значительно уменьшалась параллельно наблюдаемому снижению температуры атмосферы (0,5 К/100 м). Листья тропического и субтропического происхождения хорошо смачивались ($\theta < 90^\circ$) [28]. Листья умеренного пояса не смачивались ($110^\circ < \theta < 130^\circ$) [28]. Субальпийские и альпийские растения проявляли супергидрофобность ($130^\circ < \theta < 150^\circ$) [28]. Получены экспериментальные данные об изменении адгезии дождевых капель на

листьях дуба в течение вегетационного периода [29]. Сделан вывод, что смачиваемость и уровень улавливания капель воды увеличиваются с возрастом листа, особенно у деревьев с хорошо развитой кроной [29].

На основании вышеизложенного целью настоящей работы является установление закономерностей смачивания, растекания и испарения капель огнетушащих составов по поверхностям типичных горючих материалов в нормальных условиях и при кондуктивном нагреве.

Методика исследования

Материалы. Огнетушащие вещества [30–33] классифицируются на три категории: смачивающие, огнезадерживающие и тушащие. При выборе добавок следует учитывать их эффективность при тушении определенных категорий веществ, а также класс и сложность пожара. Практический опыт и результаты лабораторных и полевых испытаний [1] позволили противопожарным службам определить наиболее эффективные составы по экологическим и экономическим критериям. Группа таких составов представлена в табл. 1. В качестве эталонной жидкости использовалась дистиллированная вода.

Концентрации составов (С, %) выбраны согласно рекомендациям [30–33]. В экспериментах использованы типичные горючие материалы, приведенные на рис. 1.

В экспериментальных исследованиях использовались бруски из сосны размерами 20×20×100 мм, толщина листа березы составила 0,1 мм, образца ДСП, линолеума и ПВХ размерами 30×10×12 мм. Относительная влажность древесины и листьев не превышала 8 и 2 %, соответственно. Шероховатость горючих материалов древесины и листьев березы не оценивалась, поскольку природные материалы характеризуются уникальной морфологией.

Таблица 1. Огнетушащие составы, используемые в экспериментальных исследованиях

Table 1. Fire extinguishing compositions used in experimental studies

Огнетушащий состав Fire extinguishing composition	Вода Water	Раствор антипирена Flame retardant solution	Раствор ФР-Лес Solution FR-Les		Суспензия бентонита Bentonite slurry		Раствор бишофита Bischofite solution		Раствор огнетушащего состава ОС-5 Fire extinguishing solution OS-5			Эмульсия пенообразователя Foam emulsion	
			С3	С4	С5	С6	С7	С8	С9	С10	С11	С12	С13
С, %	100	5	5	20	1	5	5	10	5	10	15	1	5
№ состава Composition number	С1	С2	С3	С4	С5	С6	С7	С8	С9	С10	С11	С12	С13
ρ, кг/м ³ /kg/m ³	980	1040	996	1044	995	1056	1048	1090	1099	1154	1200	1068	1128



Рис. 1. Типичные горючие материалы: I – лист березы; II – древесина; III – ламинированная древесно-стружечная плита (ДСП); IV – линолеум; V – поливинилхлорид (ПВХ)

Fig. 1. Typical combustible materials: I – birch leaf; II – wood; III – laminated chipboard (chipboard); IV – linoleum; V – polyvinyl chloride (PVC)

Методика определения характеристик смачивания. Исследования смачивания каплей огнетушащими составами горючих материалов проводились на экспериментальной установке (рис. 2) с использова-

нием теневой оптической системы [34, 35]. Подобная методика экспериментальных исследований была применена в работах [23–25] и доказала свою адекватность.

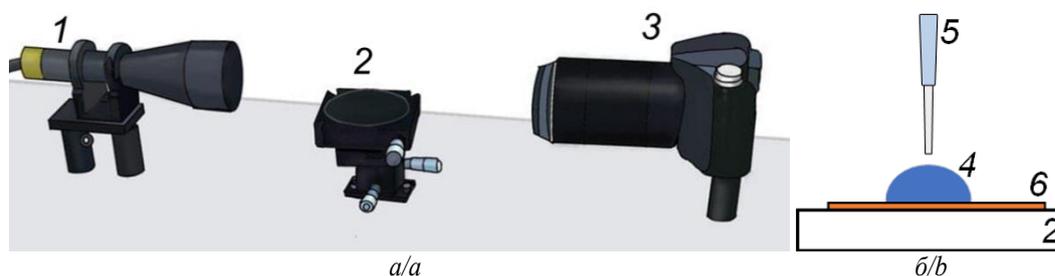


Рис. 2. Схематичное изображение экспериментальной установки (а) и расположение капли огнетушащего состава на горючем материале (б): 1 – источник света; 2 – рабочий участок; 3 – фотоаппарат; 4 – капля огнетушащего состава; 5 – дозатор Ленпипет; 6 – образец горючего материала

Fig. 2. Schematic representation of the experimental setup (a) and location of the fire extinguishing composition drop on the combustible material (b): 1 – light source; 2 – working area; 3 – camera; 4 – drop of fire extinguishing composition; 5 – Lenpipet dispenser; 6 – sample of combustible material

В теневой оптической системе источник – 1 освещал каплю огнетушащего состава – 4, которая генерировалась с помощью одноканального дозатора Ленпипет – 5 на исследуемый образец – 6, расположенный на рабочем участке – 2. Теневое изображение получено с помощью фотоаппарата Nikon D7100 – 3. При исследовании смачивания горючих материалов (листья березы, древесина, ДСП, линолеум, ПВХ) объем каплей огнетушащих составов варьировался от 5 до 25 мкл с шагом 5 мкл. Объемы каплей выбраны на основании ранее проведенных исследований [36]. Смачиваемость характеризовалась контактным углом. По полученным теневым изображениям с помощью программного обеспечения методами «тангенциальный 1» и «Юнга–Лапласа» определялись геометрические характеристики капли (контактный угол (θ), диаметр (d) и высота (h)).

Методика определения характеристик процесса испарения. С целью установления основных закономерностей смачивания и испарения каплей огнетушащих составов с ростом температуры поверхности установка (рис. 2) модифицировалась. Подробное описание установки и методики приведено в [34]. В условиях нагрева горючих материалов их поверхности деформируется по причине начала термического разложения. Зарегистрировать геометрические характеристики каплей по теневым изображениям не представляется возможным, по этой причине в экспериментах по определению скорости испарения огнетушащих составов использована подложка из стали ASTM A 240/A 240M 430 (Fe 82,701, C 0,046, Si 0,38, Mn 0,36, P 0,029, S 0,003, Ni 0,22, Cr 16,23, N 0,031 масс. %). Оценена шероховатость поверхности с помощью профилометрического комплекса «Micro Measure 3D station». Среднее квадратичное отклонение высоты поверхности (Sq) составило 0,06 мкм, максимальная высота неровностей (Sz) – 0,11 мкм. Температура поверхности варьировалась в диапазоне от 20 до 100 °С. Объем каплей был постоянен и равен 10 мкл. Величины контактных радиусов каплей объе-

мом 10 мкл не превышали значения капиллярной постоянной (L) исследуемых жидкостей. В таких условиях ($r \geq L = \gamma / (\rho \cdot g)$) размер капли, от которого зависит действующая на нее сила тяжести, не оказывал влияния на статический контактный угол. Установка (рис. 2) изолировалась от возможного влияния внешних неконтролируемых факторов (колебания температуры и скорости движения воздуха в помещении лаборатории) прозрачным боксом, изготовленным из полимерного стекла толщиной 3 мм. Последнее обеспечивало постоянство условий теплообмена с внешней средой. В каждой серии экспериментов проводилось пять измерений с целью определения и минимизации случайной составляющей погрешности.

Результаты исследования

Смачивание поверхностей горючих материалов каплями огнетушащих составов. При горении материалов поставщиком горючего (газообразных продуктов пиролиза) в зону пламени является малая (относительно) по размерам зона пиролиза. Без подавления пиролиза горючих материалов невозможно ликвидировать пожар. Пиролиз же материалов происходит, как показали эксперименты, при относительно невысоких температурах и начинается при температурах 140...150 °С, поэтому эффективным средством подавления горения является увлажнение элементов горючего материала. Если будет обеспечено увлажнение водой или пропитка антипиреном (или обволакивание) элементов структуры горючего материала (листьев, древесины и др.), то продвижение фронта пиролиза вглубь слоя горючего материала прекратится и через некоторое время остановится и газофазное горение в области над поверхностью ЛГМ вследствие того, что блокируется поступление горючих газов (CH_4 , H_2 , CO и др.) в зону непосредственного их взаимодействия с окислителем (воздухом). Поэтому является актуальным исследование процессов смачивания и растекания одиночных каплей огнетушащих составов на поверхностях горючих материалов.

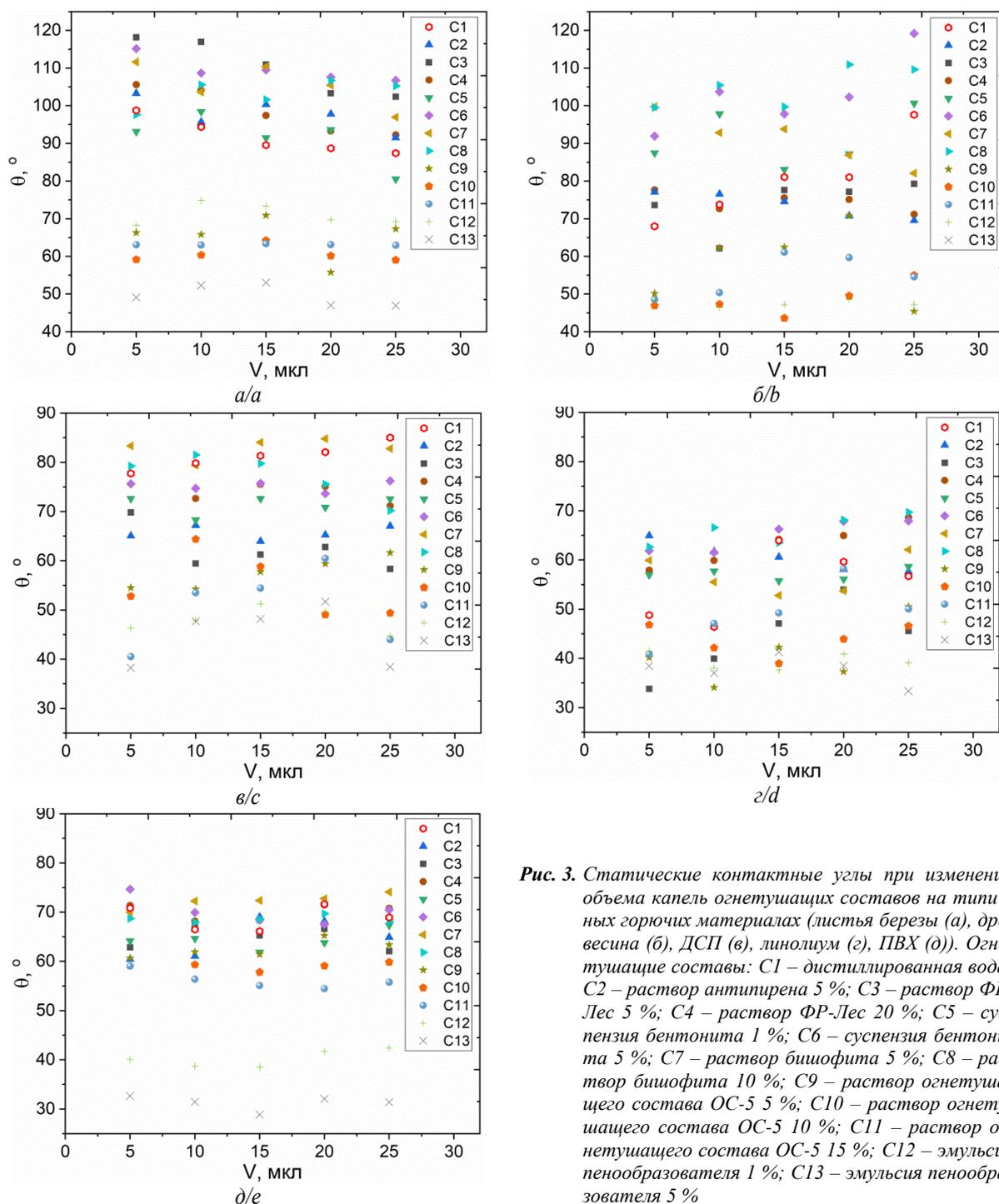


Рис. 3. Статические контактные углы при изменении объема капель огнетушащих составов на типичных горючих материалах (листья березы (а), древесина (б), ДСП (в), линолеум (г), ПВХ (д)). Огнетушащие составы: C1 – дистиллированная вода; C2 – раствор антипирена 5 %; C3 – раствор ФР-Лес 5 %; C4 – раствор ФР-Лес 20 %; C5 – суспензия бентонита 1 %; C6 – суспензия бентонита 5 %; C7 – раствор бишофита 5 %; C8 – раствор бишофита 10 %; C9 – раствор огнетушащего состава ОС-5 5 %; C10 – раствор огнетушащего состава ОС-5 10 %; C11 – раствор огнетушащего состава ОС-5 15 %; C12 – эмульсия пенообразователя 1 %; C13 – эмульсия пенообразователя 5 %

Fig. 3. Static contact angles when changing the volume of droplets of fire extinguishing compositions on typical combustible materials (birch leaves (a), wood (b), chipboard (c), linoleum (d), PVC (e)). Fire extinguishing compositions: C1 – distilled water; C2 – flame retardant solution 5 %; C3 – FR-Les solution 5 %; C4 – FR-Les solution 20 %; C5 – suspension of bentonite 1 %; C6 – suspension of bentonite 5 %; C7 – bischofite solution 5 %; C8 – bischofite solution 10 %; C9 – solution of fire extinguishing composition OS-5 5 %; C10 – solution of fire extinguishing composition OS-5 10 %; C11 – solution of fire extinguishing composition OS-5 15 %; C12 – emulsion foaming agent 1 %; C13 – foam concentrate emulsion 5 %

На рис. 3 представлены зависимости статических контактных углов (θ) от объема капель (V) огнетушащих составов на типичных горючих материалах. Установлено, что по свойствам смачивания листьев березы огнетушащими составами можно условно выделить две группы жидкостей. К первой группе (огне-

тушащие составы плохо смачивающие лесной горючий материал) относятся составы C2–C8. Вторая группа жидкостей – составы C9–C13 – хорошо смачивает листья березы ($\theta < 90^\circ$). Показано, что если радиус капли превышает величину капиллярной постоянной жидкости, гравитационные силы оказывают

влияние на форму капли, в обратном случае их действием можно пренебречь [37]. Для первой группы жидкостей радиус капли при максимальном объеме 25 мкл не превышал капиллярную длину (например, для воды (С1) – 3,85 мм, для 10 % раствора бишофита (С8) – 3,78 мм, для 5 % суспензии бентонита (С6) – 3,56 мм и т. д.). При этом стоит отметить, что с ростом объема контактные углы у этих жидкостей уменьшаются, т. е. гравитационные силы все-таки оказывают влияние на капли и они больше растекаются по поверхности листьев. Причина обусловлена тем, что на поверхности листа присутствует шероховатость. Известно, что шероховатость оказывает сильное влияние на смачивание [36], причем чем больше шероховатость, тем сильнее проявляются свойства поверхности, обуславливающие притяжение или отталкивание состава. При смачивании первой группой жидкостей $\theta < 150^\circ$, т. е. на поверхности наблюдается состояние Венцеля (составы полностью обволакивают все элементы шероховатости под каплей). С увеличением объема энергия движения фронта капли преобладает над работой сил трения и жидкость преодолевает энергетические барьеры в виде шероховатости, тем самым сильнее растекаясь.

При измерении контактных углов на поверхностях древесины, ДСП, линолеума и ПВХ граница между смачиваемостью и несмачиваемостью составами уменьшается. Из рис. 3, б видно, что однозначно не смачивают поверхность древесины составы С5–С8. Наибольшие контактные углы зарегистрированы у жидкостей С6–С7, т. к. при использовании этих добавок происходит наибольший рост вязкости и поверхностного натяжения по сравнению с водой. Растворы же С2–С3 по физическим свойствам обладают большим сходством с водой, поэтому значения θ лежат в пределах доверительного интервала.

Анализ рис. 4, в–д позволяет сделать вывод о том, что в диапазоне изменения объема капель от 5 до 25 мкл контактные углы капель огнетушащих жидкостей почти не изменяются. По сравнению с лесными горючими материалами поверхности линолеума, ДСП и ПВХ обладают химической однородностью и минимальной шероховатостью. К тому же эти поверхности более полярные (в своем составе они содержат полимеры), по сравнению с листьями и древесиной. А так как все исследуемые составы на водной основе (а вода по своей природе неполярная жидкость), взаимодействие между молекулами граничащих фаз больше, работа адгезии превышает работу когезии, составы по этим поверхностям растекаются сильнее. Огнетушащие составы С9–С13 хорошо смачивают все исследуемые материалы за счет наличия в них поверхностно-активных веществ (ПАВ). ПАВы снижают поверхностное натяжение жидкостей, тем самым приводя к меньшим значениям контактных углов.

Результаты экспериментальных исследований по изучению влияния температуры поверхности на свойства смачиваемости огнетушащих составов представлены на рис. 4. Установлено, что при увеличении температуры поверхности контактные углы капель дистиллированной воды (С1) уменьшились на 9° (с 86°

до 77°). Известно, что при повышении температуры от 0 до 100°C коэффициент поверхностного натяжения воды уменьшается примерно на 23 %. Происходит улучшение смачивающих свойств. При использовании в качестве добавок составов С2, С3, С6 и С7 существенных отличий в свойствах смачиваемости не зарегистрировано. Физические свойства этих растворов (поверхностное натяжение, вязкость) близки к свойствам воды. При взаимодействии с нагретыми до высоких температур энергетическими материалами состава ФР-Лес (С3, С4) и бишофита (С7, С8) происходит обугливание горючих материалов вместо выбросов легковоспламеняющихся газов. В состав ФР-Лес входит фосфор, который в конденсированной фазе инициирует образование угля или неорганического остатка [38, 39]. При увеличении концентрации раствора ФР-Лес до 20 % (С4) происходит «загущение» раствора, его плотность и поверхностное натяжение увеличиваются, а смачиваемость ухудшается.

С повышением температуры поверхности стали от 20 до 100°C у суспензии бентонита (1 %) (С5), как и у воды (С1) (рис. 4, а), смачиваемость улучшается (рис. 4, б). Однако при увеличении концентрации до 5 % суспензии бентонита статический контактный угол возрастает от 80° до 115° при температуре поверхности 20 и 100°C , соответственно. С ростом концентрации бентонита в суспензии, так же как и состава ФР-Лес, происходит «загущение», ее свойства близки скорее к неньютоновским жидкостям (при длительном хранении состав загустевает, однако при размешивании приобретает первоначальное состояние).

При добавлении к воде огнетушащего состава ОС-5 (рис. 4, б) и эмульсии пенообразователя (рис. 4, в) смачивание улучшается в связи с тем, что данные растворы содержат ПАВ. Влияние последних на смачивание связано с их адсорбцией на границах раздела фаз [40]. Согласно современным представлениям, на значения краевого угла влияют в основном изменения поверхностного натяжения в достаточно узкой области в непосредственной близости от линии трехфазного контакта [40]. ПАВы снижают поверхностное натяжение жидкости, приводя к лучшему смачиванию. К тому же, как известно, с увеличением температуры поверхностное натяжение жидкости уменьшается, тем самым способствуя еще большему растеканию капли. Также стоит отметить, что с увеличением концентрации раствора ОС-5 с 5 до 10 % смачиваемость поверхности улучшается (например, при температуре поверхности 50°C контактный угол уменьшается с $52,8^\circ$ до $42,0^\circ$). Однако изменение концентрации с 10 до 15 % не приводит к изменению смачивающих свойств (значения контактных углов лежат в пределах доверительного интервала). На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что применение растворов ОС-5 с концентрацией выше 10 % не приводит к изменению поверхностного натяжения.

Из рис. 4, в видно, что при нормальных условиях увеличение концентрации пенообразователя с 1 до 5 % значение контактных углов уменьшается более чем на

20°. При нагреве подложки различие в углах уменьшается и при 100 °С составляет около 7°. Можно предположить, что с ростом температуры различие в поверхностном натяжении 1 и 5 % эмульсий уменьшается, та-

ким образом разница в свойствах смачиваемости сокращается (т. е. в условиях применения этого состава для тушения увеличение концентрации с 1 до 5 % не приводит к качественным и количественным изменениям).

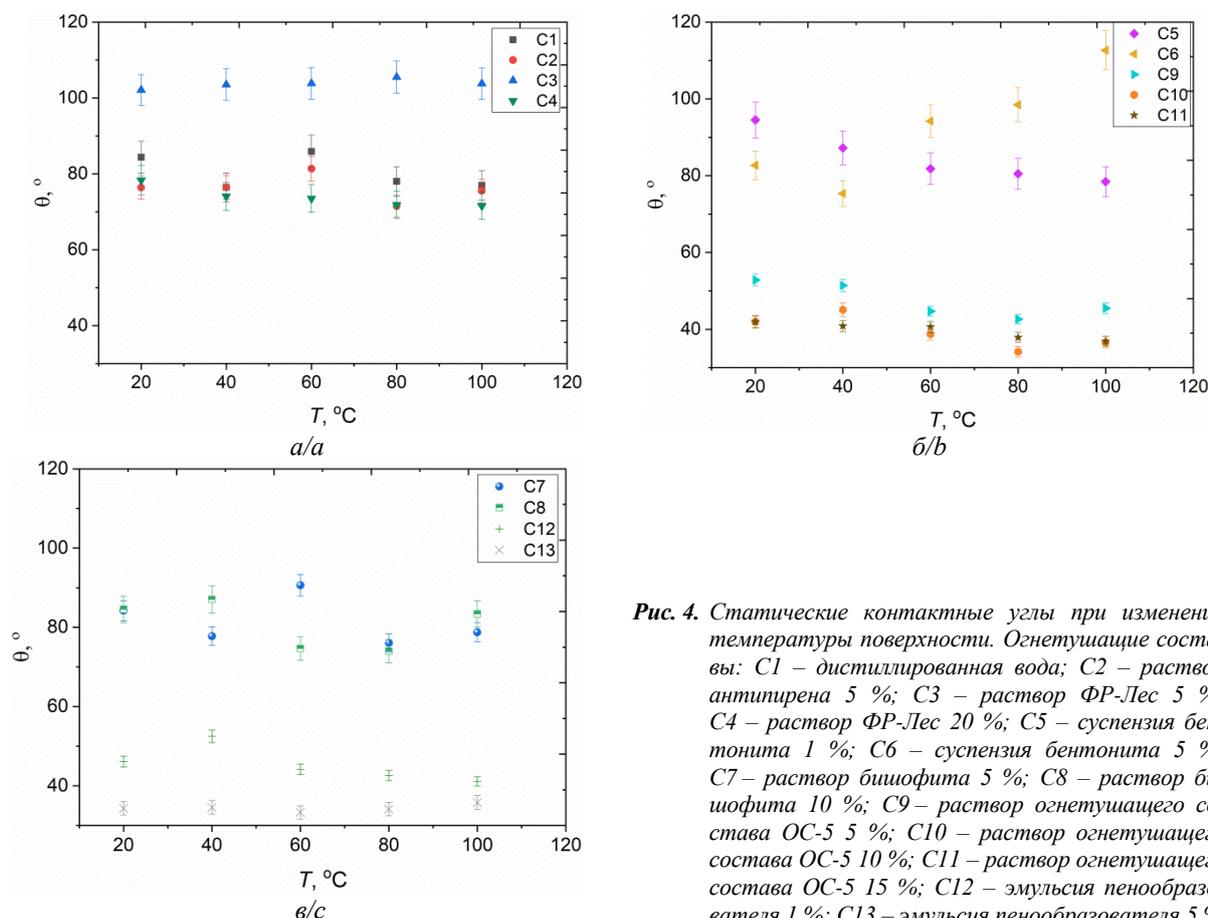


Рис. 4. Статические контактные углы при изменении температуры поверхности. Огнетушащие составы: C1 – дистиллированная вода; C2 – раствор антипирена 5 %; C3 – раствор ФР-Лес 5 %; C4 – раствор ФР-Лес 20 %; C5 – суспензия бентонита 1 %; C6 – суспензия бентонита 5 %; C7 – раствор бишофита 5 %; C8 – раствор бишофита 10 %; C9 – раствор огнетушащего состава ОС-5 5 %; C10 – раствор огнетушащего состава ОС-5 10 %; C11 – раствор огнетушащего состава ОС-5 15 %; C12 – эмульсия пенообразователя 1 %; C13 – эмульсия пенообразователя 5 %

Fig. 4. Static contact angles as the surface temperature changes. Fire extinguishing compositions: C1 – distilled water; C2 – flame retardant solution 5 %; C3 – FR-Les solution 5 %; C4 – FR-Les solution 20 %; C5 – suspension of bentonite 1 %; C6 – suspension of bentonite 5 %; C7 – bischofite solution 5 %; C8 – bischofite solution 10 %; C9 – solution of fire extinguishing composition OS-5 5 %; C10 – solution of fire extinguishing composition OS-5 10 %; C11 – solution of fire extinguishing composition OS-5 15 %; C12 – emulsion foaming agent 1 %; C13 – foam concentrate emulsion 5 %

Смачивание и испарение капель огнетушащих составов. Средние значения скорости испарения W_E с учетом полного времени жизни капель жидкостей τ рассчитывались по формуле:

$$W_E = \rho \cdot V_0 / S \cdot \tau, \quad (1)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м^3 ; V_0 – начальный объем, равный 10^{-5} м^3 ; S – средняя площадь поверхности капель, мм^2 ; τ – среднее время испарения капель, с.

Типичные зависимости средней по времени скорости испарения капель огнетушащих составов от температуры нагрева поверхности подложки из стали, рассчитанные по выражению (1), представлены на рис. 5. При нормальных условиях максимальная средняя скорость испарения зарегистрирована у состава C13. Также установлено (рис. 5), что с увеличением температуры поверхности средняя по времени скорость испарения капель эмульсии пенообразовате-

ля растет интенсивнее, чем у остальных исследуемых огнетушащих составов. Это связано с тем, что скорость испарения огнетушащего состава прямо пропорциональна площади поверхности (чем выше площадь границы раздела жидкость–воздух, тем больше количество молекул специализированных составов на основе воды испаряется). Минимальный контактный угол и максимальная площадь зарегистрированы у эмульсии пенообразователя ($\theta \approx 34,2^\circ$, $S \approx 27,1 \text{ мм}^2$). Установлено, что различие в скоростях испарения эмульсий различных концентраций с ростом температур уменьшается, т. к. свойства смачиваемости практически идентичны (рис. 4), т. е. такой огнетушащий состав эффективнее охлаждает горючий материал, по сравнению с остальными исследуемыми составами. Анализ проведенных экспериментов показал, что увеличение концентрации раствора ОС-5 с 5 до 10 % (составы C9 и C10, соответственно) привело к росту скорости испарения более чем на 30 %. Дальнейшее

увеличение концентрации (состав С10 и С11) не только не привело к росту W_E , но и снизило скорость испарения почти в 2,1 раза (при $T > 60$ °С). Можно сделать заключение о том, что для эффективного подавления горения составами первой группы, которая выделена по свойствам смачиваемости, применение пенообразователя и ОС-5 с концентрацией более 10 % не приведет к значительным улучшениям при подавлении горения и пиролизе горючих материалов.

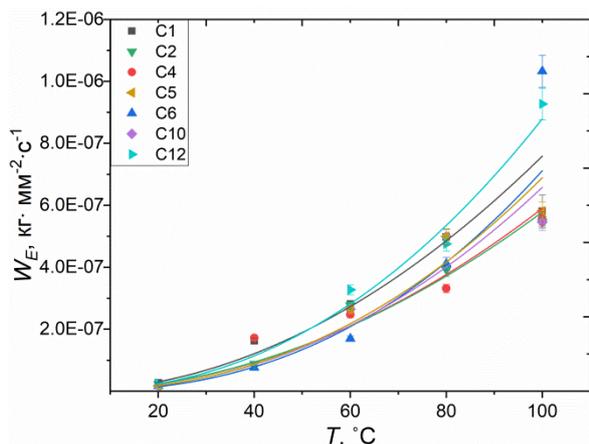


Рис. 5. Типичные зависимости средних по времени скоростей испарения капель огнетушащих составов от температуры нагрева поверхности стальной подложки. Огнетушащие составы: С1 – дистиллированная вода; С2 – раствор антипирена 5 %; С4 – раствор ФР-Лес 20 %; С5 – суспензия бентонита 1 %; С6 – суспензия бентонита 5 %; С10 – раствор огнетушащего состава ОС-5 10 %; С11 – раствор огнетушащего состава ОС-5 15 %; С12 – эмульсия пенообразователя 1 %

Fig. 5. Typical dependences of the time-average rates of evaporation of droplets of fire-extinguishing compositions on the heating temperature of steel substrate surface. Fire extinguishing compositions: C1 – distilled water; C2 – flame retardant solution 5 %; C4 – FR-Les solution 20 %; C5 – suspension of bentonite 1 %; C6 – suspension of bentonite 5 %; C10 – solution of fire extinguishing composition OS-5 10 %; C11 – solution of fire extinguishing composition OS-5 15 %; C12 – foam concentrate emulsion 1 %

Таблица 2. Значения эмпирических коэффициентов в аппроксимационном выражении $W_E = a \cdot T^b$

Table 2. Values of empirical coefficients in the approximation expression $W_E = a \cdot T^b$

№ состава Composition number	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13
$a \cdot 10^{11}$	5	0,9	4	8	2	6	2	1	2	2	3	3	3
b	2,16	2,46	2,16	1,95	2,39	2,02	2,28	2,46	2,28	2,19	2,14	2,28	2,15
R^2	0,99	0,98	0,96	0,97	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,99	0,99	1,00

Полученные коэффициенты можно использовать при математическом моделировании процессов локализации горения огнетушащими составами, а также для разработки теоретических положений, позволяющих проводить прогностическую оценку эффективности подавления горения и пиролиза энергетических материалов с использованием нескольких составов в диапазоне температур от 20 до 100 °С.

По результатам сравнительного анализа установлено, что средние скорости испарения капель составов С1–С3, С5 и С7 отличаются незначительно. Установленный результат является следствием того, что численные значения теплофизических свойств этих жидкостей (плотность, теплоемкость) и контактные углы (а значит, площадь взаимодействия капли и граница раздела жидкость–воздух) принимают близкие значения. С увеличением концентрации составов ФР-Лес и бишофита скорость испарения уменьшается. При испарении огнетушащих составов (бентонита, бишофита, ФР-Лес и ОС-5) остается твердый осадок (бентонит, кристаллы соли $MgCl_2$, полифосфата аммония и диамонийфосфат-карбамид). Этот осадок обеспечивает «запирание» газообразных продуктов термического разложения в зоне пиролиза в результате образования слоя конденсированного вещества на верхней границе этой зоны.

При испарении единицы массы растворителя в суспензии, эмульсии или раствора поглощается меньше теплоты, чем при испарении воды (теплоемкость всех исследуемых составов меньше 4 кДж/кг·К). Аналогично и на аккумуляцию теплоты перед испарением воды затрачивается больше энергии, чем у растворов эмульсий и суспензий. Этот вывод подтверждает, например, анализ баланса теплоты при испарении воды ($Q_{исп} = 335,2$ кДж) и 10 % раствора бишофита ($Q_{исп} = 288$ кДж). Однако анализ ранних результатов [41–43] показал, что из всех исследованных жидкостей наименее эффективна для подавления горения ЛГМ вода (необходимы большие объемы жидкости и/или время тушения). Можно сделать вывод о том, что при тушении горючих материалов и подавлении пиролиза составами (а именно при использовании антипиренов, бишофита, бентонита, ФР-Лес) доминирующим механизмом будет не поглощение теплоты при испарении растворителя, а формирование защитного слоя на элементах материала.

Для каждого из тринадцати исследованных составов можно построить свое уравнение типа $W_E = a \cdot T^b$ (рис. 5). Эмпирические коэффициенты (a и b) и коэффициент детерминации R^2 для этих уравнений приведены в табл. 2.

По экспериментальной зависимости $W_E(T)$ рассчитан коэффициент аккомодации. Формула для нахождения массовой скорости испарения (закон Герца–Кнудсена) имеет вид:

$$W_E = \frac{A \cdot (P'' - P^*)}{\sqrt{\frac{2\pi RT}{M}}}$$

где W_E – массовая скорость испарения, $\text{кг}/\text{м}^2\cdot\text{с}$; P^H – давление насыщенного пара, Па; P^* – парциальное давление испаряющихся компонент, рассчитанное при относительной влажности $\varphi=0,87$, Па; $R=8,31$ – универсальная газовая постоянная, $\text{Дж}/\text{моль}\cdot\text{К}$; M – молекулярный вес; T – температура вещества, К; A – коэффициент аккомодации.

Из известной формулы для нахождения массовой скорости испарения получено выражение для расчета коэффициента аккомодации:

$$A = \frac{W_E \cdot \sqrt{\frac{2\pi RT}{M}}}{(P^H - P^*)}$$

Таблица 3. Коэффициент аккомодации исследованных составов

Table 3. Accommodation coefficient of the studied compositions

T, K	P ^H кПа/кПа	P [*] кПа/кПа	W _E ·10, кг/(м ² ·с)/kg/(m ² ·s)							A·10 ⁴						
			C1	C4	C6	C2	C10	C5	C12	C1	C4	C6	C2	C10	C5	C12
293	2,34	2,01	0,27	0,20	0,17	0,23	0,17	0,17	0,24	0,78	0,58	0,48	0,66	0,49	0,49	0,68
313	7,38	6,42	1,63	1,72	0,76	0,89	0,64	1,35	1,35	1,62	1,71	0,76	0,88	0,64	1,34	1,34
333	19,92	17,33	2,80	2,48	1,70	2,77	2,65	2,65	3,27	1,06	0,94	0,64	1,05	1,01	1,01	1,24
353	47,36	41,20	4,98	3,32	4,11	3,92	4,99	4,99	4,76	0,82	0,55	0,68	0,64	0,82	0,82	0,78
373	101,32	99,65	5,81	5,58	10,33	5,46	5,46	5,82	9,27	3,61	3,47	6,42	3,40	3,40	3,62	5,76

Полученные экспериментальные результаты являются базой для математического моделирования процессов испарения капель огнетушащих составов на поверхностях горючих материалов. Экспериментальные зависимости массовой скорости испарения исследованных составов от температуры позволяют определить коэффициент аккомодации в математическом выражении закона Герца–Кнудсена. Полученные результаты можно использовать для развития математических моделей испарения капель огнетушащих составов на поверхностях термически разлагающихся материалов.

Анализ экспериментальных исследований по смачиванию и испарению капель огнетушащих составов дает основание для вывода о том, что использование в качестве добавок пенообразователя и ОС-5 (вторая группа жидкостей) позволит нивелировать основную недостаток воды как огнетушащего средства, а именно, снижение поверхностного натяжения более чем в 2 раза. Вследствие этого (рис. 3, 4) огнетушащие составы на их основе хорошо смачивают все исследуемые образцы. На практике применение эмульсии пенообразователя и раствора ОС-5 позволит уменьшить расход воды и снизить время тушения лесных и техногенных пожаров (из-за низкого поверхностного натяжения и хороших смачивающих свойств огнетушащие составы проникают в более глубокие слои высокопористого материала, охлаждая его), что позволит обеспечить тушение большей площади возгорания одним и тем же объемом. Первая группа жидкостей помимо охлаждающего эффекта обладает способностью изолировать пиролизирующиеся горючие газы от кислорода и теплового воздействия пламени. При тушении горючих материалов составами на основе антипирена, ФР-Лес, бентонита и бишофита

В табл. 3 приведены расчетные значения коэффициента аккомодации в диапазоне температур от 293 до 373 К для исследованных составов.

Так, например, в [44] экспериментально зарегистрированы удельные скорости испарения ($1,6\cdot 10^{-6}\dots 9,8\cdot 10^{-6}$ г/(мм²·с) капель воды начального объема 80...400 мкл для разных подложек (Spin Teflon, Spray Teflon, HMDS, Aluminum) с температурой 64 °С при температуре окружающей среды 22 °С. Результаты экспериментальных исследований [45] по испарению водно-натриевого раствора на твердой подложке из алюминия при изменяющемся тепловом потоке позволили рассчитать удельную скорость испарения ($0,002\cdot 10^3\dots 0,006\cdot 10^3$ мл/(мм²·с).

вследствие высокой адгезии (плохих смачивающих свойств) капли жидкости закрепятся на поверхности после попадания. Высыхая, они образуют защитный слой. Применение этих составов за счет их экранирующих и охлаждающих свойств возможно при тушении лесных и техногенных пожаров.

Заключение

Анализ результатов проведенных экспериментов показал, что при подавлении пиролиза горючих материалов в глубине слоя более эффективными будут составы с меньшим поверхностным натяжением, проникающие в более глубокие слои горючего материала, при этом будут охлаждаться нагретые до высоких температур элементы материалов и подавляться процесс генерации горючего – газообразных продуктов термического разложения. Установлено, что при добавлении в воду ОС-5 и пенообразователя капли растекаются по листьям, древесине, ДСП и ПВХ, тем самым проникая в более глубокие слои пиролизирующегося материала и эффективнее охлаждая его. При использовании в качестве добавок бишофита, бентонита, ФР-Лес доминирующими механизмами огнетушащего действия являются экранирующий и изолирующий эффекты оседающих частиц этих веществ (на поверхности создается защитный теплоизолирующий слой), препятствующих поступлению теплоты в зону пиролиза горючих материалов и способствующих подавлению процессов их термического разложения.

Зависимости средних по времени скоростей испарения капель огнетушащих составов от температуры нагрева поверхности аппроксимированы экспоненциальной зависимостью $W_E=a\cdot T^b$. Полученные значения эмпирических коэффициентов можно использовать при

моделировании процессов подавления горения и пиролиза огнетушащими составами (а именно эмульсиями пенообразователя, суспензиями бентонита, растворами бишофита, огнетушащего состава ОС-5, антипирена и ФР-Лес) с различной концентрацией и при разработке теоретических положений, позволяющих проводить

прогностическую оценку эффективности. Рассчитаны коэффициенты аккомодации в диапазоне температур от 293 до 373 К для исследованных составов.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект 21-79-00030, <https://rscf.ru/project/21-79-00030/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Особенности тушения лесных пожаров с применением авиации / Н.П. Копылов, В.Н. Карпов, А.Е. Кузнецов, Д.В. Федоткин, И.Р. Хасанов, Е.Ю. Сушкина // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2019. – № 59. – С. 79–86.
2. Токарева О.С., Абдулрахман А.А.Д., Пасько О.А. Оценка восстановительной динамики растительного покрова лесных гарей с использованием данных со спутников Landsat // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 7. – С. 191–199.
3. Высоцкий С.П., Козырь Д.А. Экологический мониторинг породных отвалов горнопромышленных агломераций // Известия Томского политехнического университета. – 2021. – Т. 332. – № 11. – С. 37–46.
4. Festag S. The statistical effectiveness of fire protection measures: learning from real fires in Germany // Fire Technology. – 2021. – V. 57. – № 4. – P. 1589–1609.
5. Himoto K. Conceptual framework for quantifying fire resilience—A new perspective on fire safety performance of buildings // Fire Safety Journal. – 2021. – V. 120. – P. 103052.
6. A statistical image feature-based deep belief network for fire detection / D. Sheng, J. Deng, W. Zhang, J. Cai, W. Zhao, J. Xiang // Complexity. – 2021. – V. 2021. – 5554316.
7. KRESNIK: a top-down, statistical approach to understand the fire performance of building facades using standard test data / M. Bonner, W. Wegrzynski, B.K. Papis, G. Rein // Building and Environment. – 2020. – V. 169. – P. 106540.
8. Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2020 году». – М.: Изд-во МЧС России, 2021. – 264 с.
9. Noaki M., Yamaguchi J.I., Ohmiya Y. Research on delay of pyrolysis and ignition by water application // Journal of Environmental Engineering. – 2018. – V. 83. – № 744. – P. 107–117.
10. Evaluation of the effect of water mist on propane/air mixture deflagration: large-scale test / G. Li, C. Pan, Y. Liu, X. Zhu, X. Ni, X. Zhao, G. Chen, X. Wang // Process Safety and Environmental Protection. – 2021. – V. 147. – P. 1101–1109.
11. A study of the probability distribution of pool fire extinguishing times using water mist / T. Liang, M. Liu, Z. Liu, W. Zhong, X. Xiao, S. Lo // Process Safety and Environmental Protection. – 2015. – V. 93. – P. 240–248.
12. Preliminary study on the suppression chemistry of water mists on poly (methyl methacrylate) flames / Z. Ziang, W.K. Chow, J. Tang, S.F. Li // Polymer degradation and stability. – 2004. – V. 86. – № 2. – P. 293–300.
13. Àgueda A., Pastor E., Planas E. Different scales for studying the effectiveness of long-term forest fire retardants // Progress in Energy and Combustion Science. – 2008. – V. 34. – № 6. – P. 782–796.
14. Slovák V., Taraba B. Urea and CaCl₂ as inhibitors of coal low-temperature oxidation // Journal of thermal analysis and calorimetry. – 2012. – V. 110. – № 1. – P. 363–367.
15. BeaBeard A., Angeler D. Flame retardants: chemistry, applications, and environmental impacts. – Weinheim: Wiley-VCH, 2010. – P. 415–439.
16. Liidakis S., Voris D., Agiovlaitis I. P. Testing the retardancy effect of various inorganic chemicals on smoldering combustion of Pinus halepensis needles // Thermochimica Acta. – 2006. – V. 444. – № 2. – P. 157–165.
17. Tang Y., Wang H. Development of a novel bentonite–acrylamide superabsorbent hydrogel for extinguishing gangue fire hazard // Powder Technology. – 2018. – V. 323. – P. 486–494.
18. Statheropoulos M., Kyriakou S.A. Quantitative thermogravimetric-mass spectrometric analysis for monitoring the effects of fire retardants on cellulose pyrolysis // Analytica Chimica Acta. – 2000. – V. 409. – № 1–2. – P. 203–214.
19. Aqueous clay suspensions stabilized by alginate fluid gels for coal spontaneous combustion prevention and control / B. Qin, D. Ma, F. Li, Y. Li // Environmental Science and Pollution Research. – 2017. – V. 24. – № 31. – P. 24657–24665.
20. Application tests of new wetting compositions for wildland firefighting / J. Rakowska, R. Szczygieł, M. Kwiatkowski, B. Porycka, K. Radwan, K. Prochaska // Fire Technology. – 2017. – V. 53. – № 3. – P. 1379–1398.
21. Изучение смачивания алюминиевой и стальной подложек полиорганосилоксанами в присутствии азотсодержащих поверхностно-активных веществ / В.Ю. Токарько, А.Н. Дюрягина, К.А. Островной, А.В. Демьяненко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 11. – С. 75–82.
22. Wettability of heat-treated wood / M. Pétrissans, P. Gérardin, I. El bakali, M. Serraj // Holzforschung. De Gruyter. – 2003. – V. 57. – № 3. – P. 301–307.
23. Correlation between dynamic wetting behavior and chemical components of thermally modified wood / W. Wang, Y. Zhu, J. Cao, W. Sun // Applied Surface Science. – 2015. – V. 324. – P. 332–338.
24. Lopes J.O., Garcia R.A., Nascimento A.M. Wettability of the surface of heat-treated juvenile teak wood assessed by drop shape analyzer // Maderas. Ciencia y tecnología. – 2018. – V. 20. – № 2. – P. 249–256.
25. Metsä-Kortelainen S., Viitanen H. Wettability of sapwood and heartwood of thermally modified Norway spruce and Scots pine // European Journal of Wood and Wood Products. – 2012. – V. 70. – № 1. – P. 135–139.
26. Evolution of wood surface free energy after heat treatment / P. Gérardin, M. Petrič, M. Petrisans, J. Lambert, J.J. Ehrhardt // Polymer degradation and stability. – 2007. – V. 92. – № 4. – P. 653–657.
27. Klamerus-Iwan A., Błońska E. Canopy storage capacity and wettability of leaves and needles: The effect of water temperature changes // Journal of Hydrology. – 2018. – V. 559. – P. 534–540.
28. Aryal B., Neuner G. Leaf wettability decreases along an extreme altitudinal gradient // Oecologia. – 2010. – V. 162. – № 1. – P. 1–9.
29. Klamerus-Iwan A., Błońska E. Seasonal variability of interception and water wettability of common oak leaves // Annals of Forest Research. – 2016. – V. 60. – № 1. – P. 63–73.
30. ГОСТ Р 50588–2012. Пенообразователи для тушения пожаров. Общие технические требования и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2012. – 23 с.
31. ГОСТ 16363–98. Средства огнезащитные для древесины. Методы определения огнезащитных свойств. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002. – 7 с.
32. ГОСТ Р 55067–2012. Магний хлористый. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2014. – 28 с.
33. Шадрина Е.М., Волкова Г.В. Определение теплофизических свойств газов, жидкостей и водных растворов веществ. – Иваново: Ивановский государственный химико-технологический Университет, 2009. – 80 с.
34. Physicochemical features of the effect of special water-based fire retardants on forest materials / G.V. Kuznetsov, A.G. Islamova, E.G. Orlova, P.A. Strizhak, D.V. Feoktistov // Fire Safety Journal. – 2021. – V. 123. – 103371 p.
35. Rates of high-temperature evaporation of promising fire-extinguishing liquid droplets / G.V. Kuznetsov, S.S. Kralinova, I.S. Voytkov, A.G. Islamova // Applied Sciences. – 2019. – V. 9. – № 23. – 5190 p.
36. Transformation of initially unatomized fire-extinguishing liquid arrays at free fall from different heights / A. Islamova, S. Kropotova, P. Tkachenko, I.S. Voytkov, G.V. Kuznetsov // Atomization and Sprays. – 2021. – V. 31. – № 1. – P. 71–91.

37. Butt H.J., Kappel M. Normal capillary forces // *Advances in colloid and interface science*. – 2009. – V. 146. – № 1–2. – P. 48–60.
38. Flame retardancy mechanisms of aluminium phosphinate in combination with melamine polyphosphate and zinc borate in glass-fibre reinforced polyamide 6, 6 / U. Braun, B. Scharrel, M.A. Fichera, C. Jäger // *Polymer Degradation and Stability*. – 2007. – V. 92. – № 8. – P. 1528–1545.
39. Influence of the oxidation state of phosphorus on the decomposition and fire behaviour of flame-retarded epoxy resin composites / U. Braun, A.I. Balabanovich, B. Scharrel, U. Knoll, J. Artner, M. Ciesielski, M. Döring, R. Perez, J.K.W. Sandler, V. Altstadt, T. Hoffmann, D. Pospiech // *Polymer*. – 2006. – V. 47. – № 26. – P. 8495–8508.
40. Соболева О.А. Эффекты обогащения и обеднения области вблизи линии смачивания поверхностно-активными веществами // *Вестник Московского университета. Серия 2. Химия*. – 2003. – Т. 44. – № 5. – С. 337–341.
41. Influence of special additives in a water aerosol on the suppression of a forest fire with it / D.V. Antonov, R.S. Volkov, I.S. Voitkov, A.O. Zhdanova, G.V. Kuznetsov // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2018. – V. 91. – № 5. – P. 1250–1259.
42. Тушение пожаров с помощью аэрозолей растворов солей / О.П. Коробейничев, А.Г. Шамаков, А.А. Чернов, Т.А. Большова, В.М. Шварцберг, К.П. Куценогий, В.И. Макаров // *Физика горения и взрыва*. – 2010. – Т. 46. – № 1. – С. 20–25.
43. Mykhalichko B., Lavrenyuk H., Mykhalichko O. New water-based fire extinguishant: Elaboration, bench-scale tests, and flame extinguishment efficiency determination by cupric chloride aqueous solutions // *Fire Safety Journal*. – 2019. – V. 105. – P. 188–195.
44. Evaporation of a sessile water drop on a heated surface with controlled wettability / E.Y. Gatapova, A.A. Semenov, D.V. Zaitsev, O.A. Kabov // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2014. – V. 441. – P. 776–785.
45. Orlova E., Kuznetsov G., Feoktistov D. The evaporation of the water-sodium chlorides solution droplets on the heated substrate // *EPJ Web of Conferences*. – 2014. – V. 76. – № 01039.

Поступила 10.05.2022 г.

Информация об авторах

Жданова А.О., кандидат физико-математических наук, доцент Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Исламова А.Г., кандидат физико-математических наук, инженер-исследователь лаборатории тепломассопереноса Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Копылов Н.П., доктор технических наук, главный научный сотрудник Всероссийского ордена «Знак Почета» научно-исследовательского института противопожарной обороны МЧС России.

UDC 614.841.42; 532.64

INTERACTION OF DROPS OF FIRE-EXTINGUISHING COMPOSITIONS WITH FRAGMENTS OF COMBUSTIBLE MATERIALS

Alena O. Zhdanova¹,
zhdanovaa@tpu.ru

Anastasia G. Islamova¹,
agi2@tpu.ru

Nikolay P. Kopylov²,
np.nanpb@mail.ru

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

² All-Russian Research Institute for Fire Protection of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters,
12, microdistrict VNIPO, Balashikha, 143903, Russia.

The relevance. The most common fire extinguishing composition for the localization and elimination of natural and man-made fires is water. Almost annual increase in the areas of fires in the boreal zone, as well as the remoteness of fires from water sources, necessitates an increase in the resource efficiency of extinguishing. The main task in extinguishing man-made fires is to reduce the consumption of fire extinguishing agents, which will reduce the risk of excessive water flooding of the premises and material costs for the restoration of facilities. For these purposes, it is advisable to improve existing and develop new fire extinguishing compositions. The insufficient knowledge of the processes occurring during the interaction of drops of various typical fire extinguishing liquids with the surface of combustible materials, and the high scientific and practical significance of such studies determines the relevance.

Purpose: to establish the patterns of wetting, spreading and evaporation of drops of fire extinguishing compositions on the surfaces of combustible materials during conductive heating.

Object: fire extinguishing compositions (water; flame retardant solutions, FR-Les, bischofite; bentonite suspensions; foam concentrate emulsions) of various concentrations.

Methods. The study of wetting and evaporation of drops of fire extinguishing compositions was carried out by the method of a «fixed» drop (placed on a solid surface using an electronic dispenser). To determine the geometric characteristics of the drops, a shadow optical system was used, and the obtained images were processed using special software using the «tangential 1» and «Young–Laplace» methods.

Results. The main patterns of wetting and evaporation of drops of fire extinguishing compositions on the surfaces of combustible materials (birch leaves, wood, laminated chipboard, linoleum and polyvinyl chloride) have been established. It is shown that in suppressing the pyrolysis of combustible materials in the depth of the layer, compositions with a lower surface tension, penetrating into deeper layers of combustible material, will be more effective. Under such conditions, fragments of materials heated to high temperatures are cooled, and generation of fuel – gaseous products of thermal decomposition – is suppressed. It was established that the dominant mechanism for suppressing combustion and pyrolysis when extinguishing combustible materials (namely, when using fire retardants, bischofite, bentonite, FR-Les) is the formation of a protective layer on the surface of elements of substances and materials, and not heat absorption during solvent evaporation. The dependences of the time-average evaporation rates of droplets of fire-extinguishing compositions on the surface heating temperature are approximated by the exponential curve $W_E = a \cdot T^b$.

Key words:

Wetting, drop, fire extinguishing, fire extinguishing compositions, combustible material.

The research was supported by the grant of the Russian Science Foundation (project no. 21-79-00030, <https://rscf.ru/project/21-79-00030/>).

REFERENCES

1. Kopylov N.P., Karpov V.N., Kuznetsov A.E.E., Fedotkin D.V., Khasanov I.R.E., Sushkina E.Y.E. Peculiarities of the forest fire-fighting with the use of aircrafts. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Matematika i Mekhanika*, 2019, no. 59, pp. 79–86. In Rus.
2. Tokareva O.S., Alshaibi A.D.A., Pasko O.A. Assessment of restoration dynamics of burnt forest area vegetation using landsat satellite data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 7, pp. 191–199. In Rus.
3. Vysotsky S.P., Kozyr D.A. Environmental monitoring of waste dumps of mining agglomeration. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 11, pp. 37–46. In Rus.
4. Festag S. The statistical effectiveness of fire protection measures: learning from real fires in Germany. *Fire Technology*, 2021, vol. 57, no. 4, pp. 1589–1609.
5. Himoto K. Conceptual framework for quantifying fire resilience – a new perspective on fire safety performance of buildings. *Fire Safety Journal*, 2021, vol. 120, pp. 103052.
6. Sheng D., Deng J., Zhang W., Cai J., Zhao W., Xiang J. A statistical image feature-based deep belief network for fire detection. *Complexity*, 2021, vol. 2021, pp. 5554316.
7. Bonner M., Wegrzynski W., Papis B. K., Rein G. KRESNIK: a top-down, statistical approach to understand the fire performance of building facades using standard test data. *Building and Environment*, 2020, vol. 169, pp. 106540.
8. *Gosudarstvenny doklad «O sostoyanii zashchity naseleniya i territoriy Rossiyskoy Federatsii ot chrezvychaynykh situatsiy prirodnogo i tekhnogennogo kharaktera»* [State report «On the state of protection of the population and territories of the Russian Federation from natural and man-made emergencies in 2020»]. Moscow, EMERCOM of Russia Publ., 2021. 264 p.

9. Noaki M., Yamaguchi J. I., Ohmiya Y. Research on delay of pyrolysis and ignition by water application. *Journal of Environmental Engineering*, 2018, vol. 83, no. 744, pp. 107–117.
10. Li G., Pan C., Liu Y., Zhu X., Ni X., Zhao X., Chen G., Wang X. Evaluation of the effect of water mist on propane/air mixture deflagration: Large-scale test. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, vol. 147, pp. 1101–1109.
11. Liang T., Liu M., Liu Z., Zhong W., Xiao X., Lo S. A study of the probability distribution of pool fire extinguishing times using water mist. *Process Safety and Environmental Protection*, 2015, vol. 93, pp. 240–248.
12. Ziang Z., Chow W.K., Tang J., Li S.F. Preliminary study on the suppression chemistry of water mists on poly (methyl methacrylate) flames. *Polymer degradation and stability*, 2004, vol. 86, no. 2, pp. 293–300.
13. Águeda A., Pastor E., Planas E. Different scales for studying the effectiveness of long-term forest fire retardants. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2008, vol. 34, no. 6, pp. 782–796.
14. Slovák V., Taraba B. Urea and CaCl₂ as inhibitors of coal low-temperature oxidation. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 2012, vol. 110, no. 1, pp. 363–367.
15. Bea Beard A., Angeler D. *Flame retardants: chemistry, applications, and environmental impacts*. Weinheim, Wiley-VCH, 2010. pp. 415–439.
16. Liodakis S., Vorisis D., Agiovlaitis I. P. Testing the retardancy effect of various inorganic chemicals on smoldering combustion of Pinus halepensis needles. *Thermochimica Acta*, 2006, vol. 444, no. 2, pp. 157–165.
17. Tang Y., Wang H. Development of a novel bentonite–acrylamide superabsorbent hydrogel for extinguishing gangue fire hazard. *Powder Technology*, 2018, vol. 323, pp. 486–494.
18. Statheropoulos M., Kyriakou S.A. Quantitative thermogravimetric-mass spectrometric analysis for monitoring the effects of fire retardants on cellulose pyrolysis. *Analytica Chimica Acta*, 2000, vol. 409, no. 1–2, pp. 203–214.
19. Qin B., Ma D., Li F., Li Y. Aqueous clay suspensions stabilized by alginate fluid gels for coal spontaneous combustion prevention and control. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, vol. 24, no. 31, pp. 24657–24665.
20. Rakowska J., Szczygieł R., Kwiatkowski M., Porycka B., Radwan K., Prochaska K. Application tests of new wetting compositions for wildland firefighting. *Fire Technology*, 2017, vol. 53, no. 3, pp. 1379–1398.
21. Tyukanko V.Y., Duryagina A.N., Ostrovnoy K.A., Demyanenko A.V. Study of wetting of aluminum and steel substrates with polyorganosiloxanes in the presence of nitrogen-containing surfactants. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, pp. 75–82. In Rus.
22. Pétrissans M., Gérardin P., El Bakali I., Serraj M. Wettability of heat-treated wood. *Holzforschung. De Gnyter*, 2003, vol. 57, no. 3, pp. 301–307.
23. Wang W., Zhu Y., Cao J., Sun W. Correlation between dynamic wetting behavior and chemical components of thermally modified wood. *Applied Surface Science*, 2015, vol. 324, pp. 332–338.
24. Lopes J.O., Garcia R.A., Nascimento A.M. Wettability of the surface of heat-treated juvenile teak wood assessed by drop shape analyzer. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 2018, vol. 20, no. 2, pp. 249–256.
25. Metsä-Kortelainen S., Viitanen H. Wettability of sapwood and heartwood of thermally modified Norway spruce and Scots pine. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2012, vol. 70, no. 1, pp. 135–139.
26. Gérardin P., Petrič M., Petrišs M., Lambert J., Ehrhardt J. J. Evolution of wood surface free energy after heat treatment. *Polymer degradation and stability*, 2007, vol. 92, no. 4, pp. 653–657.
27. Klamerus-Iwan A., Błońska E. Canopy storage capacity and wettability of leaves and needles: The effect of water temperature changes. *Journal of Hydrology*, 2018, vol. 559, pp. 534–540.
28. Aryal B., Neuner G. Leaf wettability decreases along an extreme altitudinal gradient. *Oecologia*, 2010, vol. 162, no. 1, pp. 1–9.
29. Klamerus-Iwan A., Błońska E. Seasonal variability of interception and water wettability of common oak leaves. *Annals of Forest Research*, 2016, vol. 60, no. 1, pp. 63–73.
30. GOST R 50588–2012. *Penoobrazovateli dlya tusheniya pozharov. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya i metody ispytaniy* [State Standard R 50588–2012. Foaming agents for fire extinguishing. General technical requirements and test methods]. Moscow, StandardInform Publ., 2012. 23 p.
31. GOST 16363–98. *Sredstva ognenezashchitnye dlya drevesiny. Metody opredeleniya ognenezashchitnykh svoystv* [State Standard 16363–98. Fire protective means for wood. Methods for determination of fire protective properties]. Moscow, StandardInform Publ., 2002. 7 p.
32. GOST R 55067–2012. *Magniy khloristy. Tekhnicheskie usloviya* [State Standard 55067–2012. Magnesium chloride. Specifications]. Moscow, StandardInform Publ., 2014. 28 p.
33. Shadrina E.M., Volkova G.V. *Opredelenie teplofizicheskikh svoystv gazov, zhidkostey i vodnykh rastvorov veshchestv* [Determination of thermophysical properties of gases, liquids and aqueous solutions of substances]. Ivanovo, IUCT Publ., 2009. 80 p.
34. Kuznetsov G.V., Islamova A.G., Orlova E.G., Strizhak P.A., Feoktistov D.V. Physicochemical features of the effect of special water-based fire retardants on forest materials. *Fire Safety Journal*, 2021, vol. 123, pp. 103371.
35. Kuznetsov G.V., Kralinova S.S., Voytkov I.S., Islamova A.G. Rates of high-temperature evaporation of promising fire-extinguishing liquid droplets. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, no. 23, pp. 5190.
36. Islamova A., Kropotova S., Tkachenko P., Voytkov I.S., Kuznetsov G.V. Transformation of initially unatomized fire-extinguishing liquid arrays at free fall from different heights. *Atomization and Sprays*, 2021, vol. 31, no. 1, pp. 71–91.
37. Butt H. J., Kappl M. Normal capillary forces. *Advances in colloid and interface science*, 2009, vol. 146, no. 1–2, pp. 48–60.
38. Braun U., Scharfel B., Fichera M.A., Jäger C. Flame retardancy mechanisms of aluminium phosphinate in combination with melamine polyphosphate and zinc borate in glass-fibre reinforced polyamide 6, 6. *Polymer Degradation and Stability*, 2007, vol. 92, no. 8, pp. 1528–1545.
39. Braun U., Balabanovich A. I., Scharfel B., Knoll U., Artner J., Ciesielski M., Döring M., Perez R., Sandler J. K. W., Altstädt V., Hoffmann T., Pospiech D. Influence of the oxidation state of phosphorus on the decomposition and fire behaviour of flame-retarded epoxy resin composites. *Polymer*, 2006, vol. 47, no. 26, pp. 8495–8508.
40. Soboleva O.A. Effekty obogashcheniya i obedneniya oblasti vblizi linii smachivaniya poverhnostno-aktivnyimi veshchestvami [Effects of enrichment and depletion of the region near the wetting line with surfactants]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 2. Khimiya*, 2003, vol. 44, no. 5, pp. 337–341.
41. Antonov D.V., Volkov R.S., Voitkov I.S., Zhdanova A.O., Kuznetsov G.V. Influence of Special Additives in a Water Aerosol on the Suppression of a Forest Fire with it. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2018, vol. 91, no. 5, pp. 1250–1259.
42. Korobeinichev O.P., Shmakov A.G., Chernov A.A., Bolshova T.A., Shvartsberg V.M., Kutsenogii K.P., Makarov V.I. Fire suppression by aerosols of aqueous solutions of salts. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2010, vol. 46, no. 1, pp. 16–20. In Rus.
43. Mykhalichko B., Lavrenyuk H., Mykhalichko O. New water-based fire extinguishant: Elaboration, bench-scale tests, and flame extinguishment efficiency determination by cupric chloride aqueous solutions. *Fire Safety Journal*, 2019, vol. 105, pp. 188–195.
44. Gatapova E.Y., Semenov A.A., Zaitsev D.V., Kabov O.A. Evaporation of a sessile water drop on a heated surface with controlled wettability. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2014, vol. 441, pp. 776–785.
45. Orlova E., Kuznetsov G., Feoktistov D. The evaporation of the water-sodium chlorides solution droplets on the heated substrate. *EPJ Web of Conferences*, 2014, vol. 76, no. 01039.

Received: 10 May 2022.

Information about the authors

Alena O. Zhdanova, Cand. Sc., senior lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Anastasia G. Islamova, Cand. Sc., research engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Nikolay P. Kopylov, Dr. Sc., chief researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters.

УДК 622.24.051.64

ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СТАБИЛИЗИРУЮЩИХ КОЛОНКОВЫХ КОМПОНОВОК ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН В УСЛОВИЯХ ЕСТЕСТВЕННОГО ИСКРИВЛЕНИЯ

Буглов Николай Александрович¹,
bna@ex.istu.edu

Пушмин Павел Сергеевич¹,
pps@ex.istu.edu

¹ Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет,
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью совершенствования технологии бурения разведочных скважин в условиях естественного искривления их стволов, что позволит значительно снизить нерациональные материальные и энергетические затраты на проходку скважин, оптимизировать технико-экономические показатели производства буровых работ, а также повысить качество кернового опробования выработок.

Цель: повышение эффективности геологоразведочных работ в сложных горно-геологических условиях.

Объекты: буровая скважина, колонковый набор, стабилизирующая компоновка, бурильная колонна, искривление ствола скважины, траектория ствола скважины.

Методы: анализ литературных источников по теме исследования, обработка данных производственных организаций, графоаналитический метод.

Результаты. Сформулированы и обоснованы главные требования к стабилизирующим колонковым компоновкам нижней части бурильной колонны, являющиеся основным критерием при выборе и расчете оптимальных параметров колонковых наборов. Главными требованиями к стабилизирующей колонковой компоновке названы следующие: длина колонковой компоновки не должна превышать критического значения во избежание образования спиральной формы ее упругого равновесия при работе в стволе скважины; жесткость колонковой компоновки должна быть максимально возможной для данных условий бурения; угол отклонения оси колонковой компоновки от оси ствола скважины должен быть минимизирован с целью снижения стрелы прогиба; усилие прижатия породоразрушающего инструмента к стенке скважины должно быть минимизировано; наиболее оптимальным видом движения колонкового набора является вращение вокруг оси ствола скважины с непрерывным контактом гребня полушпона со стенкой скважины в течение всего времени бурения контакта пород. Названные требования являются основным критерием при выборе и расчете оптимальных параметров колонковых наборов.

Выводы. Предложенный критерий для выбора и расчета оптимальных параметров стабилизирующих колонковых компоновок позволяет взаимно увязать между собой через их геометрические размеры, а также конструктивные параметры бурильного вала все основные факторы, оказывающие влияние на величину интенсивности искривления стволов скважин, буримых в анизотропных горных породах.

Ключевые слова:

Буровая скважина, компоновка бурильной колонны, колонковый набор, снаряд со съемным керноприемником, анизотропия горных пород, естественное искривление ствола скважины.

Введение

Под влиянием совокупности технико-технологических факторов колонковый набор в процессе бурения разведочных скважин всегда находится в скважине в изогнутом состоянии [1–3]. Породоразрушающий инструмент отклоняется от оси ствола скважины в призабойном участке на угол γ_0 и прижимается к стенке скважины с некоторым усилием P_k (рис. 1).

Под действием усилия P_k происходит разработка стенки скважины боковой поверхностью породоразрушающего инструмента и, как следствие, увеличение поперечного сечения ствола [4, 5]. Степень призабойной разработки ствола, в свою очередь, обуславливает значение величины угла отклонения γ_0 .

Траектория оси ствола скважины в данном случае будет представлять собой сумму движений в направлении плоскости угла γ_0 и действия отклоняющего усилия P_k .

Кривизна ствола скважины, обуславливаемая асимметричным разрушением забоя и разработкой его стенки, при условии, что вектор отклоняющей си-

лы расположен в плоскости угла γ_0 , может быть найдена из выражения [6]:

$$R_0^{-1} = R_1^{-1} + R_2^{-1}, \quad (1)$$

где R_1 – радиус скважины, реализуемый под действием отклоняющего усилия, м; R_2 – радиус скважины, реализуемый за счет асимметричного разрушения забоя, м; R_0 – радиус кривизны ствола скважины, реализуемый за счет совместного влияния отклоняющего усилия и асимметричного разрушения забоя, м.

Наибольшее искривление ствола скважины под действием указанных факторов происходит в том случае, если плоскость угла отклонения γ_0 неподвижна либо совершает колебательное движение в каком-либо секторе поперечного сечения ствола, или вращается вокруг оси ствола скважины с неравномерной угловой скоростью, а плоскость угла γ_0 большую часть периода времени каждого оборота находится возле апсидальной плоскости. Возникновение данного явления при бурении стандартными колонковыми наборами обуславливается главным образом геологическими факторами, чаще всего анизотропией разрушаемых горных пород [7–9].

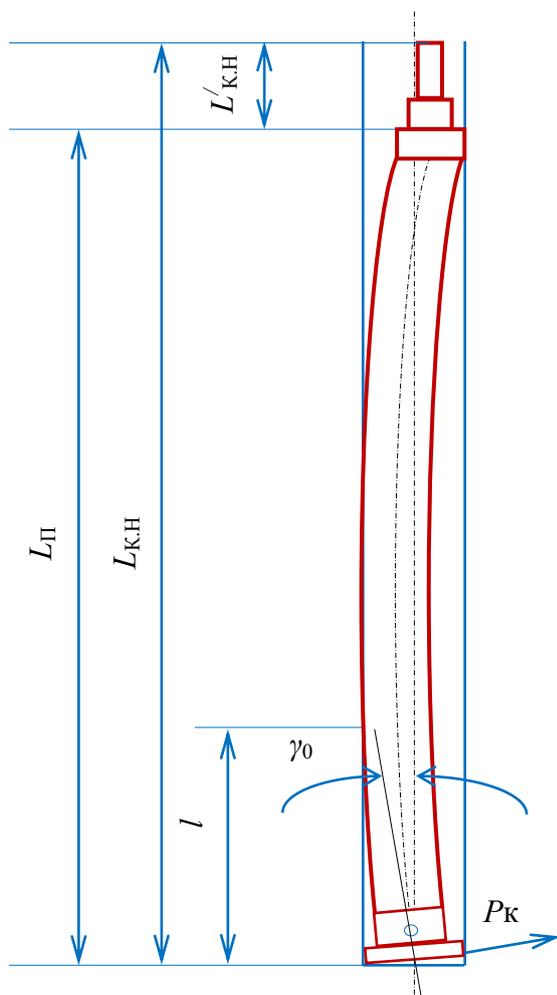


Рис. 1. Схема для анализа работы колонкового набора
Fig. 1. Diagram for analyzing the operation of the column set

Поиск и обоснование оптимальных параметров стабилизирующей колонковой компоновки нижней части бурильной колонны

Для выявления зависимости между величиной отклоняющего усилия P_K , определяющего скорость разработки стенки скважины, и кривизной реализуемого ствола рассмотрим схему, приведенную на рис. 2, где приняты следующие обозначения: l – длина направляющего участка колонкового набора (расстояние от торца породоразрушающего инструмента до места контакта со стенкой скважины), м; AA_1 – осевое перемещение компоновки, м; BB_1 – боковое перемещение породоразрушающего инструмента, м; $d\gamma'_0$ – изменение угла наклона скважины, рад.

За время dt породоразрушающий инструмент переместится в осевом направлении на величину AA_1 , а в боковом – на величину BB_1 , что вызовет поворот оси направляющего участка на угол $d\gamma'_0$. Угловая скорость породоразрушающего инструмента при этом равна:

$$d\gamma_0^{-1}(dt)^{-1} = \omega = V_6(l)^{-1}, \quad (2)$$

где V_6 – скорость разработки стенки ствола скважины, м/ч.

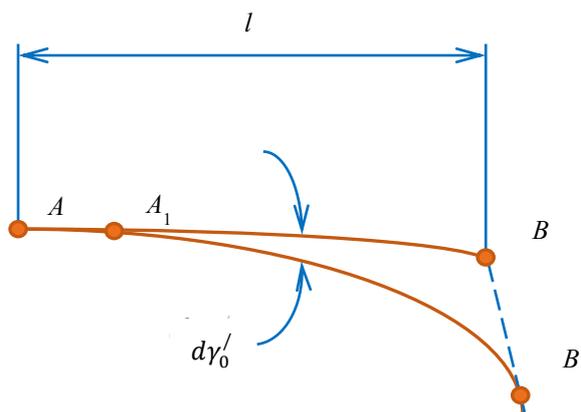


Рис. 2. Схема искривления скважины под действием отклоняющего усилия, реализуемого породоразрушающим инструментом

Fig. 2. Diagram of well curvature under the action of the deflecting force realized by the rock-breaking tool

Механическая скорость бурения в данном случае:

$$V_M = dAA_1 \cdot (dt)^{-1}. \quad (3)$$

Кривизна участка ствола скважины на отрезке dAA_1 составляет:

$$R_1^{-1} = d\gamma(dAA_1)^{-1}. \quad (4)$$

Преобразуем зависимость (4), поделив с учетом (3) правую и левую части формулы (2) на dAA_1 :

$$R_1^{-1} = d\gamma'_0(dAA_1)^{-1} = V_6(V_M \cdot l)^{-1}. \quad (5)$$

В работе [10] установлена связь между углом перекоса породоразрушающего инструмента плоско-изогнутого колонкового набора γ_0 , вращающегося в режиме Φ_2 (ориентированный изгиб с вращением вокруг собственной изогнутой оси), и максимальной кривизной реализуемого ствола скважины:

$$R_2^{-1} = \pi^2 \gamma_0 (L_n)^{-1}, \quad (6)$$

где L_n – длина полуволны колонкового набора, м.

Преобразуем (6), учитывая, что при плоской форме равновесия колонковой компоновки ее направляющий участок AB равен $0,5L_n = 0,5(L_{К.Н.} - L'_{К.Н.})$:

$$R_2^{-1} = 4 \cdot \pi^3 \cdot f_{К.Н.}^6 (L_{К.Н.} - L'_{К.Н.})^{-2}, \quad (7)$$

где $f_{К.Н.}^6$ – стрела прогиба колонкового набора, м; $L_{К.Н.}$ – длина колонкового набора, м; $L'_{К.Н.}$ – изменение длины колонкового набора в результате изгиба, м.

Подставив в зависимость (1) формулы (5) и (7), получим выражение для определения максимальной кривизны ствола скважины, реализуемой компоновкой, работающей в режиме Φ_2 :

$$R_0^{-1} = 2V_6[V_M(L_{К.Н.} - L'_{К.Н.})]^{-1} + 4\pi^3 f_{К.Н.}^6 (L_{К.Н.} - L'_{К.Н.})^{-2}. \quad (8)$$

При движении колонкового набора в режиме Φ_1 (прямая прецессия с вращением компоновки вокруг оси ствола скважины) или Φ_2 в анизотропных горных породах будет происходить неравномерное расширение ствола скважины и его уход в сторону линии наименьшего сопротивления разрушению данного массива пород. При этом его интенсивность пропор-

циональна отклоняющему усилию, а кривизна оси ствола скважины определяется из соотношения:

$$R_0^{-1} = 2(V_6^{max} - V_6^{min}) \cdot [V_M(L_{К.Н.} - L_{К.Н.}^l)]^{-1}, \quad (9)$$

где V_6^{max} и V_6^{min} – соответственно максимальная и минимальная скорость разработки стенки ствола скважины, м/ч.

В случае работы спирально изогнутого колонкового набора в режиме Φ_2 , выражение (1) будет иметь следующий вид:

$$R_0^{-1} = 5V_6(V_M \cdot L_{К.Н.})^{-1} + 25\pi^3 f_{К.Н.}^6 \cdot (L_{К.Н.})^{-2}. \quad (10)$$

Анализ зависимостей (8) и (10) показывает, что условие минимизации радиуса кривизны ствола скважины выполнимо, если компоновка одновременно реализует:

- минимально возможный угол перекоса породоразрушающего инструмента и отклоняющее усилие на его боковой поверхности;
- максимально возможную механическую скорость бурения;
- вид движения компоновки, при котором скорость разработки стенки скважины минимальна;
- максимальную длину направляющего участка.

Необходимо отметить, что в глубоком бурении в настоящее время выбор оптимальных параметров стабилизирующей компоновки нижней части бурильной колонны производится только по двум критериям – равенству нулю отклоняющей силы на долоте и минимуму угла поворота нижнего конца КНБК в функции от некоторых технико-технологических факторов, вычисленных с помощью аналитической модели упругой оси компоновки [11–13]. Следует указать, что эти критерии не взаимосвязаны друг с другом, и поэтому в каждом конкретном случае, в зависимости от субъективного мнения исследователя, за основной принимается один из них, по которому и определяются необходимые параметры КНБК.

Известно, что проходка скважин с применением разнотипных бурильных колонн осуществляется с неодинаковыми режимными параметрами, экстремальные значения которых ограничиваются их энергоемкостью в каждом конкретном случае [14, 15]. В силу этого вариация кривизны стволов скважин, пробуренных трубами с разными жесткостными и весовыми характеристиками, будет определяться различием в величинах отклоняющего усилия P_k и угла γ_0 .

Результаты обработки производственных данных гольца «Студенческий» Мамско-Чуйской ГРЭ ПГО «Иркутскгеология» говорят о том, большая интенсивность естественного искривления стволов скважин (в 1,2 раза) получена при эксплуатации бурильного вала СБТМ-50/42 по сравнению с ЛБТМ-54 при равных углах γ_0 и длинах колонкового набора, что обусловлено главным образом более высоким (в 1,24 раза) значением отклоняющего усилия на породоразрушающем инструменте.

По нашему мнению, более эффективного снижения кривизны скважин в данном случае можно было добиться за счет рационального комплектования нижней части бурильного вала ЛБТМ-54, заключаю-

щегося, например, в установке над колонковым набором отрезка УБТ-73. Согласно произведенным расчетам, предложенная компоновка позволит уменьшить в 2,7 раза отклоняющее усилие на породоразрушающем инструменте по отношению к базовому значению при весьма незначительном повышении угла γ_0 . При этом снижение интенсивности естественного искривления будет происходить без каких-либо отрицательных воздействий на технико-экономические показатели бурения.

Проведенный анализ также показал, что повышение в 1,15 раза жесткости поперечного сечения колонковой компоновки позволяет практически во столько же раз снизить числовые значения отклоняющих факторов. Однако создание более жесткого цельного колонкового набора, чем колонковый набор, соответствующий ГОСТ6238-77, не представляется на сегодняшний день возможным ввиду ограничения его геометрических размеров по внутреннему диаметру.

Результаты бурения в алевритистых сланцах на участках «Цыбульском», «Верхний Угахан» и «Догоалдын» позволили объяснить причину существующего различия в кривизне скважин на данных участках, пробуренных разными компоновками нижней части колонны.

Так, более высокая интенсивность естественного искривления при использовании бурильного вала ЛБТН-54 (в среднем в 1,53 раза) по сравнению с ССК-59 обусловлена большим отклоняющим усилием на алмазной коронке (1,51 раза) и меньшей механической скоростью бурения (в 1,35 раза). Этот вывод основывается на том, что в данном случае величины углов перекоса γ_0 практически равны у рассматриваемых снарядов и поэтому не могут оказывать заметно влияния на кривизну стволов скважин на указанных участках.

В свою очередь, анализ результатов бурения в алевритистых сланцах в технико-технологических условиях участка «Кавказ» говорит о том, что большая интенсивность естественного искривления скважин при использовании комплекса ССК-59 (в 2,2 раза) по сравнению с бурильной колонной ЛБТН-54 обусловлена существенно меньшими значениями отклоняющих факторов, реализуемых колонковой компоновкой последней. Так, например, отклоняющее усилие на алмазной коронке и угол ее перекоса относительно оси скважины γ_0 в данных условиях у ССК-59 превышает аналогичные показатели у бурильного вала ЛБТН-54 соответственно в 1,5 и 2,0 раза.

Сравнительные расчеты угла искривления вертикальной скважины при бурении контакта известняка и гранита (угол падения 25°) комплексом ССК-59 (коронки К-09 и К-08) и бурильным валом ЛБТН-54 (набор К-57, коронка 02ИЗК200К60) показали, что в первом случае его величина составляет соответственно 0,72 и 1,26 град., а во втором – 0,98 град. Полученные результаты свидетельствуют о более высоких стабилизирующих способностях коронки К-09 комплекса ССК-59 по отношению к его же коронке К-08 (в 1,75 раза) и к указанной компоновке бурильной колонны ЛБТН-54 (в 1,35 раза).

Согласно материалам по бурению скважин на участках месторождения «Сухой лог», колонковый набор ССК-59 имеет в 1,5 раза большую стрелу прогиба в стволе выработки, по сравнению со стандартным колонковым набором К-57, что указывает на необходимость центрации колонкового набора ССК-59. Реализация этого мероприятия на практике позволит существенно снизить интенсивность естественного искривления за счет уменьшения величины угла γ_0 .

Длина стабилизирующего колонкового набора, с одной стороны, должна быть максимально возможной с целью получения наибольшей углубки за рейс, с другой стороны, этот размер компоновки должен быть оптимальным, позволяющим ей сформировать ствол скважины с минимальной кривизной.

Расчеты, произведенные для условий участка «Центральный» Байкальского железорудного месторождения (горная порода эндербиты), показали, что с увеличением длины колонковой трубы, прогиб которой ограничен стенкой выработки, угол γ_0 и отклоняющее усилие P_k уменьшается до тех пор, пока компоновка имеет плоскую форму упругого равновесия. На границе существования смежных видов изгиба колонкового набора происходит скачкообразное (теоретически) возрастание числовых значений данных показателей. Следовательно, максимально возможная длина стабилизирующей компоновки должна гарантированно исключать реализацию спиральной формы ее устойчивости в скважине при любых технико-технологических условиях. Выполнение этого требования на практике позволит осуществлять проходку

скважины с наименьшими затратами средств на корректировку направления ее ствола.

Анализируя изложенную информацию, можно отметить следующее:

- основной причиной повышения интенсивности естественного искривления на участке «Центральный» с увеличением длины колонкового набора является смена формы его упругого равновесия в скважине;
- для технико-технологических условий проходки скважин на участке «Центральный» оптимальная длина стандартной колонковой компоновки, с точки зрения снижения кривизны их стволов, составляет 5,0 м.

Графики, приведенные на рис. 3, показывают, что рост длины колонкового набора с 3,0 до 6,0 м приводит при прямой прецессии (вид движения Φ_1) к уменьшению отклоняющего усилия в 5,48 раза, а при обратной прецессии (вид движения Φ_3) только в 2,7 раза. Также следует отметить, что отношение числового значения данного показателя при виде движения компоновки Φ_3 к его значению при виде движения Φ_1 не является постоянным, а повышается с увеличением длины колонкового набора. Так, при его длине 3,0 м оно составляет 1,5, а при длине 6,0 м – уже 3,04.

Таким образом, работа компоновки нижней части бурильной колонны в режиме Φ_3 крайне нежелательна, так как в этой ситуации отклоняющее усилие на породоразрушающем инструменте существенно превышает аналогичный показатель при ее виде движения Φ_1 .

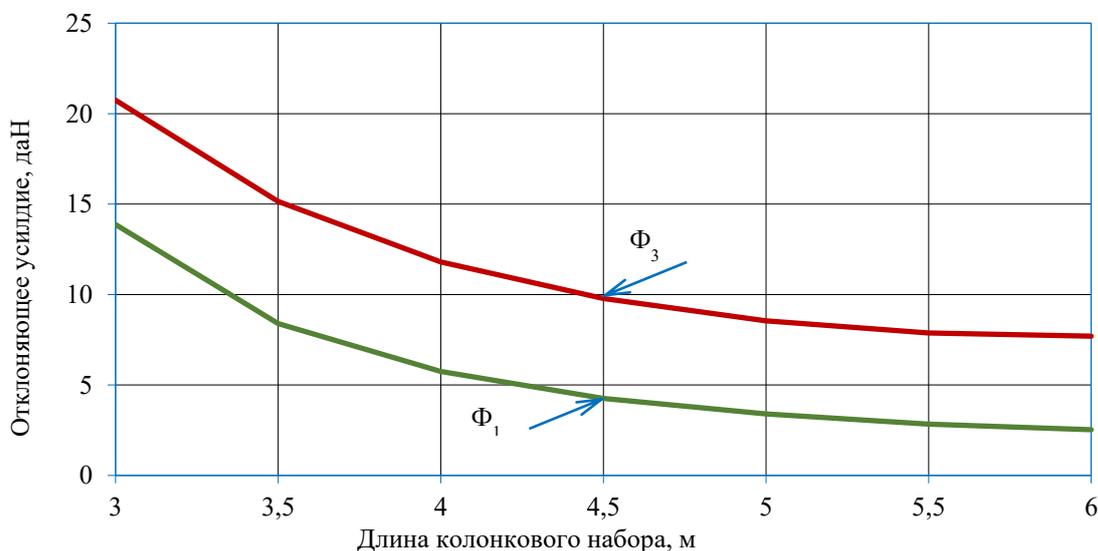


Рис. 3. Зависимость отклоняющего усилия на импрегнированной алмазной коронке при бурении гранитов от длины колонкового набора и вида движения бурового вала ЛБТН-54

Fig. 3. Dependence of the deflecting force on the impregnated diamond crown during granite drilling on the length of the core set and the type of movement of the drill shaft LBTN-54

Указанные факты говорят о существенно более слабом влиянии роста длины колонкового набора на снижение интенсивности естественного искривления скважин в анизотропных породах при работе компоновки в режиме Φ_3 по сравнению с Φ_1 .

Помимо этого, обратная прецессия нижней части бурильной колонны также приводит к значительному снижению механической скорости бурения (в среднем на 40 %), что в совокупности с большей, чем при прямой прецессии, величиной отклоняющего усилия

P_k будет, согласно выражению (9), способствовать повышенному искривлению стволов скважин.

Исследования, выполненные на вертикальном стенде, включающем станок СКБ-4, бурильную трубу СБТ-33 с закрепленными тензодатчиками ПКБ-100, колонковую трубу К-57, комплект измерительной и регистрирующей аппаратуры, с применением в качестве породоразрушающего инструмента алмазных коронок для обычного снаряда (02ИЗ-59, А4ДП-59) и комплекса ССК-59 (БС16, К-08 и К-09) позволили сделать следующие основные выводы:

- величина максимального прогиба колонковой компоновки пропорциональна осевому усилию и зависит от коэффициента закрепления на забое конкретной пары «алмазная коронка – горная порода», при этом деформация компоновки меньше у той алмазной коронки, которая реализует большее значение коэффициента защемления;
- существенное различие в величинах условной деформации компоновки при её шарнирном и жестком закреплении на забое имеет место при осевых усилиях свыше 500 даН;
- при адекватности осевых усилий поперечная деформация компоновки при шарнирном закреплении на забое всегда больше, чем при жестком.

Исследования устойчивости снарядов со съемным керноприёмником были проведены в Ярославской ГРП Артемовской ГРЭ ГПП «Приморгеология» на Пограничном флюоритовом месторождении. Работы осуществлялись с применением комплекса КССК-76 по методике установления закономерностей расположения потертостей по длине окрашенной наружной поверхности компоновки, которые, как и пики износа, являются индикаторами мест контакта колонкового набора со стенками ствола скважины в процессе его углубки.

На рис. 4 представлены развертки колонковых наборов с указанием мест износа краски на их поверхности (выделены серым цветом). Анализ полученной информации однозначно свидетельствует о том, что наружные керноприемные трубы комплекса КССК-76 в процессе бурения теряют прямолинейную форму упругого равновесия. Пики максимального износа располагаются у переходника на бурильные трубы и на некотором расстоянии от алмазной коронки практически в диаметрально противоположных частях поперечного сечения компоновки.

Зависимость изменения общей кривизны ствола скважины, буримой в анизотропных горных породах, от режима работы низа бурильной колонны, реализующего на породоразрушающем инструменте угол γ_0 и отклоняющее усилие P_k , соответствующее конкретному виду движения, можно представить графически кривой, показанной на рис. 5.

Таким образом, оптимальным видом движения стабилизирующего колонкового набора, при котором отсутствует его ориентированный изгиб, а на породоразрушающем инструменте обеспечивается минимальное отклоняющее усилие, является прямая прецессия Φ_1 – вращение вокруг оси ствола скважины.

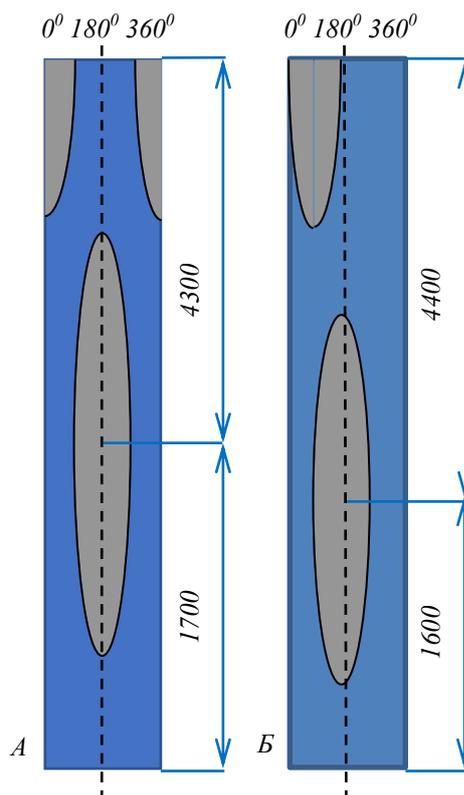


Рис. 4. Развертки наружной поверхности колонковых наборов КССК-76: А) $n=254 \text{ мин}^{-1}$; $P=1200 \text{ даН}$; Б) $n=470 \text{ мин}^{-1}$; $P=1200 \text{ даН}$

Fig. 4. Scans of the outer surface of the KSSK-76 column sets: А) $n=254 \text{ min}^{-1}$; $P=1200 \text{ daN}$; Б) $n=470 \text{ min}^{-1}$; $P=1200 \text{ daN}$

При прохождении наклонно залегающего контакта горных пород с различными физико-механическими свойствами направляющий участок колонковой компоновки, первоначально работающий как и вся нижняя часть бурильной колонны в режиме прямой прецессии, будет соприкасаться со стенкой скважины уже с непостоянным по величине усилием P_C в диаметрально противоположных точках ствола, расположенных в плоскости действия изгибающего момента (рис. 6). Так, в положении I оно равно:

$$P_{C I} = P_C + P_T,$$

а в положении II:

$$P_{C II} = P_C - P_T,$$

где P_T – дополнительное усилие, обусловленное влиянием изгибающего момента, даН.

Таким образом, в процессе бурения анизотропных горных пород может наступить такой момент, когда гребень полуволны колонкового набора будет взаимодействовать со стенкой скважины с нулевой силой или вообще её не касаться в положении II. Это станет возможным только в случае, если соответственно выполняются следующие условия:

$$f_{к.н.}^b = f_{СКВ},$$

$$f_{к.н.}^b < f_{СКВ},$$

где $f_{СКВ}$ – радиальный зазор, м.

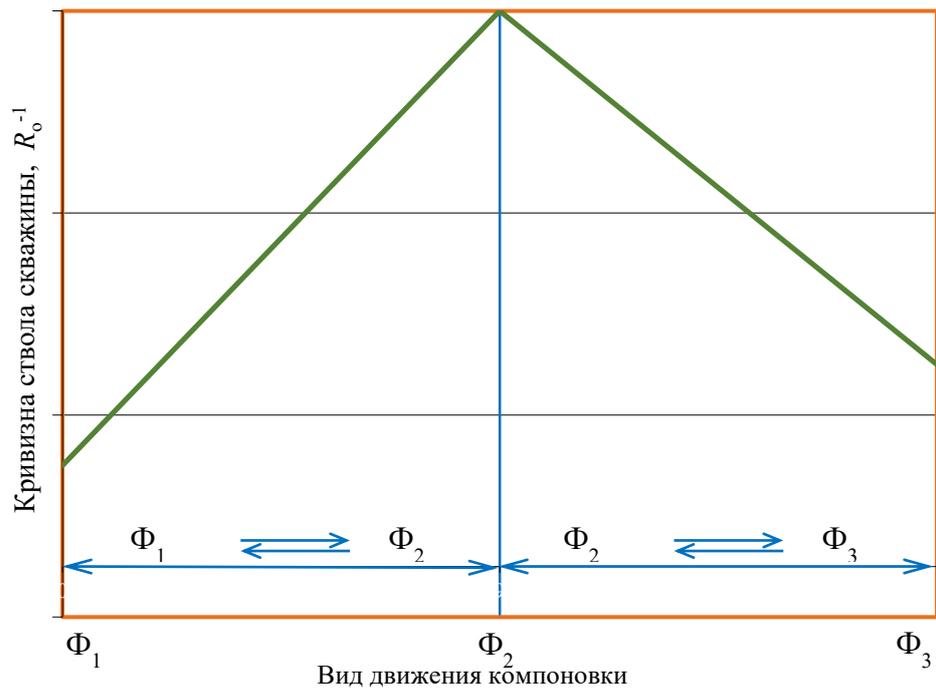


Рис. 5. Зависимость кривизны ствола скважины от вида движения нижней части бурильной колонны
Fig. 5. Dependence of the curvature of the borehole on the type of movement of the lower part of the drill string

Величина изгибающего момента $M_{ИЗ}$, действующего на нижнюю часть колонковой компоновки при бурении перемежающихся по физико-механическим свойствам наклонно-залегающих пород, определяется

значениями осевого усилия на породоразрушающий инструмент, геометрических характеристик инструмента и коэффициента анизотропии контактируемых слоёв [16–18].

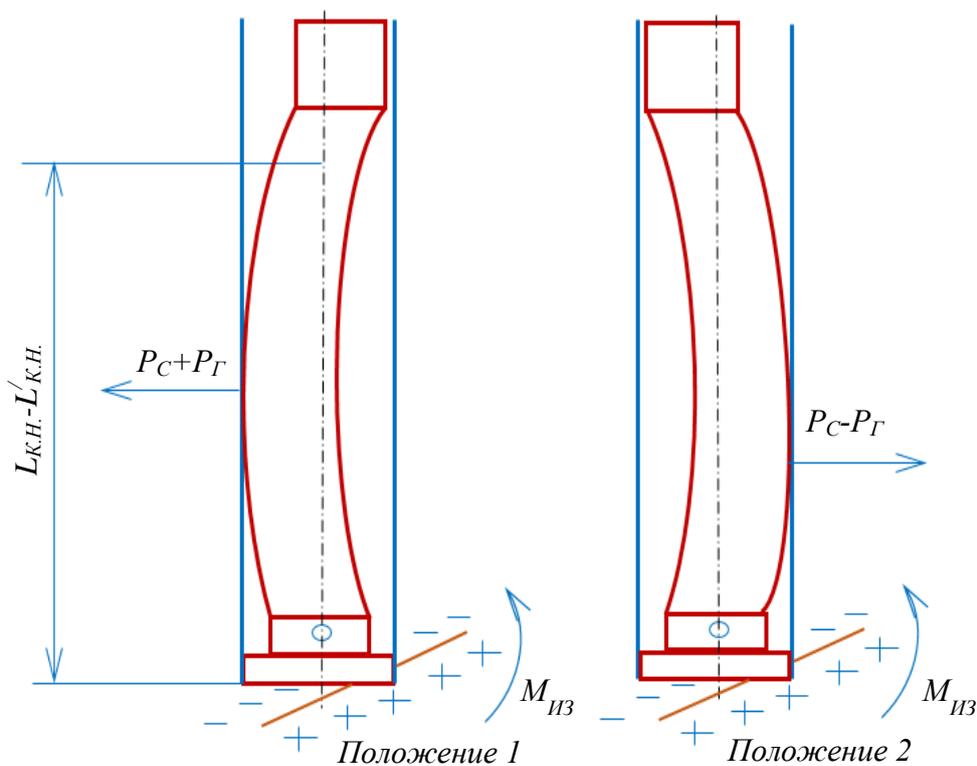


Рис. 6. Схема взаимодействия колонкового набора со стенками скважины при бурении анизотропных горных пород
Fig. 6. Scheme of interaction of the core set with the well walls during drilling of anisotropic rocks

Производственные исследования, проведенные в Комсомольской ГРЭ ГПП «Дальгеология» и Ангарской ГРЭ ГПП «Иркутскгеология», позволяют оценить влияние конструктивных параметров алмазного

инструмента комплекса ССК-59 на интенсивность естественного искривления направленных скважин (таблица).

Таблица. Технические результаты бурения скважин коронками различных конструкций в Комсомольской геолого-разведочной экспедиции

Table. Technical results of drilling wells with crowns of various designs in Komsomolskaya geological exploration expedition

Наименование показателей Name of indicators	Единица измерения Unit of measurement	Тип алмазной коронки Type of diamond crown			
		К-08	К-09	БС-09	БА-24
Ресурс коронки/Crown resource	м/м	18,1	50,0	40,2	29,4
Средняя механическая скорость бурения Average mechanical drilling speed	м/ч/м/h	2,4	2,5	2,0	2,3
Средняя интенсивность естественного искривления скважин по полному углу Average intensity of natural curvature of wells by full angle	градус/м degree/m	0,031	0,022	0,0185	0,0265
Стабилизирующая способность по отношению к коронке К-08 Stabilizing ability in relation to the crown К-08	–	–	1,4	1,68	1,17

Анализ представленных в таблице данных показал следующее:

- интенсивность естественного искривления скважин зависит от конструктивных параметров (типа) алмазных коронок;
- максимальное искривление скважин имеет место при использовании коронок К-08, а минимальное – при эксплуатации БС-09;
- стабилизирующая способность коронок БС-09 по отношению к коронкам К-08 составляет 1,68;
- коронки, имеющие одинаковую (неизменную) зернистость объемных алмазов (К-09, БС-09, БА-24), при постоянстве прочих технико-технологических факторов, реализуют меньшую кривизну стволов скважин;
- выбор типа коронки по критерию минимальной интенсивности естественного искривления не всегда соответствует их выбору по критерию минимальной стойкости 1 м бурения скважин в одном и том же комплексе пород.

Таким образом, интенсивность искривления оси скважины i_T при проходке контакта пород является величиной переменной и зависит от параметров режима бурения, параметров системы «нижняя часть бурительной колонны – ствол скважины», степени различия в их физико-механических свойствах, конструктивных особенностей породоразрушающего инструмента и величины его углубки за один оборот бурительного вала [19, 20]. При бурении перемежающихся пород выполнение условия $i_T \rightarrow 0$ возможно только в тех случаях, если колонковый набор полностью центрирован в скважине или если он движется в режиме Φ_1 с непрерывным контактом гребня полутолны со стенкой её ствола. При его реализации, в отличие от обратной прецессии Φ_3 , увеличение длины плоскоизогнутой компоновки более эффективно воздействует на снижение интенсивности естественного искривления скважин в анизотропных породах.

Выводы

Проведенное исследование позволяет сформулировать главные требования к стабилизирующей колонковой компоновке нижней части бурительной колонны, которые могут быть изложены следующим образом:

1. *Длина колонковой компоновки* не должна превышать критического значения во избежание образования спиральной формы ее упругого равновесия при работе в стволе скважины.
2. *Жесткость* колонковой компоновки должна быть максимально возможная для данных условий бурения.
3. *Угол отклонения* оси колонковой компоновки от оси ствола скважины должен быть минимизирован с целью снижения стрелы прогиба.
4. *Усилие прижатия* породоразрушающего инструмента к стенке скважины должно быть минимизировано.
5. *Интенсивность искривления*, реализуемая комплексом ССК, всегда меньше, чем при использовании соответствующей стандартной компоновки нижней части бурительной колонны ЛБТН.
6. Наиболее оптимальным *видом движения* колонкового набора является Φ_1 – вращение вокруг оси ствола скважины с непрерывным контактом гребня полутолны со стенкой скважины в течение всего времени бурения контакта пород.

Совокупность перечисленных требований может являться основным критерием для выбора и расчета оптимальных параметров стабилизирующих колонковых наборов, позволяющим взаимно увязывать их между собой через геометрические размеры, конструктивные параметры бурительного вала и породоразрушающего инструмента, а также все значимые факторы, оказывающие влияния на величину интенсивности естественного искривления скважин, буримых в анизотропных горных породах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пушмин П.С., Романов Г.Р. Способ снижения величины естественного искривления стволов разведочных скважин // Известия Сибирского отделения РАН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – 2016. – № 4 (57). – С. 43–47.
2. Оценка влияния геологических, технологических и технических факторов на параметры искривления наклонных скважин и пути их устранения / Н.П. Юсубов, С.А. Рзазаде, А.Б. Агакишиев, Н.Р. Ахундова // Азербайджанское нефтяное хозяйство. – 2021. – № 11. – С. 20–25.
3. Heisig G., Cavallaro G., Jogi P. Continuous estimates of the curvature of the wellbore during drilling based on measurements of the bending moment in the well // Proceedings of the annual technical Conference and exhibition SPE. – Houston, Texas, USA, 2004. – P. 234–241.
4. Буглов Н.А., Карпиков А.В., Скрипченко И.А. Исследование влияния технико-технологических факторов на распределение осевого усилия под торцом алмазной коронки // Труды ежегодной научно-технической конференции геологоразведочного факультета. – Иркутск: ИрГТУ, 1993. – С. 71–76.
5. Нескоромных В.В., Еловых П.Ф., Еловых В.Ф. Определение коэффициента боковой фрезерующей способности отклоняющей системы при бурении наклонно-направленного ствола скважины // Инженер-Нефтяник. – 2018. – № 1. – С. 11–14.
6. Kryzhanivskiy Ye.I., Vytyaz O.Yu., Tyrlych V. Evaluation of the conditions of drill pipes failure during tripping operations // SOCAR Proceedings. – 2021. – № 1. – P. 36–48.
7. Lubinski A., Woods H.B. Factors influencing the angle of inclination and curvature of rotating wells // Drilling and production practice. – New York, New York, USA: American Petroleum Institute, 1953. – P. 222–250.
8. Григулецкий В.Г. К вопросу расчета компоновок нижней части буровой колонны для предупреждения искривления стволов скважин // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2021. – № 9 (345). – С. 10–14.
9. Millheim K.K., Apostol M.S. The influence of the dynamics of the layout of the bottom of the drill string on the trajectory of the bit // JPT. – 1981. – V. 33. – № 12. – P. 2323–2338.
10. Буглов Н.А. Оптимизация параметров колонковых снарядов для алмазного бурения направленных геологоразведочных скважин: дис. ... канд. техн. наук. – Иркутск, 1988. – 257 с.
11. Ho H.-S. Forecasting the trajectory of drilling directional wells using a new model of rock-bit interaction // Proceedings of the annual Technical Conference and exhibition SPE. – Dallas, Texas, USA, 1987. – P. 112–121.
12. Pushmin P., Romanov G. Efficiency increase of hard rock destruction with the use of eccentric pulses // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – Tomsk, 6–10 April 2015. – Tomsk: Institute of Physics Publ., 2015. – P. 012052.
13. Lyagov I.A. Bottomhole formation zone completion through ultra deep multibranch channels: experimental research of a new technology // Mine Planning and Equipment Selection Proceedings of the 22nd MPES Conference. – Dresden: Springer International Publishing, 2014. – P. 1221–1229.
14. Нескоромных В.В., Петенев П.Г. Результаты теоретических и опытных работ по изучению механизма работы буровых компоновок со смещенным центром масс поперечного сечения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 5. – С. 75–86.
15. Fischer F.J. Analysis of drill strings in curved wells // 49th Annual Autumn meeting of SPE. – Houston, Texas, USA, 1974. – P. 68–78.
16. Williamson J.S., Lubinski A. Forecasting the operation of the bottom layout of the drill string // SPE Drill. – 1987. – V. 2. – № 1. – P. 13–20.
17. Киселев В.А. Строительная механика. – М.: Стройиздат, 1980. – 615 с.
18. Lubinski A., Woods H.B. The use of stabilizers to control the curvature of the borehole // Drilling and production practice. – New York, New York, USA: American Petroleum Institute. – 1953. – V. 4. – P. 45–58.
19. Пушмин П.С. Механика буровой колонны. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. – 68 с.
20. Chow J., Schubert J., Skirts-Wald H. Analysis of well management on extended and multi-barrel trajectories // Drilling and completion SPE. – 2004. – V. 20. – № 2. – P. 101–108.

Поступила 26.05.2022 г.

Информация об авторах

Буглов Н.А., кандидат технических наук, заведующий кафедрой нефтегазового дела Национального исследовательского Иркутского государственного технического университета.

Пушмин П.С., кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазового дела Национального исследовательского Иркутского государственного технического университета.

UDC 622.24.051.64

SUBSTANTIATION OF OPTIMAL PARAMETERS OF STABILIZING COLUMN ARRANGEMENTS WHEN DRILLING WELLS IN CONDITIONS OF NATURAL CURVATURE

Nikolay A. Buglov¹,
bna@ex.istu.edu

Pavel S. Pushmin¹,
pps@ex.istu.edu

¹ National Research Irkutsk State Technical University,
83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russia.

The relevance of the study is caused by the need to improve the technology of drilling exploration wells in conditions of natural curvature of their trunks, which will significantly reduce the irrational material and energy costs of drilling wells, optimize the technical and economic indicators of drilling operations, as well as improve the quality of core testing of workings.

Objective: to increase the efficiency of geological exploration in difficult mining and geological conditions.

Objects: drilling well, core set, stabilizing layout, drill string, borehole curvature, borehole trajectory.

Methods: analysis of literature sources on the research topic, data processing of production organizations, graphoanalytic method.

Results. The main requirements for stabilizing core arrangements of the lower part of the drill string, which are the main criterion for the selection and calculation of optimal parameters of core sets, are formulated and justified. The main requirements for the stabilizing column layout are the following: the length of the column layout should not exceed a critical value in order to avoid the formation of a spiral shape of its elastic equilibrium when working in the wellbore; the rigidity of the column layout should be the maximum possible for these drilling conditions; the angle of deviation of the axis of the column layout from the axis of the wellbore should be minimized in order to reduce the deflection boom; the force of pressing the rock-crushing tool to the well wall should be minimized; the most optimal type of movement of the core set is rotation around the axis of the borehole with continuous contact of the crest of the half-wave with the wall of the well during the entire drilling time of rock contact. These requirements are the main criterion for the selection and calculation of optimal parameters of column sets.

Conclusions. The proposed criterion for the selection and calculation of optimal parameters of stabilizing column layouts makes it possible to correlate with each other through their geometric dimensions, as well as the design parameters of the drill shaft, all the main factors influencing the intensity of curvature of boreholes drilled in anisotropic rocks.

Key words:

Drilling well, drill string layout, core set, projectile with removable core receiver, rock anisotropy, natural curvature of the borehole.

REFERENCES

1. Pushmin P.S., Romanov G.R. A method for reducing the magnitude of the natural curvature of the trunks of exploration wells. *Izvestiya Sibirskogo secession of the Russian Academy of Sciences. Geology, prospecting and exploration of ore deposits*, 2016, no. 4 (57), pp. 43–47. In Rus.
2. Yusubov N.P., Rzazade S.A., Agakishiev A.B., Ahundova N.R. Assessment of the influence of geological, technological and technical factors on the parameters of the curvature of inclined wells and ways to eliminate them. *Azerbaijan Oil Industry*, 2021, no. 11, pp. 20–25. In Rus.
3. Heisig G., Cavallaro G., Jogi P. Continuous estimates of the curvature of the wellbore during drilling based on measurements of the bending moment in the well. *Proceedings of the annual technical Conference and exhibition SPE*. Houston, Texas, USA, 2004. pp. 234–241.
4. Buglov N.A., Karpikov A.V., Skripchenko I.A. Issledovanie vliyaniya tekhniko-tekhnologicheskikh faktorov na raspredelenie oseвого usiliya pod torsom almaznoy koronki [Investigation of the influence of technical and technological factors on the distribution of axial force under the end of a diamond crown]. *Trudy ezhegodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii geologorazvedochnogo fakulteta* [Proceedings of the annual scientific and technical conference of the Geological Exploration Faculty]. Irkutsk, Irkutsk State Technical University, 1993. pp. 71–76.
5. Neskormnyh V.V., Elovyh P.F., Elovyh V.F. Determination of the coefficient side of the milling abilities of the deflection system in the drilling of a directional wellbore. *Oil engineer*, 2018, no. 1, pp. 11–14. In Rus.
6. Kryzhanivskiy Ye.I., Vytyaz O.Yu., Tyrlych V. Evaluation of the conditions of drill pipes failure during tripping operations. *SOCAR Proceedings*, 2021, no. 1, pp. 36–48.
7. Lubinski A., Woods H.B. Factors influencing the angle of inclination and curvature of rotating wells. *Drilling and production practice*. New York, New York, USA, American Petroleum Institute, 1953. pp. 222–250.
8. Griguleckij V.G. On the issue of calculating the layouts of the lower part of the drill string to prevent the curvature of the boreholes. *Construction of oil and gas wells on land and at sea*, 2021, no. 9 (345), pp. 10–14. In Rus.
9. Millheim K.K., Apostol M.S. The influence of the dynamics of the layout of the bottom of the drill string on the trajectory of the bit. *JPT*, 1981, vol. 33, no. 12, pp. 2323–2338.
10. Buglov N.A. *Optimizatsiya parametrov kolonkovykh snaryadov dlya almaznogo bureniya napravlennykh geologorazvedochnykh skvazhin*. Dis. Kand. nauk [Optimization of parameters of core equipment of drilling directional exploration wells. Cand. Diss.]. Irkutsk, 1988. 257 p.
11. Ho H.-S. Forecasting the trajectory of drilling directional wells using a new model of rock-bit interaction. *Proceedings of the annual Technical Conference and exhibition SPE*. Dallas, Texas, USA, 1987. pp. 112–121.
12. Pushmin P., Romanov G. Efficiency increase of hard rock destruction with the use of eccentric pulses. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Tomsk, Institute of Physics Publishing, 2015. pp. 012052.
13. Lyagov I.A. Bottomhole formation zone completion through ultra deep multibranch channels: experimental research of a new technology. *Mine Planning and Equipment Selection Proceedings of the 22nd MPES Conference*. Dresden, Springer International Publ., 2014. pp. 1221–1229.
14. Neskormnyh V.V., Petenev P.G. The results of theoretical and experimental work on the study of the mechanism of drilling arrangements with a displaced center of mass of the cross section.

- Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 5, pp. 75–86. In Rus.
15. Fischer F.J. Analysis of drill strings in curved wells. *49th Annual Autumn meeting of SPE*. Houston, Texas, USA, 1974. pp. 68–78.
 16. Williamson J.S., Lubinski A. Forecasting the operation of the bottom layout of the drill string. *SPE Drill*, 1987, vol. 2, no. 1, pp. 13–20.
 17. Kiselev V.A. *Stroitel'naya mekhanika* [Construction mechanics]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1980. 615 p.
 18. Lubinski A., Woods H.B. The use of stabilizers to control the curvature of the borehole. *Drilling and production practice*. New York, New York, USA, American Petroleum Institute, 1953. Vol. 4, pp. 45–58.
 19. Pushmin P.S. *Mekhanika burilnoy kolomy* [Drill string mechanics]. Irkutsk, IrGTU Publ., 2007. 68 p.
 20. Chow J., Schubert J., Skirts-Wald H. Analysis of well management on extended and multi-barrel trajectories. *Drilling and completion SPE*, 2004, vol. 20, no. 2, pp. 101–108.

Received: 26 May 2022.

Information about the authors

Nikolay A. Buglov, Cand. Sc., head of the Department of Oil and Gas Engineering, National Research Irkutsk State Technical University.

Pavel S. Pushmin, Cand. Sc., associate professor, National Research Irkutsk State Technical University.

УДК 620.9:538.9

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЛОКАЛЬНЫХ БИНАРНЫХ ШАБЛОНОВ ДЛЯ СРАВНИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ СТРУКТУРОЙ И СВОЙСТВАМИ НАПОЛНЕННЫХ ТЕХНИЧЕСКИМ УГЛЕРОДОМ ЭЛАСТОМЕРОВ

Минакова Наталья Николаевна¹,
minakova@asu.ru

Ушаков Василий Яковлевич²,
vyush@tpu.ru

¹ Алтайский государственный университет,
Россия, 656049, г. Барнаул, пр. Ленина, 61.

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

Актуальность работы обусловлена тем, что при создании нефтепромышленного оборудования применяется широкий спектр композиционных материалов. Благодаря возможности регулирования свойств в широких пределах наполненные техническим углеродом эластомеры могут обеспечивать требуемые механические и электрофизические характеристики. В зависимости от количества технического углерода могут обеспечиваться как резистивные, так и электроизоляционные свойства конструкций. Их отличает небольшой вес, антикоррозионная стойкость, невысокая стоимость и доступность исходного сырья, промышленная технология изготовления. Однако гетерогенная структура, формирующая разнообразие свойств, создает проблемы подбора состава материала, отвечающего конкретным требованиям. Подбор компонентов эмпирическим путем приводит к значительным затратам временных, финансовых и других ресурсов. В этой связи требуется разработка и реализация подходов к изучению закономерностей «структура–свойства», позволяющих наиболее эффективно оценивать свойства композиционных материалов.

Цель: оценка возможности контроля влияния на характеристики наполненных техническим углеродом каучуков предлагаемых рецептурных или технологических решений с помощью инструментария, не требующего высоких материальных затрат. Представляло интерес найти минимизированный по трудоемкости подход к оценке закономерностей «структура–свойства» наполненных техническим углеродом каучуков, влияющих на величину объемного электрического сопротивления, с помощью сравнения характеристик двух материалов. Для этого предполагается разработка способа оценки свойств наполненных техническим углеродом каучуков, адаптированного к микрофотографиям поверхности материала, полученным сканирующим электронным микроскопом. Способ основан на использовании метода локальных бинарных шаблонов для сравнения гистограмм изображений.

Методы: сканирующая микроскопия, рентгеноструктурный анализ, инструментальные измерения электрофизических характеристик резистивных полимерных композиционных материалов, корреляционный анализ.

Результаты. Показано, что микрофотографии поверхности материалов, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа, можно применять для сравнительной оценки изменения величины объемного электрического сопротивления материалов и его разброса при серийном изготовлении с помощью сопоставления материалов с известными характеристиками. Определены методы сравнения гистограмм, дающие корректные результаты: вычисление пересечений, расстояние Бхаттачария. Экспериментально подтверждена целесообразность применения предлагаемого подхода для оценки вклада технологии и вида каучука. Показана связь результатов оценки с количеством аморфной фазы в материале. Сделан вывод о том, что применение предложенной сравнительной оценки позволяет упростить изготовление материала, отвечающего требованиям конкретной области применения.

Ключевые слова:

Наполненные техническим углеродом эластомеры, структура материала, объемное электрическое сопротивление, электропроводность, коэффициент вариации, ресурсосбережение, метод локальных бинарных шаблонов, гистограмма яркости изображения, метод пересечений, расстояние Бхаттачария.

Введение

Композиционные материалы на основе эластомеров обладают антикоррозионными свойствами, небольшим весом, имеют отработанную промышленную технологию изготовления, профилируются в изделия широкого спектра форм. Наполнение эластомеров техническим углеродом в зависимости от его количества в материале может обеспечить вместе с механическими электроизоляционные или электропроводящие свойства, что обуславливает возможности их широкого применения [1–3].

Как конструкционные материалы эластомеры используются при производстве транспортерных лент, рукавов, уплотнителей в изделиях для нужд нефтепромышленной отрасли [4]. Как электротехнические материалы наполненные техническим углеродом эластомеры применяются для защиты от электромагнитных помех, в установках обезвоживания нефти, шахтных кабелях, датчиках, в качестве элементов катодной защиты трубопроводов. Разнообразие требований, предъявляемых к этим материалам в зависимости от сферы их применения, затрудняет конструирование материалов с требуемыми свойствами из-за

невозможности аналитического описания их структурообразования. Последнее, в свою очередь, обусловлено многообразием протекающих в них физико-химических процессов, зависящих от состава, технологии изготовления, эксплуатационных факторов [5–7]. В зависимости от условий работы (температура, интенсивность и характер механических воздействий, окружающая среда и др.) изменяется «ответственность» различных компонентов структуры. Изучение взаимосвязи «структура–свойства» выполняется преимущественно с помощью эмпирических подходов. Поэтому актуально постоянное совершенствование инструментария для изучения структуры материалов, задающей их свойства.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования выбраны наполненные техническим углеродом П-514 каучуки. Концентрация технического углерода составляла 80 весовых частей на 100 весовых частей каучука – максимально возможное наполнение по условиям технологии изготовления [5]. В качестве связующей основы выбраны каучуки, незначительно отличающиеся по исходным свойствам (табл. 1).

Таблица 1. Свойства каучуков [8, 9]

Table 1. Properties of rubbers [8, 9]

Вид каучука Type of rubber	d , кг/м ³ (kg/m ³)	t , °C	M , тысяч единиц (thousand units)
Нитрильный/Nitrile	960	100–110	250–350
Бутадиене-тилстирольный Butadiene methyl	920	80–100	100–150

Анализ взаимосвязи «структура–свойства» выполнялся применительно к величинам удельного объемного электрического сопротивления (ρ_v) и его разбросу в серии изделий (К). Поэтому рассматривались материалы, близкие и отличающиеся по указанным характеристикам.

Выполненные экспериментальные исследования показали, что величины объемного электрического сопротивления и коэффициента вариации для наполненных техническим углеродом каучуков в значительной степени зависят от технологии изготовления (прессовой и беспрессовой), отличающейся разной величиной давления при вулканизации и профилировании изделия [10]. Поэтому анализировались материалы, отличающиеся видом каучука и технологией изготовления (табл. 2).

Один из распространенных способов изучения взаимосвязи «структура–свойства» для композиционных материалов – анализ микроскопических снимков структуры [5]. Изображения структуры наполненных техническим углеродом каучуков, полученные с помощью просвечивающего микроскопа, обрабатывались с применением текстурного и фрактального анализов [11, 12]. Такой подход позволил выявить корреляционные связи с электропроводностью.

Для материалов, выбранных в качестве объектов исследования, в предыдущих работах нами использовались электронно-микроскопические снимки струк-

туры, полученные с помощью трансмиссионной просвечивающей электронной микроскопии [11, 12]. На электронно-микроскопических снимках отчетливо проявляется распределение электропроводящего компонента в связующей основе, в первую очередь распределение по размерам частиц технического углерода и свободные зоны, в которые он не может попасть из-за кристаллической компоненты связующей основы [5]. Однако применение этого метода требует существенной предварительной обработки изображений и сложной подготовки образцов. Для получения микрофотографий с просвечивающего электронного микроскопа необходимы ультратонкие срезы (порядка 100–300 нм), изготавливаемые на специальном оборудовании [13].

Таблица 2. Объекты исследования

Table 2. Objects of study

Каучук Rubber	Профилирование Profiling	Вулканизация, давление, атмосфера Vulcanization, pressure, atmospheres	Обозначения состава. Материал указан в подписях к рис. 2, 3 Material composition designations is in Fig. 2, 3
СКМС-30АРК SKMS-30ARK	Прессформа Press form	125	a/a
СКН-40 SKN-40	Прессформа Press form	125	b/b
СКН-40 SKN-40	Шприцевание Injection	6	v/v

В данной работе нами предположена возможность использования для количественных оценок микрофотографии сканирующего микроскопа, с помощью которого изображение формируется вторичными электронами, отражающимися от поверхности материала под разными углами. Сканирующая микроскопия поверхности проще и дешевле в сравнении с просвечивающей электронной микроскопией, в том числе за счет менее сложной технологии подготовки образцов [14]. Микрофотографии со сканирующего микроскопа отчетливо не отражают влияние ряда характеристик, вносящих вклад в формирование структуры композиционного материала, например, кристаллическость, четко не фиксируют распределение технического углерода по объему связующего [15]. Однако на них отражается текстура, морфология компонентов материала.

На настоящий момент экспериментально подтвержден существенный вклад доли аморфной фазы в связующем для формирования структуры и свойств наполненных полимеров [5]. Можно полагать, что на микрофотографии со сканирующего микроскопа вклад основных компонентов в формирование резистивных свойств (технический углерод, имеющий кристаллическую структуру, и аморфная фаза каучука) проявляется в виде изменения яркости. Ориентация элементов, составляющих материал, и их взаимодействие проявляются через цветовой фон, насыщен-

ность изображения. Поэтому в качестве признака, отвечающего за распознавание структуры материала, выбрана гистограмма яркости изображения. Известно, что сравнение двух изображений по гистограммам применяется для анализа взаимосвязи между ними. Гистограммы отображают количество пикселей изображения с определенной интенсивностью, поэтому позволяют оценить уровень сходства между распределением пикселей [16, 17].

В работе сделано предположение, что сравнение гистограмм целесообразно осуществлять с помощью локальных бинарных шаблонов [18]. Локальный бинарный шаблон применяется для классификации на основании информации об изменении яркости на изображении. Метод имеет малую ресурсоемкость и инвариантность при преобразованиях яркости, сохраняющих порядок. Каждый шаблон несет в себе информацию о соседних точках.

В [18, 19] применен базовый оператор локального бинарного шаблона, который использует 8 пикселей окрестности. Порог – значение интенсивности центрального пикселя. Результат применения к пикселю изображения – восьмиразрядный бинарный код, который описывает окрестность этого пикселя.

Математическая модель вычисления локальных бинарных шаблонов согласно [20]:

$$LBP_{p,c} = \sum_{p=0}^{p-1} S(g_p - g_c)2^p,$$

где c – точка, для которой вычисляется локальный бинарный шаблон; $p = \{0, \dots, P-1\}$ – некая окрестность точки c ; g_c и g_p – значения яркости в соответствующих точках; S – функция, которая возвращает 1 если значение в скобках больше нуля.

В качестве метрик для сравнения гистограмм выбраны вычисление пересечений, расстояние Бхаттачария [21, 22]. Алгоритм пересечений не требует точного отделения объекта от фона, устойчив к перекрытиям на переднем плане. При определении расстояния Бхаттачария алгоритм рассматривает интенсивности изолированно друг от друга (учитываются значения в соседних ячейках без сравнения между собой).

Использовались следующие расчетные формулы:

1) вычисление пересечений [21]:

$$d_s(H_1, H_2) = \sum_i \min(H_1(i)H_2(i)),$$

где H_1 и H_2 – сравниваемые гистограммы; $H_1(i)$ и $H_2(i)$ – элементы соответствующих гистограмм с номером i .

Значение d_s может принимать значения от нуля до единицы. Приближение к единице указывает на уменьшение различий между гистограммами.

2) расстояние Бхаттачария [22]:

$$d_b(H_1, H_2) = \sqrt{1 - \frac{\sum_i \sqrt{H_1(i)H_2(i)}}{\sqrt{\sum_i H_1(i) \sum_i H_2(i)}}},$$

где H_1 и H_2 – сравниваемые гистограммы; $H_1(i)$ и $H_2(i)$ – элементы соответствующих гистограмм с номером i .

Величина d_b может принимать значения от нуля до единицы: чем ближе значение к нулю, тем меньше различий между гистограммами

Расчет выполнялся с помощью функций свободно распространяемой библиотеки `opencv` [23].

Известно, что технический углерод распределяется в аморфной фазе связующей основы [5]. Поэтому для выбранных в качестве объектов исследования материалов оценивалась кристалличность методом рентгеновской дифрактометрии на дифрактометре Shimadzu XRD 7000S (CuK α -излучение, счетчик-монохроматор Shimadzu CM-3121).

Рассматривались микрофотографии как с существенно различающимся, так и незначительно различающимся количеством аморфной фазы.

Съемка поверхности материала осуществлялась на сканирующем электронном микроскопе Hitachi TM 3000 в режиме обратно отраженных электронов. Обработывались 12–15 значений результатов сравнения микрофотографий. Размеры образцов цилиндрической формы в выборке $d=11,7-12,6$ мм, $h=1,3-2,2$ мм. Разброс значений в каждой выборке составлял 5–7 %.

На рис. 1 представлены микрофотографии материалов, отличающихся видом каучука для прессовой технологии изготовления образцов.

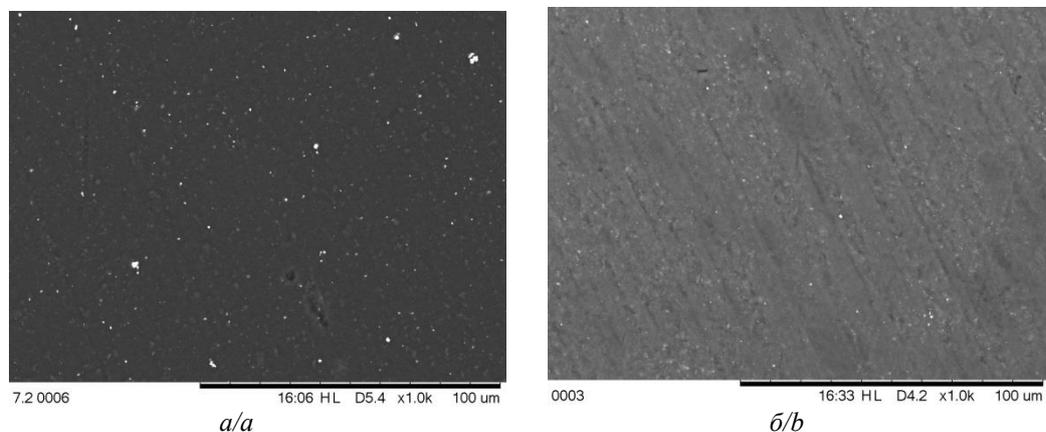


Рис. 1. Микрофотографии наполненных техническим углеродом каучуков: а) объект а в табл. 1; б) объект б в табл. 2
 Fig. 1. Microphotographs of carbon black-filled rubbers: a) object a in Table 1; b) object b in Table 2

Результаты расчета по микрофотографиям сопоставлялись с величиной объемного электрического сопротивления ρ_v . Она определялась на резисторах – образцах диаметром 0,03 м, высотой 0,05 м. Измерения выполнялись в соответствии с ГОСТ 21342.20-78. Определялся разброс объемного электрического сопротивления при серийном изготовлении – коэффициент вариации в серии изделий (К, %).

Результаты исследования

Оригинальная часть исследований выполнена в предположении, что результаты сравнения гистограмм, рассчитанных по данным изображения структуры материалов, можно использовать для оценки разницы в характеристиках между материалом с известными свойствами и материалом, для которого реализовано определенное рецептурное или технологические изменение. Сравнивались материалы, состав которых указан в табл. 2.

В качестве тестового набора исследовались материалы, которые существенно различаются по величине объемного электрического сопротивления и его разбросу в серии изделий. Экспериментально установлено, что при одинаковом составе материала изготовление по беспрессовой технологии увеличивает объемное электрическое сопротивление и уменьшает его разброс в серии по сравнению с материалами, изготовленными по прессовой технологии (табл. 3). При такой смене технологии количество аморфной фазы в материале возрастает (табл. 3).

Закономерности сравнивались с результатами, полученными по гистограммам. На рис. 2, 3 данные по расчетам пересечений и расстояния Бхаттачария приведены для следующих объектов: 1 – материалы серии одинакового состава (СКН-40) беспрессовой технологии (обозначение «в», табл. 2); 2 – материалы серии одинакового состава (СКН-40) прессовой технологии (обозначение «б», табл. 2); 3 – материалы со связующим СКН-40 при разной технологии изготовления (обозначение «б, в», табл. 2); 4 – материалы серии одинакового состава (СКМС-30 АРК) прессовой технологии (обозначение «а», табл. 2); 5 – материалы с разными связующими при прессовой технологии изготовления (обозначение «а, б», табл. 2).

Таблица 3. Влияние технологии изготовления на структуру и свойства материала

Table 3. Influence of technology on the structure and properties of rubber

Связующее Binder	Технология Technology	ρ_v , Ом·м Ohm·m	К, %	Фаза, процент Phase, percentage	
				Кристаллическая Crystalline	Аморфная Amorphous
СКМС-30АРК SKMS-30ARK	Прессовая Press	2,7	15,9	26,04	73,96
СКН-40 SKN-40	Прессовая Press	2,3	18,3	31,39	68,61
СКН-40 SKN-40	Беспрессовая Pressless	6,5	8,4	17,41	82,59

Расчетные значения расстояний (рис. 2, 3) показали, что закономерности, определенные сравнением по гистограммам, совпадают с закономерностями, полученными экспериментально для выбранных объектов исследования (табл. 3). Материалы беспрессовой технологии, по сравнению с материалами прессовой технологии, имеют существенное несоответствие гистограмм из-за изменения структуры материала как по показателю d_s (вычисление пересечений), так и по показателю d_b (расстояние Бхаттачария) (рис. 2, 3).

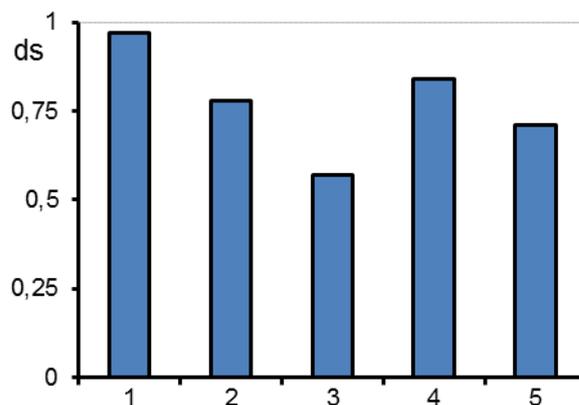


Рис. 2. Значения показателей, определенных методом пересечений. Сравниваемые объекты – микрофотографии структуры материалов разных составов: 1 – составы, обозначенные в табл. 2 как «б» и «в»; 2 – серия изображений материала – состав «б» в табл. 2; 3 – составы, обозначенные в табл. 2 как «б» и «в»; 4 – серия изображений материала – состав «а» в табл. 2; 5 – составы, обозначенные в табл. 2 как «а» и «б»

Fig. 2. Values of indicators determined by the method of intersections. Compared objects are: 1 – compositions indicated in Table 2 as «b» and «v»; 2 – series of images of the material – composition «b» in Table 2; 3 – compositions indicated in Table 2 as «b» and «v»; 4 – series of images of the material – composition «a» in Table 2; 5 – compositions indicated in Table 2 as «a» and «b» (designations in Table 2)

Между вычисленными по микрофотографиям показателями и значениями величин удельного объемного электрического сопротивления исследованных партий образцов выявлена корреляционная связь. Однако разница по величине удельного объемного электрического сопротивления больше, чем разница в показателях по гистограммам. Это может быть связано с тем, что при высоком наполнении техническим углеродом во многом реализуется туннельный механизм электропроводности (расстояния между частицами технического углерода до 100 ангстрем), что не проявляется на микрофотографии [10, 11].

Расчет числовых значений по гистограммам в серии микрофотографий одинаковых материалов показал, что различие между структурами, соответственно разброс в них, больше для материалов прессовой технологии по сравнению с беспрессовой. Такие же закономерности выявлены экспериментально по воспроизводимости величины ρ_v при серийных изготовлениях: коэффициенты вариации существенно ниже

для резисторов, технология которых содержит шприцевание и вулканизацию в паровом котле (табл. 3, рис. 2, 3).

Степень изменения параметров разброса величины объемного электрического сопротивления в серии меньше отличается от числовых значений сравнительной оценки по гистограммам по сравнению со значениями величин объемного электрического сопротивления (рис. 2, 3).

Расчетные значения по гистограммам подтвердили, что отличия в структурах материалов при разной технологии значительно больше, чем в структурах материалов одной серии. Таким образом, полученные результаты на тестовых выборках показывают корректность применения предложенного подхода для сравнительной оценки величины ρ_v и его разброса при серийном изготовлении.

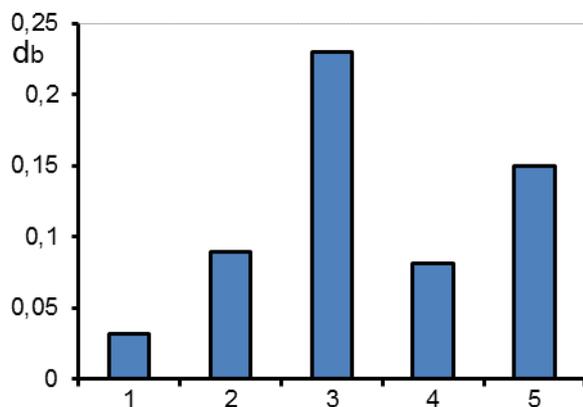


Рис. 3. Значения показателя – расстояние Бхаттачария. Сравнимые объекты – микрофотографии структуры материалов разных составов: 1 – серия изображений материала – состав «в» в табл. 2; 2 – серия изображений материала – состав «б» в табл. 2; 3 – составы, обозначенные в табл. 2 как «б» и «в»; 4 – серия изображений материала – состав «а» в табл. 2; 5 – составы, обозначенные в табл. 2 как «а» и «б»

Fig. 3. Indicator values – Bhattacharya distance. Compared objects are: 1 – compositions indicated in Table 2 as «b»; 2 – series of images of the material – composition «b» in Table 2; 3 – compositions indicated in Table 2 as «b» and «v»; 4 – series of images of the material – composition «a» in Table 2; 5 – compositions indicated in Table 2 as «a» and «b» (designations in Table 2)

Для оценки качества распознавания сравнивались материалы на основе аморфных каучуков с незначительно отличающейся аморфной фазой при одинаковой технологии изготовления (табл. 3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Quijada C. Conductive polymers: materials and applications // Materials. – 2020. – V. 13. – № 10. – P. 2344. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/10/2344/htm> (дата обращения 15.02.2022).
2. Минакова Н.Н., Ушаков В.Я. Полимеры с углеродными наполнителями для мощных резисторов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 2 – P. 74–80.

Несмотря на незначительно различающиеся исходные характеристики каучуков, несхожесть структуры материалов при сравнении гистограмм подтверждается как «методом пересечений», так и методом «расстояния Бхаттачария» (рис. 2, 3).

При сравнении материалов с разной величиной аморфной фазы значения показателей по гистограммам отличаются, что позволяет считать структуры разными, соответственно предполагать изменение электропроводности. Разница по величинам меньше, чем разница между этими показателями в зависимости от технологии изготовления. Значения показателей, определенных по предложенным метрикам, совпадает с экспериментальными закономерностями изменения объемного электрического сопротивления и его разброса в серии (рис. 2, 3, табл. 3). Различие в гистограммах материалов одной серии меньше, чем между материалами. Однако оно больше, чем при сравнении материалов с разным количеством аморфной фазы. Таким образом, даже небольшая разница в количестве аморфной фазы каучуков приводит к различию в структурах, что фиксируется данными расчета гистограмм.

Заключение

Разработан подход к оценке свойств наполненных техническим углеродом каучуков путем сопоставления микрофотографий материалов с известными и неизвестными свойствами. На структурах материалов, различающихся технологией и видом каучука, предложенный подход с использованием локальных бинарных шаблонов работает. В качестве признака для сравнительной оценки визуально слабо различающихся микрофотографий экспериментально подтверждены показатели вычисления пересечений и расстояния Бхаттачария.

Анализ экспериментально полученных гистограмм подтвердил, что числовые значения сравнительной оценки по предложенным метрикам совпадают с закономерностями, установленными экспериментально для выбранных объектов исследования.

Предложенный подход позволяет: а) оценивать изменение электропроводности путем сравнения микрофотографий известного материала с материалом, в котором предлагается определенное изменение (рецептурное или технологическое); б) сравнивать материалы как существенно различающиеся по величине ρ_v и его разбросу в серии, так и слабо различающиеся по этим показателям. Такая оценка характеристик по микрофотографиям структуры позволяет снизить трудоемкость поиска рецептурных и технологических приемов конструирования материалов с заданными свойствами.

3. Szadkowski B., Marzec A., Zaborski M. Effect of different carbon fillers on the properties of nitrile rubber composites // Composite Interfaces. – 2019. – V. 26. – № 8. – P. 729–750.
4. Эластомеры и полимерные композиции для нефтепромыслового оборудования. Проблемы и возможности / И.С. Пятов, С.В. Тихонова, А.И. Салимон, Л.В. Воробьева, В.В. Лунев, Л.Э. Фомичева // ООО «РЕАМ-РТИ». URL: <https://ream-rti.ru/upload/iblock/ae0/ae0e77ad7e2cdbe88098556f439ac345.pdf> (дата обращения 15.02.2022).

5. Гуль В.Е., Шенфиль Л.З. Электропроводящие полимерные композиты. – М.: Химия, 1984. – 226 с.
6. Thermal/electrical properties and texture of carbon black PC polymer composites near the electrical percolation threshold / V. Brunella, B. Rossatto, C. Mastropasqua, F. Cesano // Journal of Composites Science. – 2021. – V. 5. – № 8. – P. 212–220.
7. He X., Wang Y. Recent advances in the rational design of thermal conductive polymer composites // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2021. – V. 60. – № 3. – P. 1137–1154.
8. Энциклопедия полимеров. В 3 т. Т. 1 / под ред. В.А. Каргина. – М.: Сов. энциклопедия, 1972. – 1196 с.
9. Каучук аморфный характер // Справочник химика 21. Химия и химическая технология. URL: <https://www.chem21.info/info/312232/> (дата обращения 15.02.2022).
10. Минакова Н.Н., Сквирская И.И., Ушаков В.Я. Исследование природы нестабильности основных характеристик крупногабаритных полимерных резисторов // Электричество. – 2001. – № 3. – С. 38–42.
11. Минакова Н.Н., Карпов С.А., Ушаков В.Я. Текстурированный анализ дисперсной структуры композиционных эластомеров с модифицированным углеродным наполнителем // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2002. – Т. 45. – № 2. – С. 80–83.
12. Абраменко С.А., Минакова Н.Н., Ушаков В.Я. Исследование свойств полиэтилена с наноразмерными наполнителями специальной обработкой изображений макроструктуры // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2008. – Т. 51. – № 7. – С. 39–42.
13. Власов А.И., Елсуков К.А., Косолапов И.А. Электронная микроскопия. – М.: МГТУ, 2011. – 166 с.
14. Гоулдстейн Дж., Яковица Х. Практическая растровая электронная микроскопия. – М.: Изд-во «Мир», 1978. – 656 с.
15. Криштал М.М., Яеников И.С., Полуниин В.И. Сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ в примерах практического применения – М.: Техносфера, 2009. – 208 с.
16. Comparison of Histogram Based Image Enhancement Methods on Iris Images / R.K. Hapsari, M.I. Utoyo, R. Rulaningtyas, H. Suprajitno // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. – V. 1569. – № 2. – P. 022002. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020JPhCS1569b2002H/abstract> (дата обращения 15.02.2022).
17. Rasras R.J., Zahran B., Sara M.R. A developing digital signal clustering method using local binary pattern histogram // International Journal of Electrical and Computer Engineering. – 2021. – V. 11. – № 1. – P. 872–876.
18. Maenpaa T. The local binary pattern approach to texture analysis – extensions and applications. – Oulu, Oulu University Press, 2003. – 80 p.
19. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
20. Alpaslan N., Hanbay K. Multi-resolution intrinsic texture geometry-based local binary pattern for texture classification // IEEE Access. – 2020. – V. 8. – P. 54415–54430. URL: <http://saucis.sakarya.edu.tr/en/pub/issue/54022/709186> (дата обращения 15.02.2022).
21. Shan C., Gong S. Facial expression based on local binary patterns: a comprehensive study // Image and Vision Computing. – 2009. – № 27 (6). – P. 803–816.
22. Xu M., Varshney P.K. Tighter performance bounds on image registration // Proc. IEEE Int. Conference on Acoustics Speech and Signal Processing (ICASSP 2006). – 2006. – P. 777–780.
23. Histogram Comparison // OpenCV. URL: https://docs.opencv.org/3.4/d8/dc8/tutorial_histogram_comparison.html (дата обращения 15.02.2022).

Поступила 04.06.2022 г.

Информация об авторах

Минакова Н.Н., доктор физико-математических наук, профессор, кафедра информационной безопасности Алтайского государственного университета.

Ушаков В.Я., заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 620.9:538.9

APPLICATION OF THE METHOD OF LOCAL BINARY TEMPLATES FOR A COMPARATIVE EVALUATION OF THE RELATIONSHIP BETWEEN THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF CARBON BLACK-FILLED ELASTOMERS

Natalya N. Minakova¹,
minakova@asu.ru

Vasily Ya. Ushakov²,
vyush@tpu.ru

¹ Altai State University,
61, Lenin avenue, Barnaul, 656049, Russia.

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

The relevance of the work is caused by the fact that a wide range of composite materials are used in the creation of oilfield equipment. Due to the ability to control properties over a wide range, carbon black-filled elastomers can provide the required mechanical and electrical characteristics. Depending on the amount of carbon black, both resistive and electrical insulating properties of structures can be provided. They are distinguished by low weight, corrosion resistance, low cost and availability of raw materials, industrial manufacturing technology. However, the heterogeneous structure, which forms a variety of properties, creates problems in selecting the composition of the material that meets specific requirements. The selection of components empirically leads to significant costs of time, financial and other resources. In this regard, it is necessary to develop and implement approaches to the study of the «structure–properties» patterns, which allow the most effective assessment of the properties of composite materials.

Purpose: to evaluate the possibility of controlling the effect on the characteristics of carbon black-filled rubbers by the proposed recipe or technological solutions using tools that do not require high material costs. It was of interest to find a labor-intensive approach to assessing the structure–property patterns of carbon black-filled rubbers, which affect the value of volumetric electrical resistance, by comparing the characteristics of two materials. To do this, it is proposed to develop a method for evaluating the properties of carbon black-filled rubbers, adapted to microphotographs of the surface of the material obtained by a scanning electron microscope. The method is based on the use of the local binary templates for comparing image histograms.

Methods: scanning microscopy, X-ray diffraction analysis, instrumental measurements of the electrophysical characteristics of resistive polymer composite materials, correlation analysis.

Results. It is shown that micrographs of the surface of materials obtained using a scanning electron microscope can be used for a comparative assessment of the change in the volume electrical resistance of materials and its spread during mass production by comparing materials with known characteristics. Methods for comparing histograms that give correct results are defined: intersection calculation, Bhattacharya distance. The expediency of applying the proposed approach to assess the contribution of technology and type of rubber has been experimentally confirmed. The relationship between the evaluation results and the amount of the amorphous phase in the material is shown. It is concluded that the use of the proposed comparative assessment makes it possible to simplify the manufacture of a material that meets the requirements of a particular application.

Key words:

Carbon black-filled elastomers, material structure, volumetric electrical resistance, electrical conductivity, coefficient of variation, resource saving, local binary template method, image brightness histogram, intersection method, Bhattacharya distance.

REFERENCES

- Quijada C. Conductive polymers: materials and applications. *Materials*, 2020, vol. 13, no. 10, pp. 2344. Available at: <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/10/2344/htm> (accessed 15 February 2022).
- Minakova N.N., Ushakov V.Ya. Polymers with carbon fillers for powerful resistors. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 2, pp. 74–80. In Rus.
- Szadkowski B., Marzec A., Zaborski M. Effect of different carbon fillers on the properties of nitrile rubber composites. *Composite Interfaces*, 2019, vol. 26, no. 8, pp. 729–750.
- Pyatov I.S., Tikhonova S.V., Salimon A.I., Vorobyeva L.V., Lunev V.V., Fomicheva L.E. *Elastomery i polimernye kompozitsii dlya neftepromyslovogo oborudovaniya. Problem i vozmozhnosti* [Elastomers and polymeric compositions for oil-field equipment. Problems and possibilities]. OOO «REAM-RTI». Available at: <https://ream-rti.ru/upload/iblock/ae0/ae0e77ad7e2cdbe88098556f439ac345.pdf> (accessed 15 February 2022).
- Gul V.E., Shenfil L.Z. *Elektricheskaya provodimost polimernykh kompozitov* [Electrically conductivity of polymer compositions]. Moscow, Khimiya Publ., 1984. 226 p.
- Brunella V., Rossatto B., Mastropasqua C., Cesano F. Thermal/electrical properties and texture of carbon black PC polymer composites near the electrical percolation threshold. *Journal of Composites Science*, 2021, vol. 5, no. 8, pp. 212–220.
- He X., Wang Y. Recent advances in the rational design of thermal conductive polymer composites. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2021, vol. 60, no. 3, pp. 1137–1154.
- Entsiklopediya polymerov* [Encyclopedia of polymers]. In 3 vol. Ed. by V.A. Kargina. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1972. Vol. 1, 1196 p.
- Kauchuk amorfny kharakter [Rubber of amorphous character]. *Spravochnik khimika 21. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [Reference book of the chemist 21. Chemistry and chemical technology]. Available at: <https://www.chem21.info/info/312232/> (accessed 15 February 2022).
- Minakova N.N., Skvirskaya I.I., Ushakov V.Ya. Investigation of the instability nature of main characteristics or large size polymer resistors. *Elektrichestvo*, 2001, no. 3, pp. 38–42. In Rus.
- Minakova N.N., Karpov S.A., Ushakov V.Ya. Texture analysis of the disperse structure of composite elastomers with a modified carbon filler. *Russian Physics Journal*, 2002, vol. 45, no. 2, pp. 185–189.

12. Abramenko E.A., Minakova N.N., Ushakov V.Ya. Investigation of the properties of polyethylene with nanodimensional fillers by special processing of macrostructure images. *Russian Physics Journal*, 2008, vol. 51, no. 7, pp. 701–705.
13. Vlasov A.I., Elsukov K.A., Kosolapov I.A. *Elektronnaya mikroskopiya* [Electronic microscopy]. Moscow, MGTU Publ., 2011. 166 p.
14. Gouldstein J., Yakovitsa H. *Prakticheskaya elektronnaya mikroskopiya* [Practical raster electronic microscopy]. Moscow, Mir Publ., 1978. 656 p.
15. Krishtal M.M., Yasnikov I.S., Polunin V.I. *Scaniruyushchaya elektronnaya mikroskopiya i rentgenostrukturny mikroanaliz v primerakh prakticheskogo primeneniya* [Scanning electron microscopy and X-ray spectral microanalysis in examples of practical application]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2009. 208 p.
16. Hapsari R.K., Utoyo M.I., Rulaningtyas R., Suprajitno H. Comparison of histogram based image enhancement methods on iris images. *Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing*, 2020, vol. 1569, no. 2, pp. 022002. Available at: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020JPhCS1569b2002H/abstract> (accessed 15 February 2022).
17. Rasras R.J., Zahran B., Sara M.R. A developing digital signal clustering method using local binary pattern histogram. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2021, vol. 11, no. 1, pp. 872–876.
18. Maenpaa T. *The local binary pattern approach to texture analysis – extensions and applications*. Oulu, Oulu University Press, 2003. 80 p.
19. Gonzalez R., Woods R. *Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy* [Digital image processing]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2005. 1072 p.
20. Alpaslan N., Hanbay K. Multi-resolution intrinsic texture geometry-based local binary pattern for texture classification. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 54415–54430. Available at: <http://saucis.sakarya.edu.tr/en/pub/issue/54022/709186> (accessed 15 February 2022).
21. Shan C., Gong S. Facial expression based on local binary patterns: a comprehensive study. *Image and Vision Computing*, 2009, vol. 27, no. 6, pp. 803–816.
22. Xu M., Varshney P.K. Tighter performance bounds on image registration. *Proc. IEEE Int. Conference on Acoustics Speech and Signal Processing (ICASSP 2006)*. 2006, pp. 777–780.
23. Histogram Comparison. *OpenCV*. Available at: https://docs.opencv.org/3.4/d8/dc8/tutorial_histogram_comparison.html (accessed 15 February 2022).

Received: 4 June 2022.

Information about the authors

Natalya N. Minakova, Dr. Sc., professor, Altai State University, 61, Lenin avenue, Barnaul, 656049, Russia.
Vasily Ya. Ushakov, Honored Scientist and Engineer of the RF, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

УДК 550.3

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РАСЧЁТА АНИЗОТРОПИИ ПРОНИЦАЕМОСТИ НА ПРИМЕРЕ ТЕРРИГЕННОГО ПЛАСТА

Коровин Михаил Олегович,
koroavinmo@hw.tpu.ru

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

Актуальность. Нефтяная промышленность развивается путём практического недропользования. Как отмечают Алексей Эмильевич Конторович с соавторами в программе и концепции развития нефтяной и газовой промышленности в Томской области на 2001–2005 гг. и период до 2030 г., современная структура прогнозных ресурсов нефти в основных нефтегазодобывающих районах России, в том числе в Томской области, такова, что в ближайшие годы будут открыты преимущественно мелкие по запасам и небольшое количество средних и крупных месторождений. Для освоения мелких и средних месторождений необходимо создать предпосылки, стимулирующие широкое привлечение к недропользованию большого количества предприятий. Предлагаемая технология как раз отвечает всем предъявляемым требованиям. И самое главное – результат высокого качества достигается при проведении дополнительных расчётов первичной априорной информации.

Цель: исследовать межугольную толщину изучаемого месторождения на предмет присутствия анизотропии проницаемости; определить параметры анизотропии по уже реализованной методике на вешележащем и нижележащем пластах данного месторождения; подготовить данные для дальнейшего геологического и гидродинамического моделирования.

Объект: межугольная толща терригенного верхнеюрского пласта. Месторождение расположено в пределах Западной Сибири. Предварительное изучение геолого-геофизической информации позволяет с большой долей вероятности рассчитывать на неоднородное распределение свойств коллектора.

Методы: создание петрофизической модели. Она должна отвечать требованиям качества и достоверно охарактеризовать свойства по керну. В дальнейшем происходит расчёт пористости и проницаемости по интервалам целевого пласта, пробуренного скважинами. Распределение свойств по площади создаёт карту проницаемости. В дальнейшем эта карта анализируется с помощью видов векторного и градиент анализа. Результатом служат наборы данных величины и направления анизотропии проницаемости. Основное внимание уделяется именно проницаемости пластов-коллекторов, так как для разработки и добычи этот параметр является самым важным. Следующий этап – создание объёмной геологической модели. В ней учитываются эффекты неоднородности. После проверки качества создания модели на базе геологической модели создаётся гидродинамическая модель. Полученные результаты показывают, что для межугольной толщи пласта Ю₁^M, точно так же, как и для пластов Ю₁¹ и Ю₁³, целесообразно использовать методику определения параметров анизотропии проницаемости. Величина и направление уверенно идентифицируются и отражают доминирующее направление фильтрации углеводородов.

Результаты. Характеристики неоднородности пласта Ю₁^M изучены ранее опробованными методиками. Таким образом, схема, с помощью которой проводились расчёты для пласта Ю₁³, остаётся неизменной. Визуальный анализ проводится по построенным розам-диаграммам и распределениям величин в форме гистограмм. Тенденция формы образования Ю₁^M такова: ориентация первого максимума варьируется от 150° до 180°, а второго – от 330° до 360° северо-западного (юго-восточного) направления.

Ключевые слова:

Анизотропия проницаемости, масштаб анизотропии, петрофизика, терригенный коллектор, межугольная толща.

Введение

Важность увеличения коэффициента извлечения нефти невозможно переоценить. В настоящее время применяются очень эффективные методики по увеличению нефтеотдачи, которые показывают значительный эффект. Однако не всегда удаётся выявить преимущественное направление фильтрации флюидов на ранних стадиях, когда это наиболее важно. Существующие методы также позволяют получить подобные данные, однако они предполагают большие финансовые затраты. Анализ первичной геолого-геофизической информации позволяет получить данные по анизотропии фильтрационных свойств коллектора, провести расчёты и выявить доминирующее направление фильтрации флюидов. В дальнейшем это значительно облегчает выбор наиболее эффективной стратегии разработки. [1–19].

Продуктивный горизонт изучаемого месторождения состоит из трёх пачек: надугольной, межугольной

и подугольной. Эффекты анизотропии уже изучены в надугольной и подугольной пачках. Для полноты картины исследования осталось изучить наличие эффектов анизотропии проницаемости в межугольной пачке.

Результаты исследований по пластам Ю₁¹ и Ю₁³ дали положительные результаты и позволили добиться улучшения адаптации месторождения к фактическим данным добычи. Таким образом, две трети объёмов продуктивных пластов проанализированы с позиции анизотропии проницаемости. Внедрены законы распределения проницаемости в моделях и сопоставлены параметры разработки изотропных и анизотропных моделей. Остаётся проанализировать только один пласт (Ю₁^M) и определить, целесообразно ли применять эффекты анизотропии проницаемости и будут ли они влиять на итоговое распределение свойств. При успешном исходе поставленной задачи в итоге будет построена единая анизотропная модель, учитывающая все продуктивные пласты.

Краткий очерк исследуемого пласта

Распространение межугольной пачки наблюдается не на всей площади месторождения. В нижней части разреза толща ограничивается пластом угля. В случае отсутствия угля – прослоем, содержащем глины и аргиллиты. В верхней части толща ограничивается углистым аргиллитом варьирующей мощности до пяти метров или пластом угля. Условия формирования самой толщи характеризуются мелководными, прибрежно затопляемыми равнинными обстановками осадконакопления, а также мелководными приливно-отливными зонами.

Коллектор стратиграфической межугольной ритмотолщи идексируется пластом Ю₁^М. В основном фонде скважин его толщина варьируется от 1 до 6 м. Однако в семи скважинах мощность пласта варьирует от 10 до 25 м. Важным моментом является отсутствие закономерности распределения толщины пласта Ю₁^М по площади месторождения. Это, несомненно, является осложняющим фактором при анализе распределения фильтрационных свойств и создании объёмной геологической модели пласта.

Подошвенный угольный пласт межугольной толщи формировался в периодически затопляемых прибрежных болотистых областях. Тонкослоистый аргиллит, замещающий уголь, свидетельствует о прибрежно затопленных равнинных отложениях или их формировании в условиях застоя. Аргиллиты отлагались в фазу регрессии межугольной пачки. С течением времени наблюдается увеличение песчаной фракции с наличием прослоев мелкозернистого песчаника. В связи с этим пласт Ю₁^М сложен преимущественно мелкозернистым песчаником. Возможно, процесс формирования проходил в мелководной приливно-отливной зоне. В кровельной части толщи наблюдается пласт угля (в большинстве случаев) либо углистый аргиллит. Это свидетельствует о понижении динамики приливно-отливных фаз формирования осадков. Также предполагаются мелководные заливы в качестве обстановки накопления.

Анализ кривых самопроизвольной поляризации совместно с площадным распределением толщины позволил выделить зоны трансгрессий и регрессий в мелководной приливно-отливной зоне. Области трансгрессий приурочены к более погруженным зонам с увеличенной мощностью. Дополнительным фактором наличия зон размыва и приливно-отливных процессов является наличие скважин в краевых частях пласта с отсутствующим углём в кровле пласта. Также выделяется потоковая зона приливно-отливных каналов (зона русловых образований), которая характеризуется глубокой аномалией кривой самопроизвольной поляризации. Она имеет форму, приближенную к прямоугольнику, линия кровли является пологонаклонной, а боковая линия практически вертикальная. Линия подошвы неидентифицируема [20].

Предварительные расчёты

В пласте Ю₁³ на исследуемом месторождении уже были внедрены расчёты анизотропии проницаемости [21]. В настоящей работе рассматривается вышележащий пласт Ю₁^М. Необходимо применить тот же

самый подход и определить, есть ли возможность распространить ранее использованную методику на другие пласты данного месторождения. Для расчета каротажа проницаемости необходимо найти корреляционное уравнение между проницаемостью и пористостью зерна. Анализ был выполнен на основе 111 точек данных проницаемости для пласта Ю₁^М. Проницаемость вычислялась по уравнению (1) (рис. 1):

$$k = 0,0003 \cdot e^{61,837 \cdot \varphi}, R = 0,906, \quad (1)$$

где k – коэффициент проницаемости по керну, мД; φ – коэффициент пористости, д. е.

Зонирование месторождения

Первоначальное разделение на зоны проведено аналогично пласту Ю₁³ [21. С. 83, 85]. Разделение на зоны проведено аналогично пласту Ю₁³. Карта изолиний величин проницаемости отражена на рис. 2. Параметры сетки грида для построения карты следующие 50*50 м. Пласт осложняется отсутствием коллектора на некоторой территории площади месторождения. Тем не менее расчёты следует провести и определить применимость технологии расчёта параметров анизотропии данного терригенного пласта.

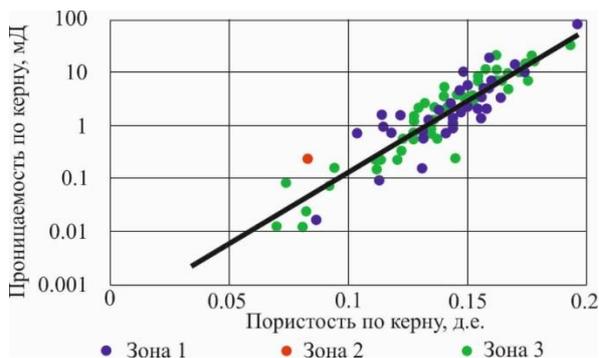


Рис. 1. Зависимость проницаемости от пористости пласта Ю₁^М

Fig. 1. Permeability vs porosity for J₁¹ formation

Первая производная по величинам проницаемости посчитана с использованием карты на рис. 2. Точность увеличивалась за счёт учёта зональности пласта. Методика определения градиентов состоит в вычислении уравнения (2):

$$G = \sqrt{dX^2 + dY^2}, \quad (2)$$

где dX – приращение по оси X ; dY – приращение по оси Y ; G – значение градиента.

Тригонометрическая окружность использовалась для вычисления азимутов каждой точки. При этом используется десятиградусный шаг с осреднением величин в его пределах. В табл. 1 сведены величины большой и малой полуоси эллипса, вычисленные по наименьшим квадратам.

Дополнительное графическое представление полученных результатов показано на рис. 3. Это гистограмма распределения количества значений градиентов проницаемости (ось Y) в десятиградусном угловом диапазоне (ось X). Значения азимутов направлений представлены в табл. 2.

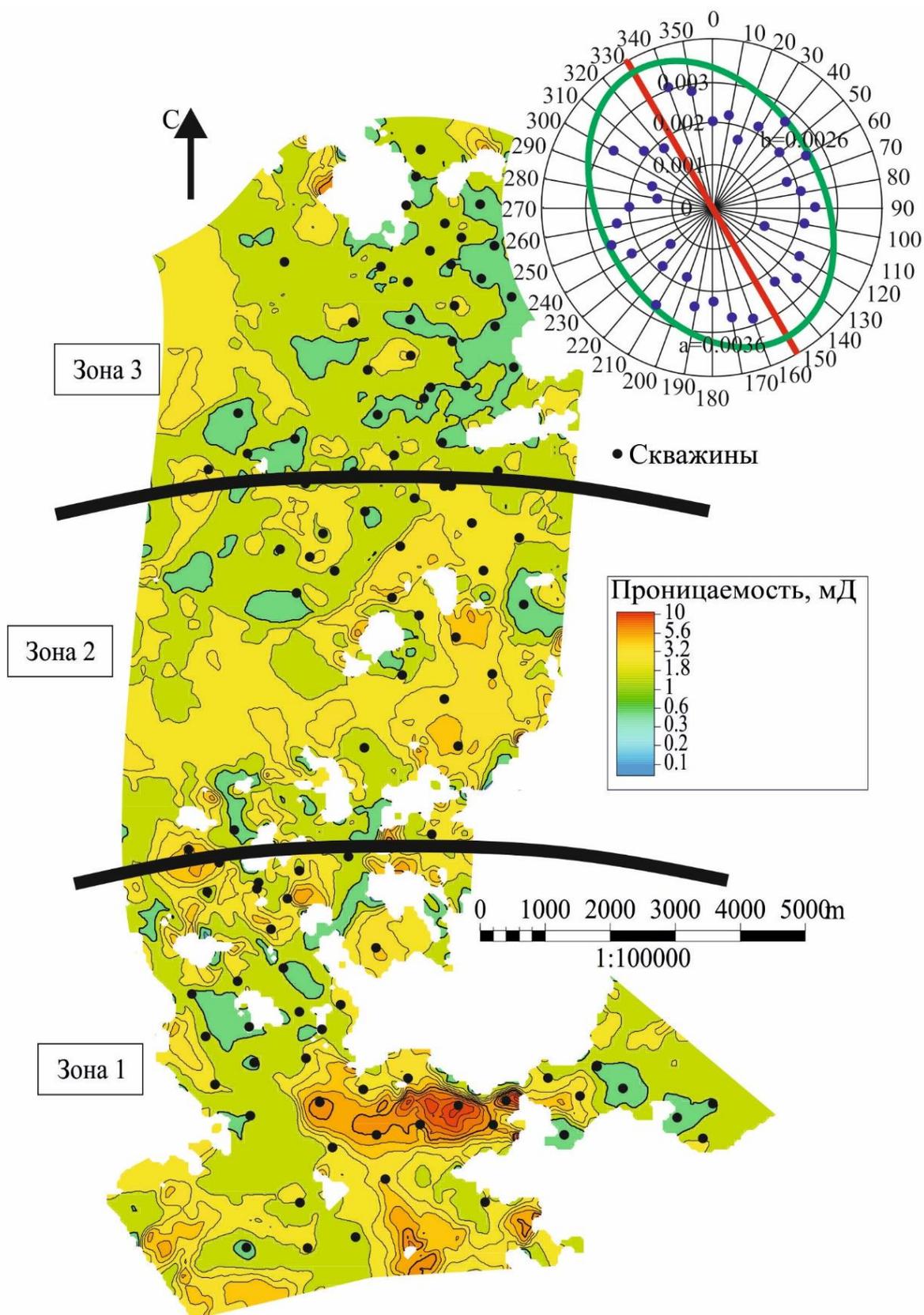


Рис. 2. Роза-диаграмма ориентировки градиентов проницаемости для зоны 3 по ядерным данным и карта распределения проницаемости пласта J_1^M

Fig. 2. Rose-diagram for permeability gradients orientation within Zone 3 for J_1^M formation, average permeability distribution maps for J_1^M formation

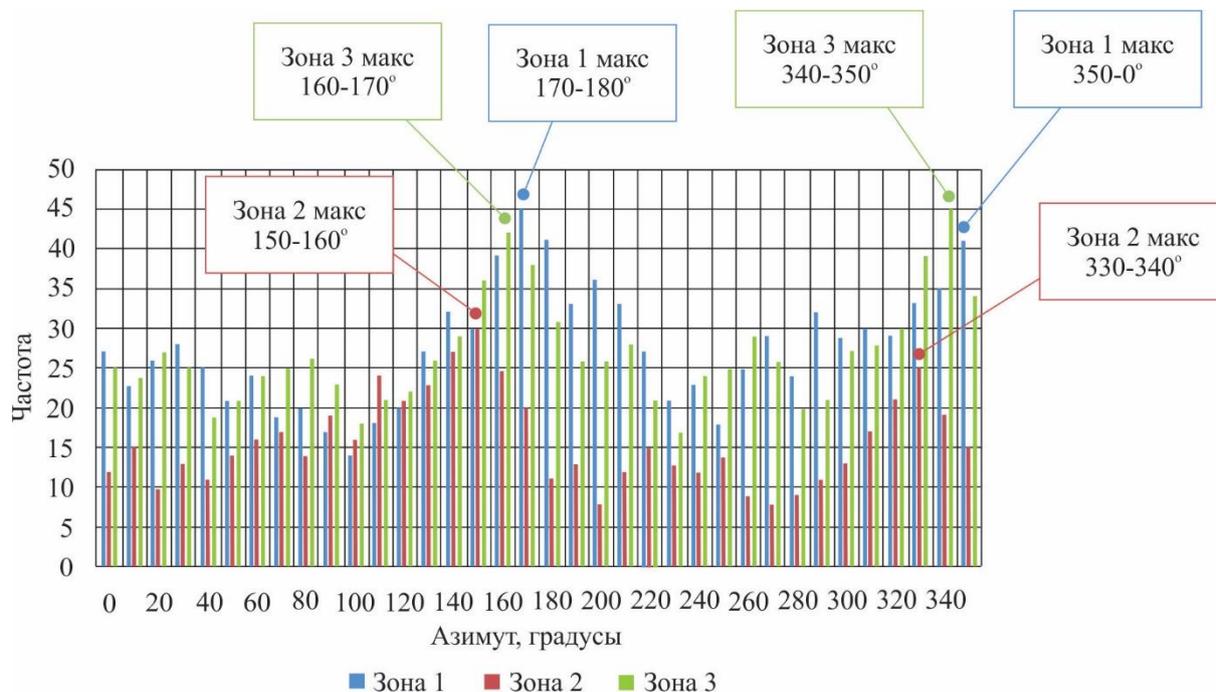


Рис. 3. Функция плотности градиентов проницаемости пласта J_1^M
Fig. 3. Permeability gradients density function for J_1^M formation

Таблица 1. Значения основной и вспомогательной оси эллипса и оценка анизотропии

Table 1. Values of the major and minor axes of the ellipse and the anisotropy estimate

Пласт Formation	Зона Zone	Главная полуось Major axis	Второстепенная полуось Minor axis	Коэффициент анизотропии Anisotropy
J_1^M	1	0,0045	0,0032	1,406
	2	0,0040	0,0027	1,481
	3	0,0036	0,0026	1,385

Таблица 2. Значения азимута для пласта J_1^M

Table 2. J_1^M azimuth calculations

Пласт Formation	Зона Zone	Азимут/Azimuth	
		Первый максимум First maximum	Второй максимум Second maximum
J_1^M	Zone 1	170–180°	350–360°
	Zone 2	150–160°	330–340°
	Zone 3	160–170°	340–350°

Анализ метода распределения пространственной средней проницаемости

Проведённые расчёты показывают целесообразность разделения пласта на три зоны. В результате

удалось добиться увеличения точности расчётов и последующего формирования геолого-гидродинамической модели пласта-коллектора для подтверждения влияния неоднородности проницаемости. Аппроксимированные величины неоднородности с помощью эллиптической модели аппроксимации определены и демонстрируют различные параметры для зон. В табл. 2 отражено, что для пласта J_1^M зона 3 характеризуется минимальным значением, равным 1,385, зона 1 – 1,406, а зона 2 – максимальным значением анизотропии, равным 1,481.

Заключение и выводы

Характеристики неоднородности пласта J_1^M изучены ранее опробованными методиками. Таким образом, схема, с помощью которой проводились расчёты для пласта J_1^3 , остаётся неизменной. Визуальный анализ проводится по построенным розам-диаграммам и распределениям величин в форме гистограмм. Тенденция формы образования J_1^M такова: ориентация первого максимума варьируется от 150° до 180°, а второго – от 330° до 360° северо-западного (юго-восточного) направления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Interpreting reservoir permeabilities from wireline formation test data / H. Du, Y. Liu, X. Li, F. Guan, X. Sui // Petroleum Science and Technology. – 2013. – V. 31. – P. 1819–1826.
- Dussan E., Sharma Y. Analysis of the pressure response of a single-probe formation tester // Society of Petroleum Engineers. Formation evaluation. – 1992. – V. 7. – P. 151–156.
- Permeability anisotropy and its relations with porous medium structure / J.B. Clavaud, A. Mainault, M. Zamora, P. Rasolofosaon, C. Schlitter // Journal of geophysical research. – 2008. – V. 113. – P. 1–10.
- Меркулов В.П., Краснощекова Л.А. Исследование пространственной литолого-петрофизической неоднородности продуктивных коллекторов месторождений нефти и газа // Известия Томского политехнического университета. – 2002. – Т. 305. – № 6. – С. 296–303.
- Tyvand P.A., Storhaug A.R.F. Two-dimensional flow in a porous medium with general anisotropy. – Norway: Norwegian University of Life Sciences, 2004. – 20 p.
- Литолого-петрофизическая анизотропия песчано-глинистых коллекторов нефтяных месторождений / В.П. Меркулов, Д.В. Александров, Л.А. Краснощекова, Ю.Я. Ненахов // Научно-технический вестник ЮКОС. – 2004. – № 10. – С. 33–36.
- Abedi R., Clarke P.L. Modeling of rock inhomogeneity and anisotropy by explicit and implicit representation of microcracks // 52nd U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. – Seattle, Washington, USA, 17–20 June, 2018. – P. 1–11.

8. Zhang Z., Du J. Reservoir characterization using perforation shots: Anisotropy and attenuation // SEG International Exposition and Annual Meeting. – Anaheim, California, USA, 14–19 October, 2018. – P. 2982–2986.
9. Kolbikov S., Kuznetsova Y., Smirnov A. Method of anisotropy modeling and its application to hydrodynamic simulation // SPE Russian Petroleum Technology Conference. – Moscow, Russia, 15–17 October, 2018. – P. 1–9.
10. Makhenko R.Y., Tarokh A. Anisotropy in the undrained pore pressure response of rock // 52nd U.S. Rock Mechanics / Geomechanics Symposium. – Seattle, Washington, USA, 17–20 June, 2018. – P. 40–51.
11. Liu S., King M.J. Improved calculation of effective permeability for pore network models using the diffuse source methodology // 81st EAGE Conference and Exhibition. – London, England, UK, 3–6 June, 2019. – P. 1–19.
12. Gray D.H., Fatt I., Bergamini G. The effect of stress on permeability of sandstone cores // Society of petroleum engineers' journal. – 1963. – V. 3. – P. 95–99.
13. Wannell M.J., Colley N.M., Halford F.R. The use of a new technique to determine permeability anisotropy // SPE Offshore Europe. – 1993, September. – V. 2. – P. 489–495.
14. Cosan A. Measuring permeability anisotropy: the latest approach // Oilfield Review. – 1994. – V. 6. – № 4. – P. 24–35.
15. Carpenter C. Better permeability estimation from wireline formation testing // Journal of Petroleum Technology. – 2018, February. – V. 70. – P. 66–68.
16. Pan Y., Medhat M.K., Wayne N. Fieldwide determination of directional permeabilities using transient well testing // SPE Reservoir Evaluation & Engineering. – 2019, May. – V. 22. – P. 1–11.
17. Al-Hadrami H.K., Teufel L.W. Influence of permeability anisotropy and reservoir heterogeneity on optimization of infill drilling in naturally fractured tight-gas Mesaverde sandstone reservoirs, San Juan Basin // SPE Low Permeability Reservoirs Symposium. – Denver, U.S.A., March 12–15, 2000. – P. 1–12.
18. Алексеев А.С. Оценка чувствительности объекта АВ1-3 Ватьеганского нефтяного месторождения к изменению в системе поддержания пластового давления на базе ретроспективного анализа // Наука и бизнес: пути развития. – 2019. – № 6. – С. 18–21.
19. Сагитова И.М., Сагитов Д.К., Зейгман Ю.В. Оценка влияния проницаемостной неоднородности недонасыщенных нефтью пластов на изменение начальной обводненности скважинной продукции // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2020. – № 2. – С. 69–81.
20. Фёдоров Б.А. Подсчет запасов УВ и ТЭО КИН продуктивных пластов Двуреченского месторождения на основе геологического и гидродинамического моделирования (геологические запасы). Отчет по договору № ПР699 с ОАО «Томскнефть» ВНК. – Томск, 2006. – 1200 с.
21. Коровин М.О. Методика количественной оценки латеральной анизотропии фильтрационно-ёмкостных свойств терригенных коллекторов на базе комплексного анализа геолого-геофизических данных: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2017. – 108 с.

Поступила: 02.03.2022 г.

Информация об авторах

Коровин М.О., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 550.3

ESTIMATION OF PERMEABILITY ANISOTROPY CALCULATION QUALITY ON THE EXAMPLE OF A TERRIGENOUS FORMATION

Mikhail O. Korovin,
korovinmo@hw.tpu.ru

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

The relevance of the research. The oil industry is developing through practical subsoil use. As Aleksey Emilievich Kontorovich and co-authors note in the program and concept for the development of the oil and gas industry in the Tomsk region for 2001–2005 and the period up to 2030 – the current structure of forecast oil resources in the main oil and gas producing regions of Russia, including the Tomsk region, is such that in the coming years, mainly small in terms of reserves and a small number of medium and large fields will be discovered. For the development of small and medium-sized deposits, it is necessary to create prerequisites that stimulate the widespread involvement of a large number of enterprises in subsoil use. The proposed technology just meets all the requirements. And, most importantly, a high-quality result is achieved by additional calculations of primary a priori information.

The aim of this work is to investigate the intercoal strata of the studied field for the presence of permeability anisotropy; determine the anisotropy parameters using the already implemented technique on the overlying and underlying layers of this field; prepare data for further geological and simulation modeling.

The study object is the intercoal strata of the Upper Jurassic terrigenous formation. The deposit is located within Western Siberia. A preliminary study of geological and geophysical information allows, with a high degree of probability, calculating the heterogeneous distribution of reservoir properties.

Methods: creation of a petrophysical model. It must meet the quality requirements and reliably characterize the properties of the core. Later, the porosity and permeability are calculated for the intervals of the target formation drilled by the wells. The distribution of properties over an area creates a permeability map. This map is further analyzed using vector and gradient analysis views. The result is datasets of magnitude and direction of permeability anisotropy. The main attention is paid to the permeability of reservoirs, since this parameter is the most important for development and production. At the next stage, specialists move on to creating a three-dimensional geological model. It takes into account the effects of heterogeneity at the creation stage. After checking the quality of the model development, a simulation model is created on the basis of the geological one. The obtained results show that for the intercoal strata of the J_1^M formation, just like for J_1^1 and J_1^3 formations, it is advisable to use the method for determining the permeability anisotropy parameters. The magnitude and direction are confidently identified and reflect the dominant hydrocarbon filtration direction.

Results. The characteristics of the heterogeneity of the J_1^M formation were studied by previously tested methods. Thus, the scheme of calculations for the J_1^3 reservoir remains unchanged. Visual analysis is carried out on the basis of constructed rose diagrams and distributions of values in the form of histograms. The trend of the J_1^M formation form is as follows: the orientation of the first maximum varies from 150° to 180° , and the second – from 330° to 360° northwest (southeast) direction.

Key words:

Permeability anisotropy, anisotropy scale, petrophysics, terrigenous reservoir, intercoal strata.

REFERENCES

- Du H., Liu Y., Li X., Guan F., Sui X. Interpreting reservoir permeabilities from wireline formation test data. *Petroleum Science and Technology*, 2013, vol. 31, pp. 1819–1826.
- Dussan E.B.V., Yogeshwar Sharma. Analysis of the pressure response of a single-probe formation tester. *Society of Petroleum Engineers. Formation Evaluation*, 1992, June, pp. 151–156.
- Clavaud J.B., Mainault A., Zamora M. Rasolofosaon P., Schlitter C. Permeability anisotropy and its relations with porous medium structure. *Journal of geophysical research*, 2008, vol. 113, pp. 1–10.
- Merkulov V.P., Krasnoshchekova L.A. Study of spatial lithogenic-petrophysical heterogeneity of productive collectors of oil and gas fields *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2002, vol. 305, no. 6, pp. 296–303. In Rus.
- Tyvand P.A., Storhaug A.R.F. *Two-dimensional flow in a porous medium with general anisotropy*. Norway, Norwegian University of Life Sciences, 2004. 20 p.
- Merkulov V.P., Aleksandrov D.V., Krasnoshchekova L.A., Nenafov Yu.Ya. Litologo-petrofizicheskaya anizotropiya peschanoglimistykh kollektorov neftyanykh mestorozhdeniy [Lithological-petrophysical anisotropy of sandy-argillaceous reservoirs of oil fields]. *Nauchno-tekhmicheskiiy vestnik YuKOS*, 2004, no. 10, pp. 33–36.
- Abedi R., Clarke P.L. Modeling of rock inhomogeneity and anisotropy by explicit and implicit representation of microcracks. *52nd U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. Seattle, Washington, USA, 17–20 June, 2018. pp. 1–11.
- Zhang Z., Du J. Reservoir characterization using perforation shots: anisotropy and attenuation. *SEG International Exposition and Annual Meeting*. Anaheim, California, USA, 14–19 October, 2018. pp. 2982–2986.
- Kolbikov S., Kuznetsova Y., Smirnov A. Method of Anisotropy Modeling and its Application to Hydrodynamic Simulation. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Moscow, Russia, 15–17 October, 2018. pp. 1–9.
- Makhenko R.Y., Tarokh A. Anisotropy in the undrained pore pressure response of rock. *52nd U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. Seattle, Washington, USA, 17–20 June, 2018. pp. 40–51.
- Liu S., King M.J. Improved calculation of effective permeability for pore network models using the diffuse source methodology. *81st EAGE Conference and Exhibition*. London, England, UK, 3–6 June, 2019. pp. 1–19.
- Gray D.H., Fatt I., Bergamini G. The effect of stress on permeability of sandstone cores. *Society of petroleum engineers' journal*, 1963, vol. 3, pp. 95–99.
- Wannell M.J., Colley N.M., Halford F.R. The use of a new technique to determine permeability anisotropy. *SPE Offshore Europe*. – 1993, September. – V. 2. – P. 489–495.
- Cosan A. Measuring permeability anisotropy: the latest approach. *Oilfield Review*, 1994, vol. 6, no. 4, pp. 24–35.
- Carpenter C. Better permeability estimation from wireline formation testing. *Journal of Petroleum Technology*, February, 2018, vol. 70, pp. 66–68.

16. Pan Y., Medhat M.K., Wayne N. Fieldwide determination of directional permeabilities using transient well testing. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2019, May, vol. 22, pp. 1–11.
17. Al-Hadrami H.K., Teufel L.W. Influence of permeability anisotropy and reservoir heterogeneity on optimization of infill drilling in naturally fractured tight-gas Mesaverde sandstone reservoirs, San Juan Basin. *SPE Low Permeability Reservoirs Symposium*. Denver, U.S.A., March 12–15, 2000. pp. 1–12.
18. Alekseev A.S. Otsenka chuvstvitelnosti obekta AV1-3 Vateganskogo nefyanogo mestorozhdeniya k izmeneniyu v sisteme podderzhaniya plastovogo davleniya na baze retrospektivnogo analiza [Sensitivity assessment of the AB1-3 object of the Vatyeganskoe oil field to a change in the reservoir pressure maintenance system based on retrospective analysis]. *Nauka i biznes: puti razvitiya*, 2019, no 6, pp. 18–21.
19. Sagitova I.M., Sagitov D.K., Zeygman Yu.V. Evaluation of the effect of permeability heterogeneity of undersaturated reservoirs on the change in the initial water cut of well production]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Neft i gaz*, 2020, no. 2, pp. 69–81. In Rus.
20. Fedorov B.A. Podschet zapasov UV i TEO KIN produktivnykh plastov Dvurechenskogo mestorozhdeniya na osnove geologicheskogo i gidrodinamicheskogo modelirovaniya (geologicheskie zapasy) [Calculation of hydrocarbon reserves and feasibility study of oil recovery factor of productive strata of the Dvurechenskoe field based on geological and simulation modeling (geological reserves)]. Tomsk, Report on contract no. PR699 with OAO Tomskneft VNK, 2006. 1200 p.
21. Korovin M.O. Metodika kolichestvennoy otsenki lateralnoy anizotropii filtratsionno-emkostnykh svoystv terrigennykh kollektorov na baze kompleksnogo analiza geologo-geofizicheskikh dannykh. Diss. Kand. nauk [Methodology for quantitative assessment of lateral anisotropy of filtration -capacity properties of terrigenous reservoirs based on a comprehensive analysis of geological and geophysical data. Cand. Diss.]. Tomsk, 2017. 108 p.

Received: 2 March 2022.

Information about the authors

Mikhail O. Korovin, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 621.833.681

ВНЕДРЕНИЕ ВОЛНОВОГО ТОРЦЕВОГО КИНЕМАТИЧЕСКОГО РЕДУКТОРА В НАСОСНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДОБЫЧИ ТЯЖЕЛОЙ ВЫСОКОВЯЗКОЙ НЕФТИ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Джасем Мохамад Али^{1,2},
jasem85@tpu.ru

Крауиньш Петр Янович¹,
peterkrau@tpu.ru

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

² Университет Аль-Фурат,
Сирия, Дейр-эз-Зор, ул. Университетская, 7.

Актуальность исследования состоит в обеспечении малых габаритных размеров и массы редукторов, что позволяет размещать их вместе с поршневыми насосами в труднодоступных местах и экстремальных условиях при добыче высоковязкой нефти. Отношение массы редуктора к номинальному моменту на выходном валу является основным критерием технического уровня редукторов, поэтому необходимость создания новых видов механических передач с малыми габаритами и массой является актуальной.

Цель: определить передаточное отношение волнового торцевого кинематического редуктора и зависимости объема блока шестерен и его угловой скорости от угла нутации θ .

Объекты: волновой торцевой кинематический редуктор, который является неотъемлемой частью поршневых насосов при добыче высоковязкой нефти в экстремальных условиях.

Методы: метод Виллиса, аналитический метод, численные методы решения систем нелинейных уравнений, теория механизмов и машин и основная теория зубчатого зацепления.

Результаты. Рассмотрена проблема создания волнового торцевого кинематического редуктора с малыми габаритами, что позволяет размещать его вместе с поршневыми насосами в труднодоступных местах и экстремальных условиях при добыче высоковязкой нефти. Были определены передаточное отношение редуктора двумя способами (методом Виллиса и аналитическим методом) и зависимость размеров блока шестерен от угла нутации θ , а также верхнее предельное значение угла нутации, при котором редуктор работает устойчиво. Важно отметить, что волновой торцевой кинематический редуктор не требует выполнения условий равенства межосевых расстояний, что расширяет область его оптимального конструирования. Кроме того, его кинематика не накладывает ограничений на выбор модулей пар зубчатых колес или шага расположения зубьев, что расширяет набор возможных соотношений чисел зубьев колес и диапазон передаточных отношений.

Ключевые слова:

Тяжелая высоковязкая нефть, поршневой насос, механизированный способ добычи нефти, волновой торцевой кинематический редуктор, передаточное отношение, угол нутации.

Введение

Тяжелая нефть – это высоковязкая нефть, которая обладает повышенной плотностью из-за высокого содержания ароматических углеводородов, высокой концентрации металлов и сернистых соединений, повышенной коксусемостью, что приводит к увеличению затрат на добычу [1].

Химические и термические методы являются наиболее распространенными методами добычи нефти. Химические методы включают в себя закачку реагентов, а термические методы – нагрев пласта паром или технологии внутрискважинного горения. Такие методы требуют больших вложений и затрат в ходе добычи, поэтому поиск новых технологий, позволяющих снизить стоимость добычи высоковязкой нефти является весьма актуальным [2].

Одним из перспективных методов добычи нефти является механизированный метод центробежными, поршневыми и винтовыми насосами. Этот метод позволяет добывать высоковязкую нефть, но при этом тоже имеет ограничения по вязкости и температурам применения. Центробежные насосы обычно приме-

няются на вязкостях до 300–400 сСт из-за большего снижения характеристик. Ограничение вязкости не является существенным для винтовых насосов, однако газовый фактор приводит к преждевременным отказам резиновых элементов винтовых насосов [3].

Поршневые насосы перспективны для применения при работе на нефтяных месторождениях. Простота устройства, малые габаритные размеры и масса позволяют размещать их в труднодоступных местах [4].

В насосных технологиях добычи высоковязкой нефти редуктор играет важную роль благодаря его прямым воздействиям на улучшение массогабаритных и энергетических показателей насосных агрегатов [5].

Основной тенденцией развития современного машиностроения является непрерывное увеличение скорости движения и передаваемых нагрузок с одновременным ужесточением требований к виброакустическим и точностным характеристикам. В связи с этим современные тенденции совершенствования механических редукторов, составляющих основу привода практически всех машин, характеризуются тре-

бованиями к следующим показателям: нагрузочная способность, компактность и удельная материалоемкость, КПД, уровень звуковой мощности и вибраций, кинематическая точность, стоимость [6, 7].

Анализ уровня и тенденций развития редукторостроения показал целесообразность исследования и разработки волновых торцевых кинематических редукторов [7], благодаря следующим преимуществам: существенное повышение несущей способности по контактной выносливости за счет многопарности зацепления зубьев до 10–12 % от общего числа зубьев, кинематическая точность, хорошие энергетические и массогабаритные показатели, высокий коэффициент полезного действия и др. [8].

Проблема создания волнового торцевого кинематического редуктора с компактными габаритами выдвигает на первый план ряд вопросов в области геометро-кинематической теории зацепления, которые

рассматриваются в данной работе. Специфика кинематики волнового торцевого кинематического редуктора позволяет получать большие передаточные отношения при малых габаритах [9, 10].

Принципиальная кинематическая схема волнового торцевого кинематического редуктора представлена на рис. 1. Редуктор состоит из ведущего вала (генератора волн) – 1, выполненного в виде кривошипа; блока шестерен – 7, состоящего из двух конических колес и свободно вращающегося на ведущем валу; неподвижного колеса – 2 и подвижного колеса – 5, жестко связанного с ведомым валом – 6. Левый зубчатый конический венец – 3 блока шестерен – 7 находится в зацеплении с неподвижным колесом – 2, а правый зубчатый венец – 4 этого блока – с подвижным колесом – 5. Ведущий вал вращается на двух подшипниках, установленных в ступицах конических колес – 2, 5 [11].

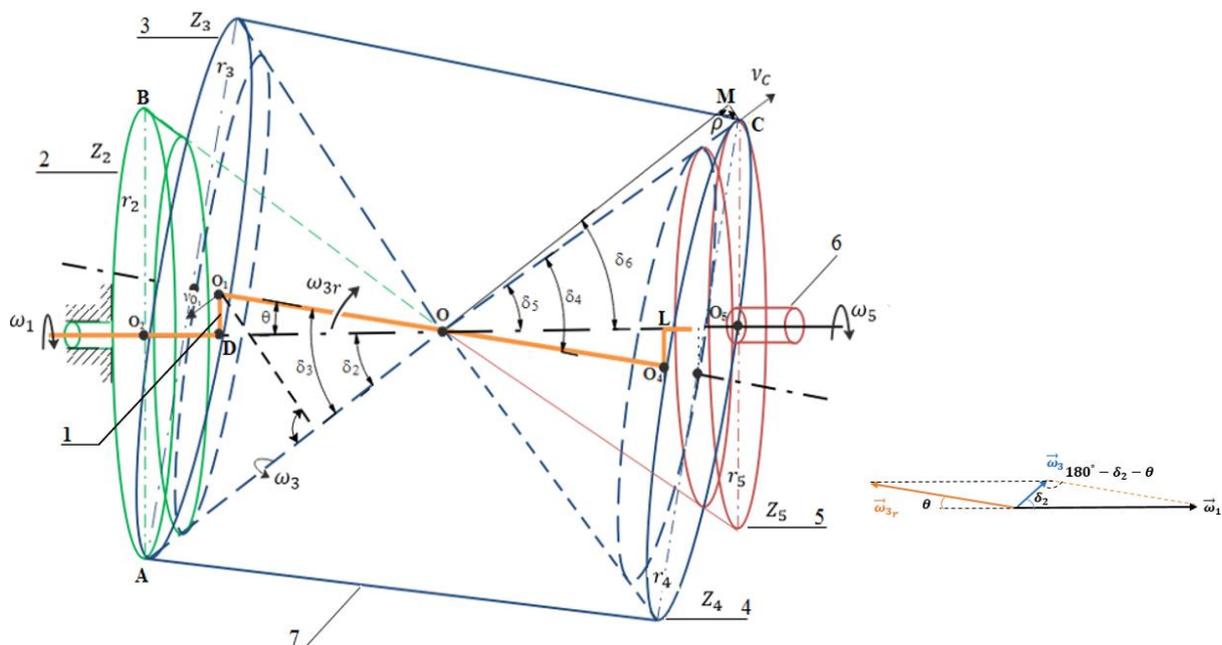


Рис. 1. Принципиальная кинематическая схема волнового торцевого кинематического редуктора: 1 – ведущий вал; 2 – неподвижное колесо; 7 – блок шестерен, состоящий из двух конических колес – 3, 4; 5 – подвижное колесо; 6 – ведомый вал

Fig. 1. Kinematic diagram of the wave face kinematic reducer: 1 – drive shaft; 2 – fixed gear; 7 – gear block, consisting of two conical gears 3, 4; 5 – output gear; 6 – driven shaft

Делительные конусы неподвижного колеса – 2, блока шестерен – 7 и подвижного колеса – 5 данного редуктора имеют общую вершину, расположенную в точке O и лежащую на оси редуктора O_2O_5 . Разность в количестве зубьев Z_2 неподвижного колеса – 2 и зубьев сопряженной с ним блока шестерен Z_3 принимается равной 2 ($Z_2 = Z_3 \pm 2$), а разность в количестве зубьев блока шестерен – 7 (Z_4) и подвижного колеса – 5 (Z_5) принимается равной 1 ($Z_5 = Z_4 \pm 1$) [12].

При вращении ведущего вала – 1 блок шестерен – 7 совершает пространственно-сферическое движение относительно точки O посредством обкатывания зубьев венца Z_3 по зубьям неподвижного колеса 2 (Z_2); входят в зацепление одновременно зубья венца Z_4 с

зубьями подвижного колеса – 5 Z_5 . Таким образом, блок шестерен – 7 передает вращение зубчатому колесу – 5, жестко соединенному с ведомым валом 6 [13].

Пространственно-сферическое движение блока шестерен – 7 в данный момент (рис. 1) можно представить как вращательное движение вокруг мгновенной оси вращения AOM , описывающей в процессе движения поверхность неподвижного аксиода AOB [14, 15].

С другой стороны, это движение можно представить как результат сложения двух вращений вокруг осей, пересекающихся в точке O : переносного вращательного движения генератора – 1 вокруг оси O_2O_5

с угловой скоростью ω_1 и относительного вращательного движения блока вокруг оси генератора O_1O_4 с относительной угловой скоростью ω_{3r} . Абсолютная угловая скорость блока шестерен – 7 будет равна сумме этих угловых скоростей.

$$\vec{\omega}_3 = \vec{\omega}_1 + \vec{\omega}_{3r}. \quad (1)$$

Векторная диаграмма, иллюстрирующая зависимость (1), представлена на рис. 1 справа. Здесь вектор $\vec{\omega}_1$ ориентирован по оси редуктора O_2O_5 , вектор $\vec{\omega}_{3r}$ – по оси блока шестерен O_1O_4 , вектор $\vec{\omega}_3$ – по мгновенной оси вращения АОМ.

Из параллелограмма векторов угловых скоростей видно, что

$$\frac{\omega_1}{\sin(180-\delta_2-\theta)} = \frac{\omega_1}{\sin(\delta_2+\theta)} = \frac{\omega_3}{\sin\theta} = \frac{\omega_{3r}}{\sin\delta_2}; \quad (2)$$

Из рис. 1 следует, что

$$\delta_2 + \theta = \delta_3; \delta_5 + \theta = \delta_4,$$

$$\frac{\sin\delta_2}{\sin\delta_3} = \frac{r_2}{r_3} = \frac{Z_2}{Z_3}; \frac{\sin\delta_4}{\sin\delta_5} = \frac{r_4}{r_5} = \frac{Z_4}{Z_5}. \quad (3)$$

Из выражения (2) и (3) имеем

$$\omega_3 = \omega_1 \frac{\sin\theta}{\sin\delta_3}; \omega_{3r} = \omega_1 \frac{\sin\delta_2}{\sin\delta_3} = \omega_1 \frac{Z_2}{Z_3}.$$

Для определения передаточного отношения волнового торцевого кинематического редуктора используем метод Виллиса [16].

Мысленно сообщим основанию механизма угловую скорость ω_1 , равную по модулю угловой скорости ведущего вала (генератора) – 1, но направленную в противоположную сторону. В этом случае обращенные угловые скорости всех звеньев редуктора будут следующими (рис. 1):

Для звена 1 (ведущего вала)

$$\omega_{обр1} = \omega_1 - \omega_1 = 0,$$

т. е. ведущий вал остановлен.

Для неподвижного колеса (звена) – 2

$$\omega_{обр2} = -\omega_1.$$

Для блока шестерен – 7 (т. е. для венцов 3 и 4)

$$\vec{\omega}_{обр3} = \vec{\omega}_1 + (-\vec{\omega}_1) + \vec{\omega}_{3r} = \vec{\omega}_{3r} = \vec{\omega}_{обр4},$$

$$\omega_{обр3} = -\omega_{3r} = -\omega_1 \frac{Z_2}{Z_3} = \omega_{обр4}.$$

Для подвижного колеса (звена) – 5

$$\omega_{обр5} = -\omega_5 - \omega_1.$$

Так как ведущий вал – 1 (рис. 1) остановлен, волновой торцевой кинематический редуктор превратился в передачу с последовательным соединением одноступенчатых конических передач, состоящих из пар зубчатых колес – 2, 3 и 4, 5. Для этих одноступенчатых передач справедливы соотношения

$$\frac{\omega_{обр2}}{\omega_{обр3}} = \frac{-\omega_1}{-\omega_{3r}} = \frac{\omega_1}{\omega_1 \frac{Z_2}{Z_3}} = \frac{Z_3}{Z_2} \quad (4)$$

и

$$\frac{\omega_{обр4}}{\omega_{обр5}} = \frac{-\omega_1 \frac{Z_2}{Z_3}}{-\omega_1 - \omega_5} = \frac{Z_5}{Z_4}. \quad (5)$$

Из соотношений (4), (5) после ряда преобразований получаем

$$\omega_1 \frac{Z_2}{Z_3} = (\omega_1 + \omega_5) \frac{Z_5}{Z_4} = \omega_1 \frac{Z_5}{Z_4} + \omega_5 \frac{Z_5}{Z_4}$$

$$\omega_1 \left(\frac{Z_2}{Z_3} - \frac{Z_5}{Z_4} \right) = \omega_5 \frac{Z_5}{Z_4},$$

отсюда

$$\omega_1 \frac{Z_2 Z_4 - Z_3 Z_5}{Z_3 Z_4} = \omega_5 \frac{Z_5}{Z_4}, \quad (6)$$

$$i_{15}^2 = \frac{\omega_1}{\omega_5} = \frac{\frac{Z_5}{Z_4}}{\frac{Z_2 Z_4 - Z_3 Z_5}{Z_3 Z_4}},$$

отсюда

$$i_{15}^2 = \frac{\omega_1}{\omega_5} = \frac{Z_3 Z_5}{Z_2 Z_4 - Z_3 Z_5}. \quad (7)$$

Так как ведомый вал волнового торцевого кинематического редуктора вращается в сторону, противоположную ведущему валу (генератору), то формула (7) примет вид

$$i_{15}^2 = -\frac{\omega_1}{\omega_5} = \frac{Z_3 Z_5}{Z_3 Z_5 - Z_2 Z_4}. \quad (8)$$

Покажем, что тот же результат может быть получен аналитическим методом. При постоянной угловой скорости входного вала ω_1 .

Пространственно-сферическое движение блока шестерен – 7 описывается системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} \psi &= \omega_1 t; \\ \varphi &= -\omega_1 t \frac{r_2}{r_3}; \\ \theta &= const. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Угловую скорость блока шестерен – 7 вокруг мгновенной оси определяем по формуле

$$\omega_{ш} = \sqrt{\dot{\psi}^2 + \dot{\varphi}^2 + \dot{\theta}^2 + 2\dot{\psi}\dot{\varphi}\cos\theta}. \quad (10)$$

Дифференцируя уравнения (2)–(9) по времени и используя соотношения

$$\frac{r_2}{r_3} = \frac{\sin\delta_2}{\sin\delta_3},$$

уравнение (10) перепишем в виде

$$\omega_{ш} = \omega_1 \sqrt{1 + \frac{\sin^2\delta_2}{\sin^2\delta_3} - 2\frac{\sin\delta_2}{\sin\delta_3}\cos\theta}.$$

Подставляя в которое соотношение углов $\delta_2 = \delta_3 - \theta$, получаем

$$\omega_{ш} = \omega_1 \frac{\sin\theta}{\sin\delta_3}.$$

Таким образом, блок шестерен – 7, входя в зацепление с неподвижным колесом – 2, сообщает последнему вращение вокруг мгновенной оси с угловой скоростью $\omega_{ш}$. Одновременно другой венец шестерни находится в зацеплении с зубьями подвижного колеса – 5 и сообщает ему вращение с угловой скоростью ω_5 . Зная угловую скорость блока шестерен – 7 $\omega_{ш}$ и положение мгновенной оси, определяем скорость в точке Р зацепления подвижного колеса – 5 с венцом блока шестерен – 3.

$$V = \omega_1 \cdot \rho = \omega_5 \cdot r_5, \quad (11)$$

где ρ – кратчайшее расстояние от точки С зацепления до мгновенной оси. Расстояние ρ , выраженное через

параметры редуктора, подставляем в (11) и получаем формулу для определения угловой скорости подвижного колеса – 5

$$\omega_5 = \omega_1 \frac{\rho}{r_5} = -\omega_1 \frac{r_2 r_4 - r_3 r_5}{r_3 r_5} = -\omega_1 \frac{Z_2 Z_4 - Z_3 Z_5}{Z_3 Z_5}.$$

Передаточное отношение волнового торцевого кинематического редуктора определяем по формуле

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_5} = -\frac{Z_3 Z_5}{Z_2 Z_4 - Z_3 Z_5} = \frac{Z_3 Z_5}{Z_3 Z_5 - Z_2 Z_4}, \quad (12)$$

т. е. выражения (8) и (12) для передаточного отношения волнового торцевого кинематического редуктора, полученные различными способами, равноценны.

Анализ формулы (12) свидетельствует о том, что волновой торцевой кинематический редуктор позволяет реализовать широкий диапазон передаточных отношений. При этом максимальное передаточное отношение $i_{\max} = Z_4^2 - 1$ достигается при соотношении зубьев:

$$Z_2 = Z_4; Z_3 = Z_4 + 1; Z_5 = Z_4 - 1. \quad (13)$$

В работе [12] показано, что соотношение зубьев (13) обеспечивает не только максимальное передаточное отношение, но и значительное повышение многопарности сопряжения зубьев. И, более того, кинематика волнового торцевого кинематического редуктора не накладывает ограничений на выбор модулей пар зубчатых колес или шага расположения зубьев, что расширяет набор возможных соотношений чисел зубьев колес и диапазон передаточных отношений [17].

Геометрия блока шестерен сильно зависит от угла нутации θ , который определяет размер и формы делительных конусов зубчатых колес блока шестерен. Математически мы можем рассчитать размер и форму этих конусов, учитывая количество зубьев зубчатых колес, шаг зацепления и угол нутации θ , а чтобы найти углы делительных конусов зубчатых колес – 2, 5 и блока шестерен – 7 были использованы следующие тригонометрические соотношения:

$$\delta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{\sin(\pi - \theta)}{\frac{Z_3}{Z_2} + \cos(\pi - \theta)} \right),$$

$$\delta_3 = \pi - \theta - \delta_2,$$

$$\delta_4 = \tan^{-1} \left(\frac{\sin(\pi - \theta)}{\frac{Z_5}{Z_4} + \cos(\pi - \theta)} \right),$$

$$\delta_5 = \pi - \theta - \delta_4.$$

Внешнее конусное расстояние определится по формуле:

$$R_3 = \frac{d_3}{2 \sin \delta_3},$$

$$R_4 = \frac{d_4}{2 \sin \delta_4}.$$

Используя предыдущие соотношения, можно определить радиальное и осевое расстояния, т. е. размеры блока шестерен при разных величинах угла нутации θ . В таблице приведены геометрические параметры редуктора, на рис. 2 представлена зависимость размера блока шестерен от различных углов нутации.

Таблица. Геометрические параметры волнового торцевого кинематического редуктора

Table. Geometrical parameters of the wave face kinematic reducer

Число зубьев/Tooth number	$Z_2=52$	$Z_3=54$	$Z_4=81$	$Z_5=80$
Ширина венца зубьев, мм Face width, mm	$b_2=25$	$b_3=25$	$b_4=25$	$b_5=25$
Модуль m , мм/Module m , mm	$m=5$			
Передаточное отношение i Gear ratio i	40			

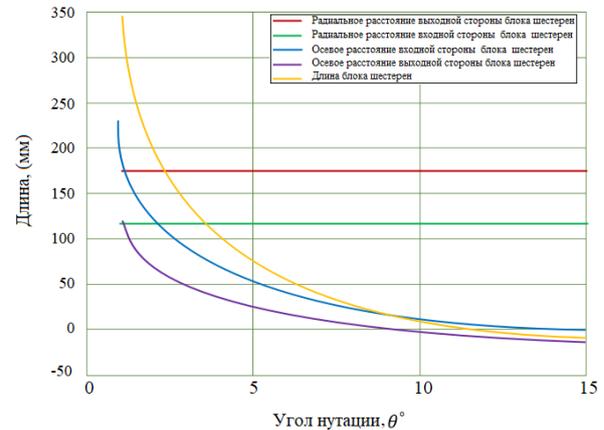


Рис. 2. Зависимость размера блока шестерен от различных углов нутации

Fig. 2. Dependence of the gear block size on various nutation angles

Из рис. 2 видно, что размер блока шестерен может сильно различаться благодаря небольшим вариациям угла нутации θ . Изменение угла нутации θ с 2° до 4° уменьшает общую длину блока шестерен от 180 до 75 мм. Видно, что при незначительном изменении угла нутации θ достигается большое уменьшение длины блока шестерен. Поскольку масса блока шестерен линейно пропорциональна объему, который, в свою очередь, пропорционален длине блока шестерен, можно сказать, что масса линейно пропорциональна длине блока шестерен. Экспоненциальное снижение длины блока шестерен с изменением угла нутации напрямую приводит к экспоненциальному снижению массы блока шестерен, следовательно, и снижение критического веса от общего веса редуктора.

Радиальные расстояния можно рассматривать как постоянную величину во время изменения угла нутации, это связано с их значением, полностью привязанным к модулю и количеству зубьев блока шестерен, которые являются постоянными величинами в этой работе.

Еще одна важная особенность заключается в том, что общая длина блока шестерен оказывается отрицательной при приближении к $\theta = 12^\circ$. Это связано с инверсией делительных конусов, где передачи переключается из положения редуктора в положение привода Humpage [18]. За пределами угла нутации $\theta = 12^\circ$ передача больше не требует внутренних делительных конусов, а требует внешних. Можно увидеть это на рис. 3, где делительные конусы блока шестерен показаны при углах нутации θ в диапазоне от 2° до 20° .

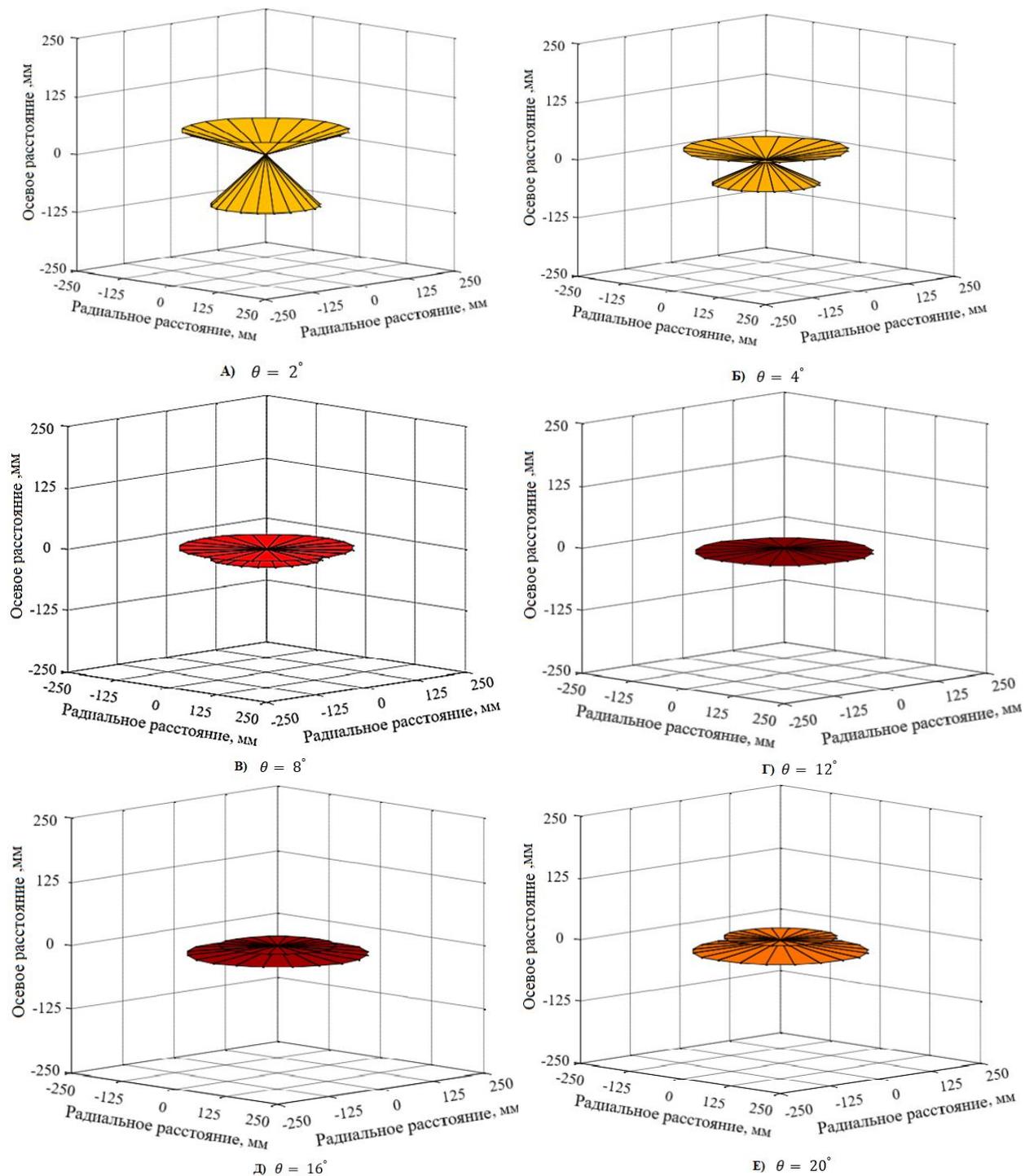


Рис. 3. Изменение размеров блока шестерен в зависимости от угла нутации θ : А) при $\theta = 2^\circ$; Б) при $\theta = 4^\circ$; В) при $\theta = 8^\circ$; Г) при $\theta = 12^\circ$; Д) при $\theta = 16^\circ$; Е) при $\theta = 20^\circ$

Fig. 3. Change of the gear block size depending on nutation angle θ : А) at $\theta = 2^\circ$; Б) at $\theta = 4^\circ$; В) at $\theta = 8^\circ$; Г) at $\theta = 12^\circ$; Д) at $\theta = 16^\circ$; Е) at $\theta = 20^\circ$

При различных углах нутации блок шестерен первоначально направлен вниз в отрицательном осевом направлении. По мере увеличения угла нутации можно увидеть, как оба делительных конуса стремительно сжимаются по направлению к центральной точке делительных конусов (центр нутации) и примерно при $\theta \cong 12^\circ$ конусы сливаются. За этой точкой делительные конусы блока шестерен теперь перевернуты

и направлены вверх или положительны по осевой длине. Инверсия делительных конусов резко меняет работу передачи, а также ее геометрию.

Угол нутации θ также имеет большое влияние на скорость нутации и абсолютную угловую скорость блока шестерен. При углах нутации в диапазоне $\theta \leq 12^\circ$ и частоте вращения ведущего вала $n_{in} = 3000$ об/мин скорость нутации и абсолютная

угловая скорость блока шестерен могут быть найдены с использованием уравнений (2), (3). На рис. 4 показаны компоненты угловых скоростей при изменении угла нутации в пределах $\theta = [1^\circ - 12^\circ]$.

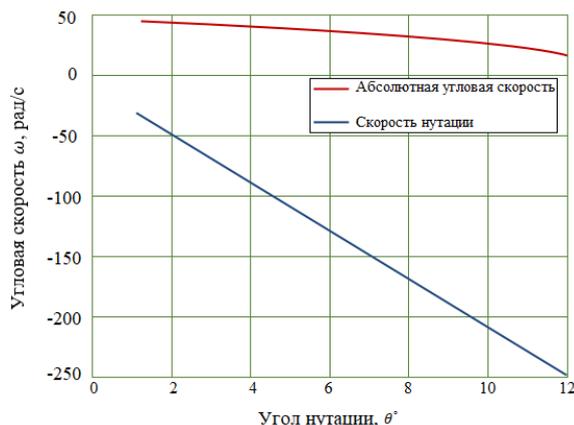


Рис. 4. Изменение угловых скоростей блока шестерен в зависимости от угла нутации θ

Fig. 4. Change of angular velocities gear block depending on nutation angle θ

Из рис. 4 можно заметить, что абсолютная угловая скорость блока шестерен показывает меньшую чувствительность к изменению угла нутации θ , в то время как модуль скорости нутации увеличивается непосредственно с увеличением угла нутации θ . При низких углах нутации θ обе скорости будут ближе друг к другу. Важно учитывать эти скорости при динамическом исследовании, поскольку они играют решаю-

щую роль в понимании взаимосвязи между динамическим моментом и углом нутации θ [19].

Заключение

Таким образом, в данной работе была рассмотрена проблема создания волнового торцевого кинематического редуктора с малыми габаритами, что позволяет размещать его вместе с поршневыми насосами в труднодоступных местах при добычи высоковязкой нефти в экстремальных условиях. Были определены передаточное отношение редуктора методом Виллиса и аналитическим методом и зависимость размеров блока шестерен от угла нутации θ . Кинематика волнового торцевого кинематического редуктора, обладающая большой компактностью, позволяет получать большие передаточные отношения. И, более того, волновой торцевой кинематический редуктор не требует выполнения условий равенства межосевых расстояний, что расширяет область их оптимального конструирования [11, 20].

Установлено, что при увеличении угла нутации θ вес блока шестерен снижается, а следовательно, и общий вес редуктора. Нужно заметить, что длина блока шестерен оказывается отрицательной при приближении к углу нутации $\theta = 12^\circ$, поэтому волновой торцевой кинематический редуктор не рекомендуется использовать при углах нутации $\theta \geq 12^\circ$. Также важно расширить эффект этого изменения на статическую нагрузку блока шестерен и на количество зубьев в зацеплении, которое увеличивает нагрузочную способность волнового торцевого кинематического редуктора [21, 22].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Simanzhenkov V., Raphael I. Crude oil chemistry. – Florida: CRC Press, 2003. – 402 p.
2. Speight J.G. Heavy oil recovery and upgrading. – Oxford: Gulf Professional Publishing, 2019. – 839 p.
3. Скважинные насосные установки для добычи нефти / В.Н. Ивановский, В.И. Дарищев, А.А. Сабиров, В.С. Каштанов, С.С. Пекин. – М.: ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2002. – 824 с.
4. Guha P.K. Hydraulic Pumps & Motors and their Applications. – Indianapolis: Dog Ear Publ., 2018. – 222 p.
5. Lynwander P. Gear drive systems: design and application. – Florida: CRC Press, 2019. – 432 p.
6. Advanced manufacturing and processing technology / Eds. C. Prakash, S. Singh, J.P. Davim. – Florida: CRC Press, 2020. – 244 p.
7. Litvin F.L., Fuentes A. Gear geometry and applied theory. 2nd ed. – New York: Cambridge University Press, 2004. – 800 p.
8. Litvin F.L., Fuentes A., Howkins M. Design, generation and TCA of new type of asymmetric face-gear drive with modified geometry // Computer methods in applied mechanics and engineering. – 2001. – V. 190 (43–44). – P. 5837–5865.
9. Vullo V. Gears. V. 1: Geometric and kinematic design. – Cham: Springer International Publishing A&G, 2020. – V. 1. – 844 p.
10. Cervantes Sánchez J.J., Rico Martínez J.M., Panduro Calvario C. A general and systematic framework for the kinematic analysis of complex gear systems // Meccanica. – 2012. – V. 47. – № 1. – P. 3–21.
11. Jасем М.А., Крауинш П.Я. Kinematical analysis of the nutation speed reducer // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing. – 2019. – P. 012022.
12. Джасем М., Крауинш П.Я. Волновой торцевой кинематический редуктор для поршневых насосов при добыче тяжелой нефти // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 2. – С. 17–25.
13. Jасем М., Крауинш П.Я. Analysis of the Stress-strain State (SSS) under static load of nutation speed reducer // Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems. – 2019. – V. 11. – № 5-S1. – P. 137–141.
14. Журавлев В.Ф. Основы теоретической механики. 2-е изд. – М.: Физматлит, 2001. – 320 с.
15. Ефременков Е.А., Ан И-Кан. Определение радиусов кривизны циклоидальных профилей с использованием метода Эйлера-Савари // Вестник машиностроения. – 2010. – № 10. – С. 47–50.
16. Алюшин Ю.А., Вержанский П.М. Кинематика планетарных передач // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – Т. 16. – № 12. – С. 463–473.
17. Lin C., He C., Hu Y. Analysis on the kinematical characteristics of compound motion curve-face gear pair // Mechanism and Machine Theory. – 2018. – V. 128. – P. 298–313.
18. Toothed gearing: Patent 767234A USA. Fil. 12.1.1990; Publ. 06.11.1901.
19. Saribay Z.B., Bill R.C. Design analysis of pericyclic mechanical transmission system // Mechanism and Machine Theory. – 2013. – V. 61. – P. 102–122.
20. Ефременков Е.А., Ефременкова С.К. Проектирование тяжело нагруженной циклоидальной передачи со свободной обоймой из условия контактной прочности // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 11. – С. 182–188.
21. Tooth contact analysis with latent error of double circular-arc spiral bevel gears for industrial robot joint nutation drive / Z. Lin, L. Yao, J. Zhang, T. Su, K. Chen // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2020. – V. 42 (1). – P. 1–12.
22. Айрапетов Э.Л. Совершенствование методов расчета нагруженности и прочности передач зацеплением // Техника машиностроения. – 2001. – № 2. – С. 8–34.

Поступила 04.06.2022 г.

Информация об авторах

Джасем М.А., ассистент отделения общетехнических дисциплин Школы базовой инженерной подготовки Национального исследовательского Томского политехнического университета; ассистент Департамента механического проектирования и производственного Факультета машиностроения и электротехники Университета Аль-Фурат.

Крауиньш П.Я., доктор технических наук, профессор отделения материаловедения Инженерной школы новых производственных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.833.681

INTRODUCTION OF A WAVE FACE KINEMATIC REDUCER IN PUMPING TECHNOLOGIES FOR THE EXTRACTION OF HIGH-VISCOUS OIL IN EXTREME CONDITIONS

Mohamad A. Jasem^{1,2},
jasemma@tpu.ru

Peter Ya. Krauinsh¹,
peterkrau@tpu.ru

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

² Al-Furat University,
7, University street, Deir ez-Zor, Syria.

The relevance of the research is caused by the need of ensuring small overall dimensions and mass of gear speed reducers, which allows them to be placed together with piston pumps in hard-to-reach places and extreme conditions for the extraction of high-viscous oil. The ratio of the mass of the gear speed reducer to the nominal torque at the output shaft is the main criterion of the technical level of gear speed reducer. Therefore, the need to create new types of gear speed reducers with small dimensions and mass is very relevant.

The main aim of the research is to determine the transmission ratio of the wave face kinematic reducer and the dependence of the gear block size and its angular velocity on a nutation angle θ .

Objects: wave face kinematic reducer as an integral part of piston pumps during high-viscous oil mining in extreme conditions.

Methods: Willis method, analytical method, numerical methods for solving systems of linear equations, the theory of mechanisms and machines and theory of gearing.

Results. The paper considers the problem of creating a wave face kinematic reducer with small dimensions, which allows it to be placed together with piston pumps in hard-to-reach places and extreme conditions for the extraction of high-viscous oil. The transmission ratio of the speed reducer was determined by two methods (Willis method and analytical method) and the dependence of the gear block size on the nutation angle θ . In addition, the upper limit value of the nutation angle was determined, in which the reducer works stable. It is important to note that, the wave face kinematic reducer does not require the fulfillment of the conditions for the equality of the center distances, which expands its optimal design. In addition, its kinematics does not impose restrictions on the choice of gear modules or tooth pitch, which expands the set of possible ratios of the gear teeth number and the range of transmission ratios.

Key words:

Heavy high-viscous oil, piston pump, mechanized method of oil production, wave face kinematic reducer, gear ratio, nutation angle.

REFERENCES

1. Simanzhenkov V., Raphael I. *Crude oil chemistry*. Florida, CRC Press, 2003. 402 p.
2. Speight J.G. *Heavy oil recovery and upgrading*. Oxford, Gulf Professional Publishing, 2019. 839 p.
3. Ivanovsky V.N., Darishev V.I., Sabirov A.A., Kashtanov V.S., Pekin S.S. *Skvazhinnnye nasosnye ustanovki dlya dobychi nefi* [Downhole pumping plants for oil production]. Moscow, GUP Publishing House «Oil and Gas» RSU Oil and Gas. n.a. Gubkin, 2002. 824 p.
4. Guha P.K. *Hydraulic Pumps & Motors and their Applications*. Indianapolis, Dog Ear Publ., 2018. 222 p.
5. Lynwander P. *Gear drive systems: design and application*. Florida, CRC Press, 1983. 432 p.
6. Prakash C., Singh S., Davim J.P. *Advanced manufacturing and processing technology*. Florida, CRC Press, 2020. 244 p.
7. Litvin F.L., Fuentes A. *Gear geometry and applied theory*. 2nd ed. New York, Cambridge University Press, 2004. 800 p.
8. Litvin F.L., Fuentes A., Howkins M. Design, generation and TCA of new type of asymmetric face-gear drive with modified geometry. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 2001, vol. 190 (43–44), pp. 5837–5865.
9. Vullo V. *Gears: Vol. 1: Geometric and Kinematic Design*. Cham, Springer International Publishing A&G, 2020. Vol. 1, 844 p.
10. Cervantes Sánchez J.J., Rico Martínez J.M., Panduro Calvario C. A general and systematic framework for the kinematic analysis of complex gear systems. *Meccanica*, 2012, vol. 47, no. 1, pp. 3–21.
11. Jasem M.A., Krauinsh P.Y. Kinematical analysis of the nutation speed reducer. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2019, 012022 p.
12. Jassem M., Krauinsh P.Ya. Wave face kinematic reducer for piston pumps during extraction of heavy oil. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 2, pp. 17–25. In Rus.
13. Jasem M., Krauinsh P.Y. Analysis of the Stress-strain State (SSS) under static load of nutation speed reducer. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*, 2019, vol. 11, no. 5-SI, pp. 137–141.
14. Zhuravlev V. *Osnovy teoreticheskoy mekhaniki* [The auxiliary bases of theoretical mechanics]. 2nd ed. Moscow, Fizmatlit Publ., 2001. 320 p.
15. Efremkov E.A., An I-Kan. Euler-Savari determination of radii of curvature of cycloid profiles. *Russian Engineering Research*, 2010, vol. 30, no. 10, pp. 1001–1004.
16. Alushin Yu. A., Verzhansky P. M. Kinematics of planetary gears. *Mountain Information and Analytical Bulletin*, 2009. vol. 16, no. 12. pp. 463–473. In Rus.
17. Lin C., He C., Hu Y. Analysis on the kinematical characteristics of compound motion curve-face gear pair. *Mechanism and Machine Theory*, 2018, vol. 128, pp. 298–313.
18. Humpage T., Herbert I.J. *Toothed gearing*. Cox. Patent 767234A USA, 1901.
19. Saribay Z.B., Bill R.C. Design analysis of Pericyclic Mechanical Transmission system. *Mechanism and Machine Theory*, 2013, vol. 61, pp. 102–122.
20. Efremkov E.A., Efremkova S.K. Design of heavily loaded cycloidal transmission with free cage based on contact strength. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 11, pp. 182–188. In Rus.
21. Lin Z., Yao L., Zhang J., Su T., Chen K. Tooth contact analysis with latent error of double circular-arc spiral bevel gears for indus-

trial robot joint nutation drive. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2020, vol. 42 (1), pp. 1–12.

22. Ayrapetov E.L. Improving methods for calculating loading and gearing strength. *Q: Engineering Engineering*, 2001, no. 2, pp. 8–34. In Rus.

Received: 4 June 2022.

Information about the authors

Mohamad A. Jasem, assistant, National Research Tomsk Polytechnic University; assistant, Al-Furat University, Deir ez-Zor.

Peter Ya. Krauinsh, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 552.58:551.732.2:553.98

ЛИТОЛОГО-ФАЦИАЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И КОЛЛЕКТОРСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ ОСИНСКОГО ПРОДУКТИВНОГО ГОРИЗОНТА БОЛЬШЕТИРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ВОСТОЧНАЯ СИБИРЬ)

Вараксина Ирина Валерьевна¹,
varaksinaIV@ipgg.sbras.ru

Иванова Наталья Алексеевна²,
ivanovana@sniiggims.ru

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука
Сибирского отделения Российской академии наук,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

² Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья,
Россия, 630091, г. Новосибирск, Красный пр., 67.

Актуальность. Восточная Сибирь является районом с большими сырьевыми ресурсами, играющим важнейшую роль в развитии нефтегазового комплекса России. Главным объектом поисково-разведочных работ на этой территории на протяжении долгого времени оставался терригенный венд. Однако в последние десятилетия была доказана промышленная нефтегазоносность венд-нижнекембрийского карбонатного комплекса, который отличается сложным строением и сильной изменчивостью коллекторских свойств. Поэтому для оптимальной разработки приуроченных к нему месторождений необходимо детальное изучение литологических факторов формирования карбонатных коллекторов.

Объект: карбонатные отложения осинского продуктивного горизонта нижнего кембрия, вскрытые глубоким бурением на территории Большекетирского месторождения.

Цель: на основе литолого-фациального анализа выделить уровни с наилучшими коллекторскими свойствами.

Методы: минералого-петрографическое изучение кернового материала и типизация отложений; фациальный анализ литологических типов (литотипов) пород; корреляция фильтрационно-ёмкостных характеристик с различными литотипами.

Результаты. Установлено, что осинский горизонт характеризуется неоднородным строением, обусловленным периодической сменой обстановок на мелководном шельфе: от приливно-отливных равнин и себх до баровых отмелей и биогермных построек верхней сублиторали. Показано, что различия в условиях седиментации повлияли на структуру первичного пустотного пространства, но определяющим фактором в формировании фильтрационно-ёмкостных свойств стали постседиментационные процессы, роль которых была неоднозначна. Выяснено, что вторичная минерализация пустот практически уничтожила коллекторский потенциал баровых и биогермных отложений, обладающих наиболее высокой первичной пористостью, а уровень развития наиболее высокоемкого коллектора оказался приурочен к интенсивно доломитизированным отложениям литоральной зоны.

Ключевые слова:

Восточная Сибирь, осинский продуктивный горизонт, литология, коллекторы, нижний кембрий.

Введение

Восточная Сибирь на сегодняшний день является наиболее перспективным регионом для наращивания сырьевой базы России, поскольку обладает значительным объемом запасов углеводородов [1–4 и др.]. Наибольшим ресурсным потенциалом характеризуется крупнейшая положительная структура Сибирской платформы – Непско-Ботуобинская антеклиза (НБА), на территории которой открыт целый ряд нефтегазовых месторождений – от мелких до гигантских [5–7]. Большая часть запасов углеводородов в её пределах приурочена к терригенным отложениям венда, поэтому длительное время поисково-разведочные работы были связаны только с ними. Однако в последние десятилетия исследование района НБА сейсморазведкой и глубоким бурением привело к тому, что в качестве нового объекта для прироста запасов стали рассматриваться низкопроницаемые венд-нижнекембрийские карбонатные толщи, промышленная нефтегазоносность которых была доказана открытием залежей на Большекетирском, Марковском, Верхнечонском, Талаканском и других месторождениях [8–11 и др.]. Следует отметить, что, в отличие от терригенных коллекторов,

продуктивные горизонты в карбонатных толщах характеризуются сложным литологическим строением, сильной изменчивостью фильтрационно-ёмкостных свойств (ФЕС) и нестабильностью притоков углеводородов, что значительно осложняет разработку выявленных месторождений. Вследствие этого для более точной оценки качества резервуаров требуется детальное изучение литологических особенностей и условий формирования пород-коллекторов.

Стратиграфическая позиция

Большекетирское нефтяное месторождение расположено в южной части НБА. Перспективы этого района в значительной мере связаны с осинским резервуаром нижнего кембрия. Согласно схеме фациального районирования кембрия, месторождение приурочено к Ангаро-Непскому фациальному району (рис. 1).

В основании нижнего кембрия здесь залегает соленосно-карбонатный усольский региональный горизонт, разделенный на три подгоризонта. По стратиграфическому объему он соответствует усольской свите, в составе которой также выделяются три подпиты (рис. 2).

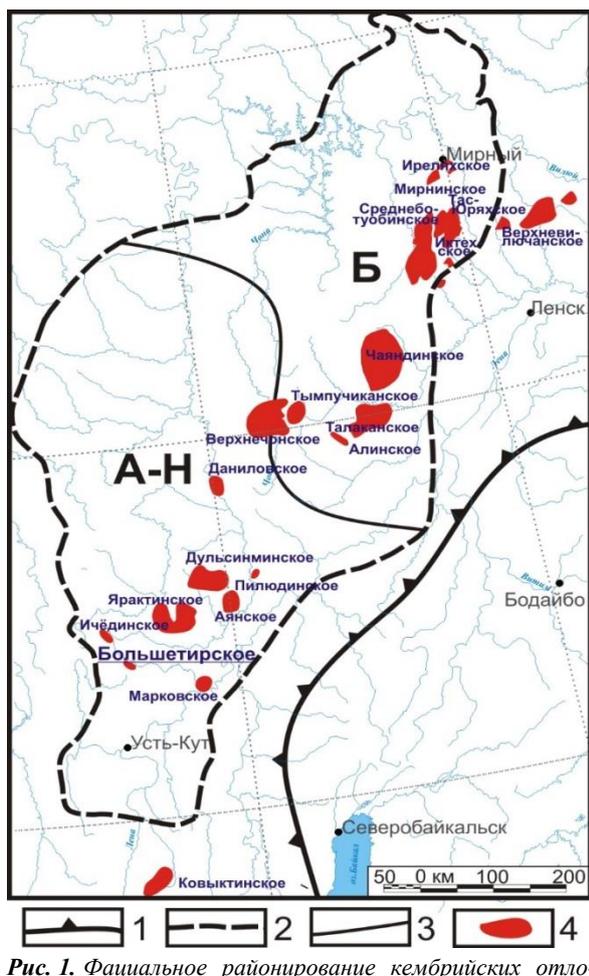


Рис. 1. Фациальное районирование кембрийских отложений Непско-Ботуобинской антеклизы [12]. Условные обозначения: 1–3 – границы: 1 – Сиберской платформы, 2 – Непско-Ботуобинской антеклизы, 3 – фациальных районов; 4 – месторождения нефти и газа. Фациальные районы: Б – Ботуобинский, А-Н – Ангаро-Непский

Fig. 1. Facies zoning of the Cambrian deposits of the Nepa-Botuoba anteclise [12]. Legend: 1–3 – borders: 1 – Siberian platform, 2 – Nepa-Botuoba anteclise, 3 – facies areas; 4 – oil and gas fields. Facies areas: B – Botuoba, A-N – Angaro-Nepa

Усольская свита совместно с бельской, булайской, ангарской и ливинцевской свитами входит в состав кембрийского солевого структурного комплекса. Её нижняя и верхняя подсвиты отличаются галогенно-карбонатным составом с преобладанием каменной соли и прослоями глинисто-ангидритистых доломитов. Средняя подсвита представлена преимущественно карбонатными породами и, согласно общепринятому мнению, в полном объеме соответствует осинскому продуктивному горизонту [7, 12, 13 и др.]. Нижняя граница горизонта проводится по кровле солей нижней подсвиты, а верхняя приурочена к подошве нижнего пласта каменной соли верхней подсвиты. В кровле осинского горизонта предполагается региональный перерыв, который выявлен пачковой корреляцией разрезов и хорошо фиксируется по резкому снижению значений гамма-каротажа (ГК) и увеличению значений нейтронного каротажа НГК [12].

Система	Отдел				Ангаро-Непский район	
	Ярус					
Кембрий	Верхний				Непская зона	
	Средний				Илгинская свита 15-318 м	
Кембрий	Средний				Верхоленская свита 318-764 м	
	Нижний				Литвинцевская свита	
Кембрий	Нижний				Ангарская свита	
	Нижний				Булайская свита	
Кембрий	Нижний				Бельская свита	
	Нижний				Усольская свита	
Кембрий	Нижний				Тэтэрская свита	
	Нижний					
Венд						
Н-Д	Томмотский	Усольский	Осинский			
Данил.	Даниловский	Усольский	Осинский			
Юрях-ский	Юряхский	Осинский				
Толбач.	Толбачанский	Усольский	Осинский			
Ур.	Урицкий	Усольский	Осинский			
Ол.	Олекминский	Усольский	Осинский			
Н.	Наманский	Усольский	Осинский			
Зеледе-ев.	Зеледеевский	Усольский	Осинский			

Рис. 2. Стратиграфическая схема кембрия Непской зоны Ангаро-Ленского фациального района [12]. Условные обозначения: 1–3 – породы: 1 – глинистые, 2 – галогенно-карбонатные, 3 – карбонатные; 4 – отсутствие отложений; 5 – размыв. Горизонты: Данил. – Даниловский, Эл. – Эльганский, Толбач. – Толбачанский, Ур. – Урицкий, Ол. – Олекминский, Н. – Наманский, Зеледе-ев. – Зеледеевский

Fig. 2. Stratigraphic scheme of the Cambrian of the Nepa zone of the Angara-Lena facies region [12]. Legend: 1–3 – rocks: 1 – argillite, 2 – halogen-carbonate, 3 – carbonate; 4 – no deposits; 5 – washout. Horizons: Данил. – Danilov, Эл. – Elgyan, Толбач. – Tolbachan, Ур. – Uritsk, Ол. – Olekma, Н. – Naman, Зеледе-ев. – Zeledeev

Строение разреза и литолого-фациальная характеристика

В основу работы положены результаты литологических исследований осинского продуктивного горизонта, полученные при бурении одной из скважин Большешетирского месторождения, которая отличается наиболее полным (около 90 %) отбором кернового материала.

В изученном разрезе осинский горизонт мощностью 103 м согласно залегает на соленосных отложениях нижнеусольской подсвиты (рис. 3). В его основании выделяется маломощная (5 м) пачка 1, не представленная керном, но, судя по данным ГИС и резуль-

татам бурения других разрезов, сложенная глинистыми, нередко ангидритистыми доломитами. Данная пачка прослеживается на всей территории Ангаро-Непской фациальной зоны, отличаясь высокими значениями ГК и низкими показателями НГК [12].

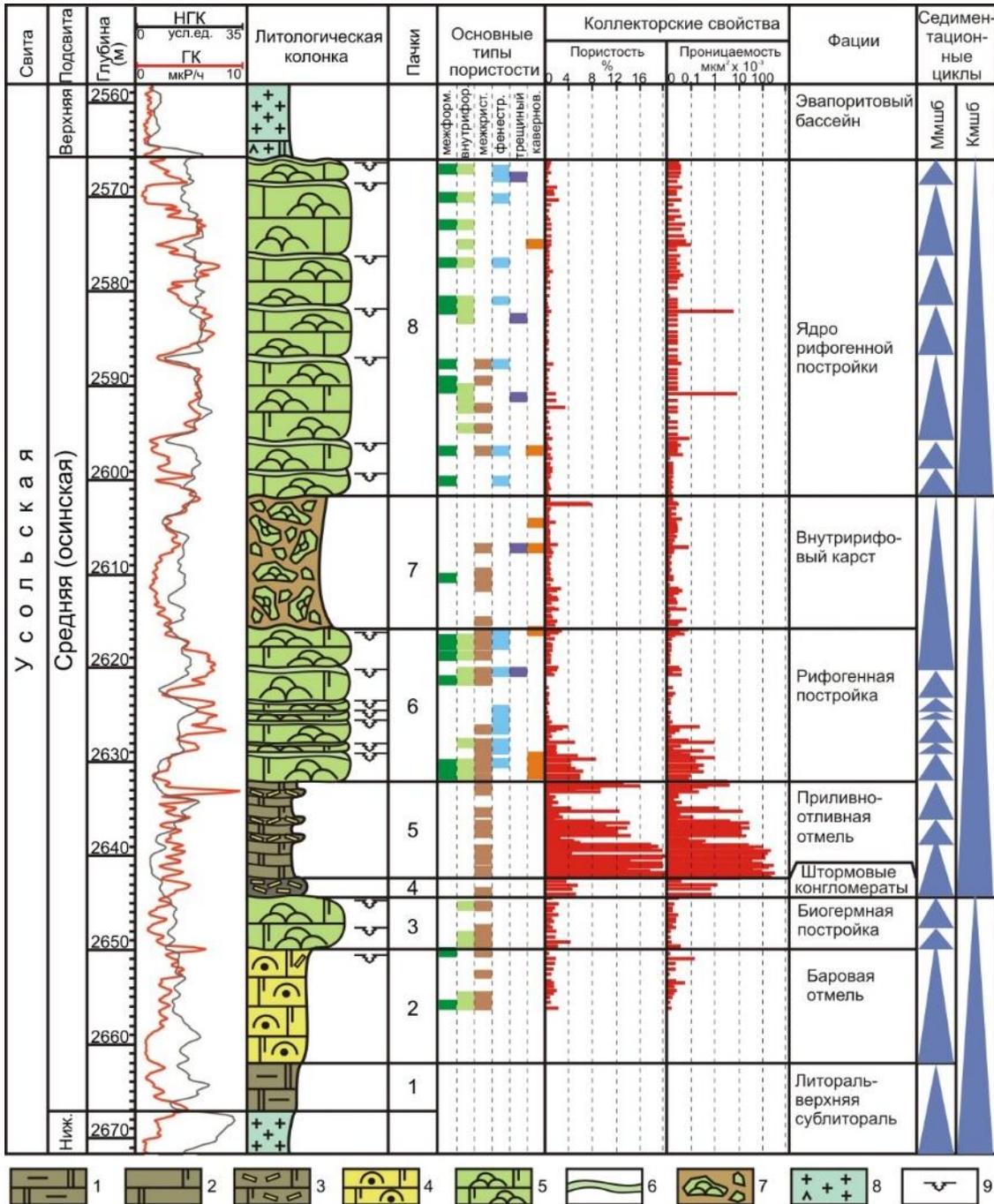


Рис. 3. Литолого-фациальный состав и коллекторские свойства осинского горизонта. Условные обозначения: 1 – глинисто-доломитовые мадстоуны, 2 – известково-доломитовые вакстоуны-пакстоуны-грейнстоуны, 3 – известково-доломитовые интракластические пакстоуны-рудстоуны, 4 – доломито-известковые грейнстоуны, 5 – доломито-известковые байндстоуны-бафлстоуны, 6 – известково-доломитовые строматолитовые байндстоуны, 7 – карстовая брекчия, 8 – соляные породы, 9 – субаэральная экспозиция. Выделение литотипов основано на классификации [14, 15]

Fig. 3. Lithofacies composition and reservoir properties of the Osinsky horizon. Legend: 1 – clay-dolomite mudstones, 2 – calcareous-dolomite wackstones-packstones-grainstones, 3 – calcareous-dolomitic intraclastic packstones-rudstones, 4 – dolomite-calcareous grainstones, 5 – dolomite-calcareous bindstones-bufflstones, 6 – calcareous-dolomitic stromatolite bindstones, 7 – karst breccia, 8 – salt rocks, 9 – subaerial exposition. The lithotypes were identified according to the classification [14, 15]

В вышележащей пачке 2 доминируют доломито-известковые грейнстоуны, коричневые и темно-коричневые, пологослоистые, пористо-кавернозные, с редкими желваками ангидрита. Породы сложены микрофитолитами группы катаграфий, пространство между которыми заполнено морским спаритовым цементом (рис. 4, а). Доломит, содержание которого варьирует от 10 до 65 %, развивается как по цементу, так и по микрофитолитам. В верхней части пачки появляются интракласты катаграфиевых пород гравийно-галечной размерности. Отсутствие микрофитового матрикса, относительно хорошая сортировка и тренд на увеличение размеров зерен вверх по разрезу позволяют рассматривать эти породы как образования достаточно крупной (мощностью 12 м) баровой отмели. В кровле данной постройки наблюдается седиментационное брекчирование слабо литифицированного осадка с формированием прослоев плоскогалечных конгломератов, а также широкое развитие желвакового ангидрита, что свидетельствует о её выходе в приповерхностную супралиторальную зону.

Следующая пачка 3 (мощностью 5,15 м) представлена микробиально-слоистыми известняками со структурами бафлстоун и байндстоун, в образовании которых основную роль играли цианобактериальные сообщества группы Renalcis (рис. 4, б), сформировавшие постройку биогермного типа. Породы коричневатой окраски, слабо волнистослоистые, с обильными фенестральными структурами, доломитизированные. В подошве залегает маломощный (15 см) прослой темно-серых глинистых известняков с резкой нижней границей. В строении постройки зафиксировано несколько уровней кратковременных экспозиций (рис. 3), на которых наблюдаются интенсивная доломитизация, сульфатизация, каверны и трещины усыхания, выполненные галитом, а также небольшие карстовые «карманы», заполненные обломками доломито-ангидритовых пород.

Пачка 4 (мощностью 2,2 м) характеризуется четкими, вероятно, эрозийными границами и сложена доломитовыми галечными конгломератами (интракластическими рудстоунами). Породы темно-коричневые косослоистые, участками с нечетко выраженным градиционным распределением обломков, содержат плоские (длиной от 1 до 5 см) интракласты микрофитовых и микрофитолитовых доломитов, погруженных в сильно битуминизированный глинисто-доломитовый матрикс (рис. 4, в). Судя по текстурам, значительному содержанию матрикса, разной степени окатанности и плохой сортировке обломочного материала накопление этих отложений происходило в заиленных литоральных каналах, активизирующихся в периоды штормовых событий [16]. Доломитоглинистый осадок, обогащенный органическим веществом, видимо, поступал с участков с затрудненным водообменом (мелководных лагун), а плоскогалечные интракласты являлись продуктами штормового разрушения баровых отмелей и биогермов, разделяющих эти депрессии. В нижней части обломки более крупные, с черепичной укладкой, характерной для направленных потоков. В верхней части наблюдается

уменьшение зернистости, более хаотичная ориентировка интракластов, а также текстуры пластичного смятия и оползания, что свидетельствует о постепенном уменьшении штормового воздействия.

В составе пачки 5 (мощностью 12,5 м) преобладают доломиты серо-коричневые известковистые с реликтами мелкозернистой структуры, которая в значительной степени утрачена в результате интенсивной доломитизации. Первичный состав зерен и вмещающей массы определить затруднительно, но по реликтам можно предположить, что это интракластовые и/или микрофитолито-интракластовые пакстоуны-грейнстоуны, переслаивающиеся с глинисто-микрофитовыми вакстоунами-мадстоунами. Пачка подразделяется на элементарные циклы обмеления, нижние элементы которых характеризуются выдержанной тонкой субгоризонтальной и пологонаклонной слоистостью (рис. 4, г). В средних частях наблюдается нарушение слоистости за счет пластичной деформации и структур внедрения осадка, а также трещин усыхания и брекчирования слабо литифицированных слоев. В верхних элементах седиментационное брекчирование более выражено, присутствуют прослои крупноинтракластических пород и многочисленные включения ангидрита. В прикровельном цикле наряду с интракластитами встречаются минипостройки желваковых строматолитов диаметром 10–15 см. Наличие таких циклов, отражающих переход от нижней литорали до супралиторали, позволяет диагностировать эти отложения как фацию приливно-отливной равнины [17], в пределах которой развивались мелкие барово-отмельные тела, периодически подвергавшиеся экспозиции, о чем свидетельствуют трещины усыхания и синседиментационная сульфатизация. Эпизодически происходила активизация приливов и/или мелких штормовых событий с образованием прослоев конгломератов и конглобрекчий.

Пачка 6 (мощностью 16 м) сложена серовато-коричневыми доломитизированными и засоленными микробиальными известняками, формирующими серию мелкомасштабных (мощностью 1–2 м) биогермов. Основную роль в них играют колонии микробных организмов со структурами Botomaella и Renalcis (рис. 4, д), в меньшей степени развиты мелкостолбчатые и желваковые строматолиты. В кровле повсеместно залегают пластовые строматолиты. Такое распределение цианобактериальных образований характерно для сукцессионного ряда простых микробиальных построек пластово-линзовидной формы [18], каждая из которых на завершающей стадии развития достигала зоны крайнего мелководья, что подтверждается появлением прослоев интракластиков, доломитизацией, выщелачиванием и галитизацией пустот растворения в прикровельных частях. Эти последовательно нарастающие друг на друга биогермы видимой толщины от 0,5–0,7 до 1,7 м сформировали достаточно крупную рифогенную постройку.

Пачка 7 (мощностью 14 м) представлена аналогичными биогермными отложениями, в которых фиксируются многочисленные проявления карста. Породы интенсивно разбиты трещинами и полостями

(протяженностью до 30 см) на отдельные блоки с образованием брекчии (рис. 4, е). Стенки каверн инкрустированы кальцитом и доломитом, а центральные части заполнены галитом. Брекчивые обломки угло-

ваты, неориентированные. Карстование рифогенной постройки, по-видимому, было связано с её довольно продолжительным нахождением в субаэральных условиях.

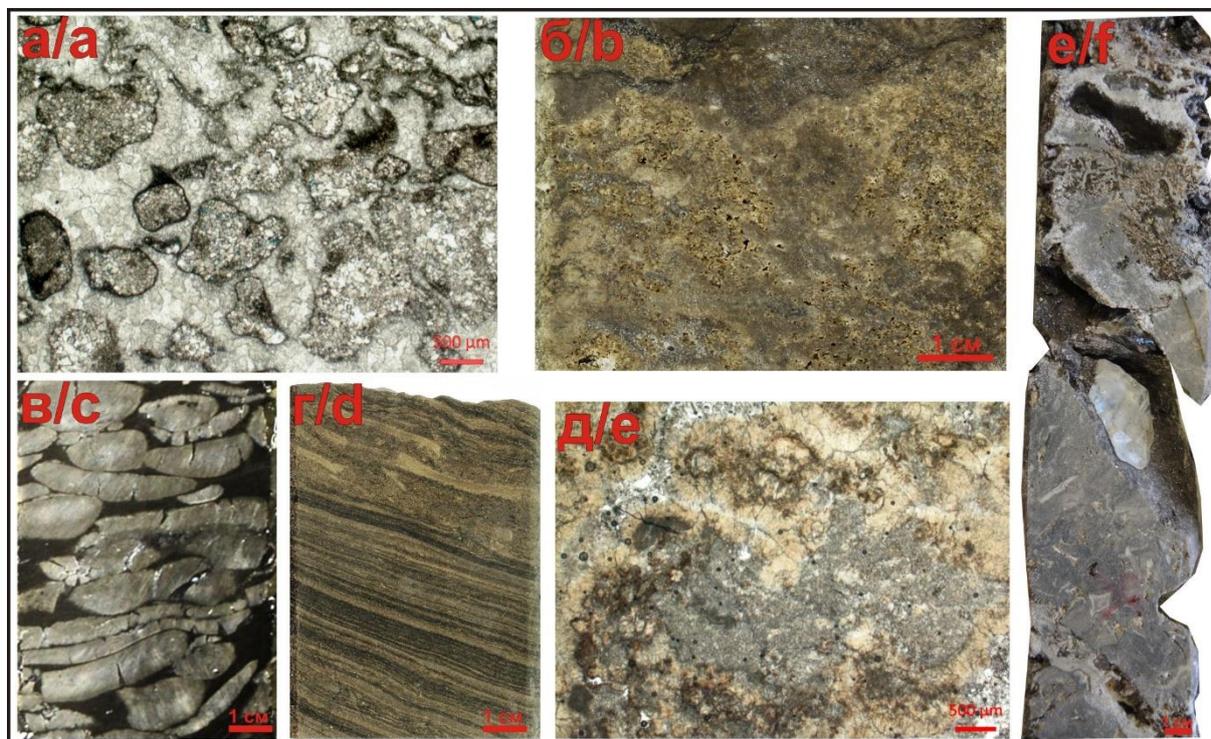


Рис. 4. Основные типы пород: а) перекристаллизованный доломито-известковый микрофитолитовый грейнстоун; б) бафлстоун из колоний *Renalcis*, переходящий в микробально-слоистый байндстоун; в) интракластический рудстоун (плоскогалечный конгломерат); г) фрагмент элементарного цикла обмеления, в котором доломитовый пологослоистый мелкозернистый грейнстоун перекрывается крупноинтракластическим пакстоуном; д) известковый микробальный бафлстоун-байндстоун, сложенный шаровидными колониями *Renalcis*; е) карстовая брекчия

Fig. 4. The main types of rocks: a) recrystallized dolomite-calcareous microphytolithic grainstone; b) bufflestone from *Renalcis* colonies to microbially layered bindstone; c) intraclastic rudstone (flat-pebble conglomerate); d) fragment of the elementary shoaling cycle, in which dolomitic gently stratified fine-grained grainstone is overlain by coarse intraclastic packstone; e) calcareous microbial bufflestone-bindstone, composed of spherical colonies of *Renalcis*; f) karst breccia

Во время накопления пачки 8 развитие рифа возобновилось, и на закарстованной поверхности сформировался биогермный комплекс из массивных микробальных известняков мощностью 36,15 м, фациальная принадлежность которого, вероятно, соответствует ядру рифогенной постройки. Рифогенный массив состоит из последовательно нарастающих друг на друга биогермов (мощностью от 2 до 6 м) со следами субаэральной экспозиции в кровельных частях, состав и строение которых аналогичны нижележащим (пачка 6). Биогермные отложения завершают разрез осинского горизонта и перекрываются каменными солями верхнеусольской подсвиты.

На основе проведенного литолого-фациального анализа можно сделать вывод, что осадконакопление в среднеусольское время в изученном районе происходило в пределах мелководного карбонатного шельфа в условиях, благоприятных для широкого развития микробальных сообществ. На начальном этапе формирования осинского горизонта в результате общей

региональной трансгрессии нижнеусольские соленосные отложения мелководной изолированной лагуны сменились нормально-морскими условиями верхней сублиторали, которую стали заселять микробальные организмы. Постепенное повышение относительного уровня моря (ОУМ) и относительно высокий энергетический режим способствовали образованию на этом участке шельфа относительно крупной баровой отмели, на которой при максимальном уровне моря стала формироваться микробальная постройка биогермного типа. Недостаточность аккомодационного пространства в период высокого стояния уровня моря приводила к периодическому выходу биогермов в субаэральные условия даже при незначительных его колебаниях. Понижение ОУМ в последующем привело к сдвигу седиментации в приливно-отливную зону. При очередном углублении шельфа вновь восстановились нормально-морские условия мелководной сублиторали, что благоприятствовало росту микробальных построек, сформировавших довольно круп-

ный массив, который эпизодически подвергался кратковременному осушению. На определенном этапе в результате резкого падения уровня моря развитие рифогенного комплекса было прервано и последовал достаточно продолжительный период субазальной экспозиции, сопровождающийся карстовыми процессами. Последующая относительно быстрая трансгрессия привела к затоплению шельфа и восстановлению рифообразования. По мере заполнения аккомодационного пространства формирование рифогенного массива завершилось и на изолированном шельфе возобновилось соленакопление.

Постседиментационные изменения и пустотное пространство

Среди постседиментационных процессов, повлиявших на формирование пустот в рассматриваемых отложениях, наибольшее распространение получили доломитизация, перекристаллизация, выщелачивание (в том числе карстование), сульфатизация (ангидритизация) и галитизация. Интенсивность и характер проявления этих преобразований были изменчивы. Противоположные по действию процессы нередко сменяли друг друга, при этом большая часть из них проходила на разных этапах диагенеза.

Доломитизация наиболее активно проявилась в отложениях приливно-отливной зоны и немного слабее в барово-отмельных породах, характеризующихся хорошей первичной пористостью. В микробиальных постройках этот процесс обычно связан с периодами их обмеления [19], поэтому доломитизации подверглись главным образом кровельные части биогермов. Необходимо отметить, что замещение ионов кальция на магний из-за разности молекулярных масс привело к образованию многочисленных межкристаллических пор между новообразованными ромбоэдрическими кристаллами, что характерно для вторичных доломитов [20]. Однако наряду с этим процессом в раннем и позднем диагенезе происходило заполнение доломитом первичных пор и пустот выщелачивания, приводящее к сокращению емкостного пространства.

Перекристаллизация развита повсеместно, но интенсивность её проявления неравномерная, что обусловлено неоднородной структурой пород, слагающих разрез осинского горизонта. Существенного влияния на формирование пористости этот процесс не оказал, за исключением случаев наложения доломитизации и последующей перекристаллизации, приводящих к увеличению размеров межкристаллических пустот на доломитизированных участках.

Выщелачивание с образованием пор и каверн происходило неоднократно. Наиболее активно оно проявлялось в периоды субазальных экспозиций, унаследовано развиваясь по фенестрам, межформенному пространству, синседиментационным трещинам и центральным частям форменных элементов в барово-отмельных и биогермных отложениях. Межкристаллические поры на участках доломитизации также подверглись выщелачиванию, но в значительно меньшей степени.

Процесс сульфатизации в основном был связан с приповерхностным диагенезом, когда под воздействием рассолов происходило заполнение пустот гипсом-ангидритом и изредка метасоматическое замещение кальцита сульфатными минералами. Галитизация также приурочена главным образом к уровням обмеления, причем нередко наблюдается совместная минерализация каверн ангидритом и галитом. Этот факт свидетельствует об аридных условиях с интенсивным испарением, в результате которого существенно повышалась солёность вод, что приводило к практически одновременно осадению сульфатов и галита. Степень засоления зависит от размера пустот и соответственно их генезиса. Анализ показал, что пустоты с диаметром менее 0,2 мм, среди которых доминируют межкристаллические поры, практически не подвержены этому процессу. Более крупные пустоты, образованные преимущественно за счет выщелачивания, частично или полностью цементированы ангидритом и/или галитом.

Таким образом, перекристаллизация, доломитизация и выщелачивание в целом положительно повлияли на формирование пористости. Однако большая часть пустотного пространства была частично или полностью уничтожена вследствие заполнения пор и каверн доломитом, ангидритом и галитом.

Интенсивность проявления вторичных процессов, особенно выщелачивания, в первую очередь зависела от седиментационной пористости. В изученных отложениях широко распространены первичные пустоты, связанные с жизнедеятельностью микробиальных сообществ, которые в дальнейшем в разной степени подверглись унаследованному растворению. Согласно систематике Ф. Чокетта и Л. Прея [21] в осинском горизонте были выделены следующие типы открытой пористости: 1) межформенная (interparticle), как первичная, так и вторичная (выщелачивания), развита между колониями цианобактерий, микрофитолитами и интракластами; 2) внутриформенная (intraparticle), преимущественно вторичная, образована за счет избирательного растворения карбонатных зёрен различного генезиса; 3) фенестральная (fenestral) синседиментационная приурочена в основном к микробиально-пластовым постройкам; 4) межкристаллическая (intercrystal) связана с такими вторичными процессами, как перекристаллизация и доломитизация; 5) каверновая (vuggy) постседиментационная относится к относительно крупным пустотам изометричной формы, возникшим на разных стадиях выщелачивания вышеперечисленных типов, но конкретно какого определить затруднительно; 6) трещинная (fracture) включает различные виды седиментационных и постседиментационных трещин, а также приуроченные к ним пустоты выщелачивания.

Анализ распределения различных типов пустот показал, что в биогермных комплексах получили развитие все типы пористости, в хорошо сортированных баровых грейнстоунах наряду с межкристаллическими пустотами определенный вклад внесли внутри- и межформенные пустоты, а в отложениях литорали остались свободными только межкристаллические поры (рис. 3).

Тем не менее, несмотря на широкий набор пустот различного типа, коллекторский потенциал рифогенных и баровых фаций оказался низким. Пористость обычно менее 4 %, проницаемость менее $0,1 \text{ мкм}^2 \times 10^{-3}$ (рис. 3). С одной стороны, микробильные и зернистые карбонатные породы отличались высокой первичной пористостью, поэтому в них активно шёл процесс растворения, что способствовало увеличению емкостных свойств. С другой стороны, хорошо развитое пустотное пространство стало благоприятным фактором для фильтрации рассолов и минерализации новообразованных пустот. В результате частичной или полной цементации пор и каверн такими вторичными минералами, как доломит, ангидрит и галит, произошло значительное сокращение открытой пористости и существенное ухудшение проницаемости. Негативные последствия вторичной цементации особенно ярко проявились на уровне развития внутририфового карста, где можно было бы предполагать наличие высокочемкого коллектора. Причем в центральных частях крупных карстовых полостей сохранилось довольно много остаточных открытых пор, однако практически все они оказались изолированными.

Наилучшие коллекторские свойства наблюдаются в сильно доломитизированных отложениях приливно-отливной зоны (рис. 3). Пористость этой пачки (№ 5) довольно высока от 1–5 до 23 % при средних значениях около 10 %. Проницаемость резко меняется от менее 1 до $343 \text{ мкм}^2 \times 10^{-3}$. Свободное пустотное пространство представлено многочисленными межкристаллическими порами треугольной и полигональной форм, размер которых не превышает 0,2 мм, расположенными между ромбоэдрическими кристаллами доломита. В породах также присутствуют более крупные пустоты, образованные в результате выщелачивания по межформенным и межкристаллическим порам, однако практически все они минерализованы галитом и/или ангидритом.

Заключение

Проведенные исследования позволили установить следующее:

1. Осинский горизонт в изученном разрезе характеризуется неоднородным строением, обусловленным периодической сменой обстановок на мелко-

водном шельфе: от приливно-отливных равнин и себх до баровых отмелей и биогермных построек верхней сублиторали. Динамика осадконакопления была неравномерной, с седиментационными паузами различной продолжительности. В разрезе четко выделяются три крупных трансгрессивно-регрессивных цикла, в которых максимумы трансгрессий связаны с формированием биогермных построек, а максимумы регрессий фиксируются по появлению плоскогалечных конгломератов или карста. В составе этих циклов выделяются мелко-масштабные последовательности обмеления, часто со следами субаэральной экспозиции в кровле, отражающие малоамплитудные кратковременные колебания ОУМ (рис. 3).

2. Цикличность осадконакопления и широкое развитие постседиментационных процессов определили сложное строение осинского резервуара. Согласно опубликованным данным уровни высокочемких коллекторов в нём обычно связаны с органогенными постройками [7–12 и др.]. В рассматриваемом разрезе тоже наблюдалось широкое развитие различных типов пустот в биогермных комплексах, особенно на уровне внутририфового палеокарста, однако в результате вторичных изменений их коллекторский потенциал был практически уничтожен. В данном случае определяющую роль в формировании коллектора сыграл процесс доломитового метасоматоза, наиболее интенсивно проявившийся в литоральной пачке, которая обладает наилучшими коллекторскими свойствами.
3. Полученные данные показали весьма неоднозначный характер распределения коллекторов с хорошими ФЭС. Именно с неравномерностью коллекторских свойств связаны многочисленные трудности, возникающие при разработке осинского продуктивного горизонта, что и определяет необходимость детальных литологических исследований. Такие работы, направленные на выяснение условий формирования и распространения пород-коллекторов, позволяют существенно повысить степень достоверности прогноза наиболее перспективных зон.

Работа выполнена в рамках темы FWZZ-2022-0008 Государственной программы ФНИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нефть и газ Восточной Сибири / И.А. Кушмар, Ю.Н. Григоренко, В.В. Ананьев, В.А. Беликин, Е.А. Губина. – СПб.: Изд-во «Недра», 2006. – 102 с.
2. О состоянии и перспективах ресурсной базы углеводородов, геолого-разведочных работ и лицензирования недр Восточной Сибири и Республики Саха (Якутия) / А.С. Ефимов, А.А. Герг, П.Н. Мельников, В.С. Старосельцев, А.А. Вымятин, В.Г. Акимов, И.И. Черепанова, М.В. Бражникова // Геология нефти и газа. – 2012. – № 5. – С. 57–74.
3. Нефтегазовый потенциал России: состояние и перспективы / А.С. Ефимов, А.А. Герг, М.Ю. Смирнов, Е.В. Смирнов, М.В. Бражникова // АТР глазами экспертов (международная экспертиза 2005–2019 гг.). – М., 2019. – С. 136–147.
4. Sustainable development of Russian energy sector: hydrocarbons of Eastern Siberia / I. Filimonova, A. Komarova, V. Nemo,

I. Provornaya // The 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying, Geology and Mining, Ecology and Management. Book of Abstracts. – Albena, Bulgaria, 16–25 August 2020. – С. 777–783.

5. Непско-Ботуобинская антеклизы – новая перспективная область добычи нефти и газа на Востоке СССР / А.С. Анциферов, В.Е. Бакин, В.Н. Воробьев, Т.Я. Гребенкин, Д.И. Дробот, А.М. Зотеев, А.Э. Конторович, А.И. Ларичев, В.Б. Леонтович, М.М. Мандельбаум, В.Д. Матвеев, Н.В. Мельников, Г.А. Обухович, Б.Л. Рыбьяков, В.В. Самсонов, В.С. Старосельцев, В.С. Сурков, А.А. Трофимук, Г.С. Фрадкин, Б.А. Фукс, Н.В. Черский, А.И. Шамаль, Г.Г. Шемин. – Новосибирск: Наука, 1986. – 245 с.
6. Месторождения нефти и газа центральной части Непско-Ботуобинской антеклизы / В.Н. Воробьев, С.А. Моисеев, В.А. Топешко, В.С. Ситников // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2005. – № 7. – С. 4–17.

7. Шемин Г.Г. Геология и перспективы нефтегазоносности венда и нижнего кембрия центральных районов Сибирской платформы (Непско-Ботуобинская, Байкитская ан-теклизы и Кантагская седловина). – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. – 467 с.
8. Возможности открытия новых крупных залежей нефти в главном поясе газонефтеносности Лено-Тунгусской провинции / Н.В. Мельников, А.А. Вымятин, П.Н. Мельников, Е.В. Смирнов // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55. – № 5–6. – С. 701–702.
9. Фомин А.М., Моисеев С.А. Характеристика резервуаров нефти и газа в кембрийских отложениях центральной части Сибирской платформы // XV Международный научный конгресс Интерэкспо ГЕО-Сибирь. – Новосибирск, 2019. – Т. 2. – № 1. – С. 183–191.
10. Никулина М.Ю., Мышевский Н.В., Никулин Е.В. Классические и аномальные объекты, выявленные в результате проведения геолого-разведочных работ на участках ООО «ИНК» // Нефтяное хозяйство. – 2020. – № 9. – С. 26–29.
11. Новый взгляд на старое месторождение: перспективы нефтеносности осинского горизонта Братского месторождения Иркутской области / В.А. Ванин, С.А. Урядов, Е.Е. Боровкова, Ю.Р. Мамеева, В.О. Сафронов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2020. – № 10 (346). – С. 22–27.
12. Мельников Н.В. Венд-кембрийский соленосный бассейн Сибирской платформы. – Новосибирск: СО РАН, 2009. – 148 с.
13. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Кембрий Сибирской платформы / С.С. Сухов, Ю.Я. Шабанов, Т.В. Пегель, С.В. Сараев, Ю.Ф. Филиппов, И.В. Коровников, В.М. Сундуков, А.Б. Федоров, А.И. Варламов, А.С. Ефимов, В.А. Конторович, А.Э. Конторович. – Новосибирск: ИНГТ СО РАН, 2016. – 497 с.
14. Dunham R.J. Classification of carbonate rocks according to depositional texture: Classification of carbonate rocks // AAPG Bulletin. – 1962. – V. 1. – P. 108–121.
15. Embry A.F., Klovan J.E. A late devonian reef tract on northeastern Banks Island Northwest Territories // Bulletin of Canadian Petroleum Geology. – 1971. – V. 19. – № 4. – P. 730–781.
16. Flat-pebble conglomerate: its multiple origins and relationship to metre-scale depositional cycles / P.M. Murow, L. Tice, B. Archuleta, B. Clark, J.F. Taylor, R.L. Ripperdan // Sedimentology. – 2004. – V. 51. – P. 973–996.
17. Shinn E.A. Tidal flat environment // AAPG Bulletin. – 1991. – V. 13. – P. 172–210.
18. Harwood C.L., Sumner D.Y. Origins of microbial microstructures in the Neoproterozoic Beck Spring Dolomite: variations in microbial community and timing of lithification // Journal of Sedimentary Research – 2012. – V. 82. – P. 709–722.
19. Glumac B., Walker K.R. Selective dolomitization of Cambrian microbial carbonate deposits: a key to mechanism and environments of origin // PALAIOS – 1997. – V. 12. – P. 98–110.
20. Warren J. Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations // Earth Science Reviews. – 2000. – V. 52. – № 1/3. – P. 1–81.
21. Choquette Ph.W., Pray L.C. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates // AAPG Bulletin. – 1970. – V. 54. – № 2. – P. 207–250.

Поступила 15.06.2022 г.

Информация об авторах

Вараксина И.В., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории седиментологии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук.

Иванова Н.А., кандидат геолого-минералогических наук, начальник отдела геологии Восточной Сибири, Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья.

UDC 552.58:551.732.2:553.98

LITHOFACIAL CHARACTERISTIC AND PETROLEUM POTENTIAL OF THE OSINSKY PRODUCTIVE HORIZON OF THE BOLSHETIRSK DEPOSIT (EASTERN SIBERIA)

Irina V. Varaksina¹,
varaksinalV@ipgg.sbras.ru

Natalia A. Ivanova²,
ivanovana@sniiggims.ru

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 3, Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

² Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, 67, Krasny avenue, Novosibirsk, 630091, Russia.

The relevance. Eastern Siberia is an area with large hydrocarbon resources that play an important role in the development of the Russian oil and gas complex. The terrigenous Vendian was the main object of prospecting and exploration in this area for a long time. However the commercial oil and gas potential of the Vendian–Lower Cambrian carbonate complex with a complicated structure and intense variability of reservoir properties has been proven in recent decades. In this relation a detailed study of the lithological factors of the formation of carbonate reservoirs is necessary for the optimal development of deposits confined to this complex.

The object: carbonate deposits of the Osinsky productive horizon of the Lower Cambrian, exposed by deep drilling at the Bolshetirsk deposit.

The aim of the research is to identify the levels with the best reservoir properties on the basis of lithofacies analysis.

Methods: mineralogical and petrographic study of core material and typification of sediments; facies analysis of lithological types (lithotypes) of rocks; correlation of reservoir properties with different lithotypes.

Results. It was established that Osinsky horizon is characterized by a heterogeneous structure due to the periodic change of environments on the shallow shelf: from tidal plains and seabeds to shallows and biohermal buildups of the upper sublittoral. It was shown that differences in sedimentation conditions affected the structure of the primary void space. However the post-sedimentation processes became the determining factor in the formation of reservoir properties, but their role was ambiguous. It was found that the secondary mineralization of voids practically destroyed the reservoir potential of bar and bioherm deposits with highest primary porosity. The level of development of the highest-capacity reservoir is confined to the most dolomitized sediments of the littoral zone.

Key words:

Eastern Siberia, Osinsky productive horizon, lithology, reservoirs, Lower Cambrian.

The research was carried out within the subject FWZZ-2022-0008 of the State program of Fundamental Scientific Research.

REFERENCES

- Kushmar I.A., Grigorenko Yu.N., Ananiev V.V., Belinkin V.A., Gubina E.A. *Neft i gaz Vostochnoy Sibiri* [Oil and gas of Eastern Siberia]. Saint Petersburg, Nedra Publ., 2006. 102 p.
- Efimov A.S., Gert A.A., Melnikov P.N., Staroseltsev V.S., Vymyatyn A.A., Akimov V.G., Cherepanova I.I., Brazhnikova M.V. On the state and prospects of hydrocarbon resource base, exploration works and subsurface licensing of Eastern Siberia and the Sakha Republic (Yakutia). *Geology of oil and gas*, 2012, no. 5, pp. 57–74. In Rus.
- Efimov A.S., Gert A.A., Smirnov M.Y., Smirnov E.V., Brazhnikova M.V. Neftegazovyy potencial Rossii: sostoyanie i perspektivy [Oil and gas potential of Russia: state and perspective]. *ATR glazami ekspertov (mezhdunarodnaya ekspertiza 2005–2019 gg.)* [APR views of the experts (International Expertise 2005–2019)]. Moscow, 2019, pp. 136–147.
- Filimonova I., Komarova A., Nemov V., Provornaya I. Sustainable development of Russian energy sector: Hydrocarbons of Eastern Siberia. *The 20th International Multidisciplinary Scientific Geo-Conference Surveying, Geology and Mining, Ecology and Management. Book of Abstracts*. Albena, Bulgaria, 16–25 August 2020, pp. 777–783.
- Antsiferov A.S., Bakin V.E., Vorobev V.N., Grebenkin T.Ya., Drobot D.I., Zoteev A.M., Kontorovich A.E., Larichev A.I., Leontovich V.B., Mandelbaum M.M., Matveev V.D., Melnikov N.V., Obukhovich G.A., Rybyakov B.L., Samsonov V.V., Staroseltsev V.S., Surkov V.S., Trofimuk A.A., Fradkin G.S., Fuks B.A., Cherskiy N.V., Shamal A.I., Shemin G.G. *Nepsko-Botuobinskaya antekliza – novaya perspektivnaya oblast dobychi nefii i gaza na Vostoke SSSR* [Nepa-Botuoba anticline – a new perspective area of oil and gas production in the East of the USSR]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1986. 245 p.
- Vorobyov V.N., Moiseev S.A., Topeshko V.A., Sitnikov V.S. Hydrocarbon fields in the central part of the Nepa-Botuoba anticline. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2005, no. 7, pp. 4–17. In Rus.
- Shemin G.G. *Geologiya i perspektivy neftegazonosnosti venda i nizhnego kembriya tsentralnykh rayonov Sibirskoy platformy (Nepsko-Botuobinskaya, Baykitskaya anteklizy i Katangskaya sedlovina)* [Geology and prospects of Vendian and Lower Cambrian hydrocarbon potential in the central regions of Siberian platform (Nepa-Botuoba, Baikite anticlines and Katanga saddle)]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2007. 467 p.
- Melnikov N.V., Vymyatyn A.A., Melnikov P.N., Smirnov E.V. Predicted new large oil pools in the main petroliferous belt of the Lena-Tunguska province. *Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, no. 5–6, pp. 701–702. In Rus.
- Fomin A.M., Moiseev S.A. Kharakteristika rezervuarov nefii i gaza v kembriyskikh otlozheniyakh tsentralnoy chasti Sibirskoy platformy [Characteristics of oil and gas tanks in Cambrian deposits of the central part of the Siberian Platform]. *XV Mezhdunarodny nauchny kongress Interekspo GEO-Sibir* [XV International Scientific Congress Interexpo GEO-Siberia]. Novosibirsk, 2019. Vol. 2, no. 1, pp. 183–191.
- Nikulina M.Yu., Myshevsky N.V., Nikulin E.V. Classic and anomalous objects identified as a result of geological exploration at the aries of Irkutsk Company. *Oil industry*, 2020, no. 9, pp. 26–29. In Rus.
- Vanin V.A., Uryadov S.A., Borovkova E.E., Mameeva Yu.R., Saffronov V.O. A new look at the old deposit: oil prospects for the Osinsky horizon oil potential of the Bratsk deposit in the Irkutsk

- region, *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2020, no. 10 (346), pp. 22–27. In Rus.
12. Melnikov N.V. *Vend-kembriyskiy solenosny basseyn Sibirskoy platform* [Vendian-Cambrian saline basin of Siberian Platform]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2009. 148 p.
 13. Sukhov S.S., SHabanov Yu.Ya., Pegel T.V., Saraev S.V., Filipov Yu.F., Korovnikov I.V., Sundukov V.M., Fedorov A.B., Varlamov A.I., Efimov A.S., Kontorovich V.A., Kontorovich A.E. *Stratigrafiya neftegazonosnykh basseynov Sibiri. Kembriy Sibirskoy platformy* [Stratigraphy of oil and gas basins of Siberia. Cambrian of Siberian Platform]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2016. 497 p.
 14. Dunham R.J. Classification of carbonate rocks according to depositional texture: Classification of carbonate rocks. *AAPG Bulletin*, 1962, vol. 1, pp. 108–121.
 15. Embry A.F., Klovan J.E. A late devonian reef tract on north-eastern Banks Island Northwest Territories. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 1971, vol. 19, no. 4, pp. 730–781.
 16. Murow P.M., Tice L., Archuleta B., Clark B., Taylor J.F., Ripperdan R.L. Flat-pebble conglomerate: its multiple origins and relationship to metre-scale depositional cycles. *Sedimentology*, 2004, vol. 51, pp. 973–996.
 17. Shinn E.A. Tidal flat environment. *AAPG Bulletin*, 1991, vol. 13, pp. 172–210.
 18. Harwood C.L., Sumner D.Y. Origins of microbial microstructures in the Neoproterozoic Beck Spring Dolomite: variations in microbial community and timing of lithification. *Journal of Sedimentary Research*, 2012, vol. 82, pp. 709–722.
 19. Glumac B., Walker K.R. Selective dolomitization of Cambrian microbial carbonate deposits: a key to mechanism and environments of origin. *PALAIOS*, 1997, vol. 12, pp. 98–110.
 20. Warren J. Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations. *Earth Science Reviews*, 2000, vol. 52, no. 1/3, pp. 1–81.
 21. Choquette Ph.W., Pray L.C. Geologic Nomenclature and Classification of Porosity in Sedimentary Carbonates. *AAPG Bulletin*, 1970, vol. 54, no. 2, pp. 207–250.

Received: 15 June 2022.

Information about the authors

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

Natalia A. Ivanova, Cand. Sc., senior researcher, Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources.

УДК 556.3.04

ИЗМЕНЕНИЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ШУМИХИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ УГЛЯ (ПРЕДУРАЛЬЕ) ПОД ВЛИЯНИЕМ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ РАБОТ

Имайкин Александр Камильевич¹,
imaykin@mail.ru

Имайкин Камиль Касимович¹,
imaykin@mail.ru

¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет,
Россия, 614068, г. Пермь, ул. Генкеля, 4.

Актуальность. Выявлены и рассмотрены большие изменения гидрогеологических условий Шумихинского месторождения угля во время работы и после ликвидации шахты. Установлено загрязнение подземных и поверхностных вод со стороны техногенного горизонта кислых шахтных вод и кислыми подотвальными водами, определены сроки окончания затопления шахты и объемы излива шахтных вод на поверхность. Работа будет полезна при разработке природоохранных мероприятий.

Цель: изучение гидродинамического режима подземных и шахтных вод во время работы и после ликвидации шахты; исследование химического состава шахтных вод, подотвальных вод и загрязненных подземных вод.

Методы: изучение опубликованных источников, анализ фондовых геологических материалов, данных гидрогеологического мониторинга, полевые работы, выполненные авторами на шахтном поле, работа с планами горных работ.

Результаты. Построен гидрогеологический разрез Шумихинского месторождения угля, отражающий гидрогеологические условия на момент максимального развития горных работ и спустя 20 лет после их прекращения. Построены совмещенные графики изменения уровней подземных и шахтных вод, а также притоков шахтных вод. Выявлены причины и характер изменения гидрогеологических условий в районе шахтного поля, сделан прогноз их изменения.

Выводы. Горные работы шахты «Шумихинская» оказали большое негативное влияние на гидрогеологические условия Шумихинского месторождения. Ликвидация шахты не привела к полному восстановлению гидродинамического режима подземных вод, вызвала образование техногенного горизонта шахтных вод и усиление загрязнения подземных вод. При сохранении скорости подъема шахтных вод ожидается начало их излива на поверхность через шурф 19 в 2026 г.

Ключевые слова:

Кизеловский угольный бассейн, Шумихинское месторождение, подземные воды, шахтные воды, подотвальные воды, гидрогеологический прогноз.

Введение

Статья основана на данных гидрогеологического мониторинга, проводимого Уральским центром (далее – фонд социально-экологического мониторинга углепромышленных территорий), и фондовых геологических материалах по Шумихинскому месторождению. В работе использованы также данные, полученные авторами в результате исследований района поля шахты «Шумихинская» в августе 2016 г.

Шумихинское месторождение угля входит в состав Кизеловского каменноугольного бассейна, расположенного в восточной части Пермского края (рис. 1). Запасы месторождения отрабатывались в 1968–2000 гг. одноименной шахтой. Месторождение в геоморфологическом отношении находится между крупными реками Пермского края – Косью и Усьвой, отметки урезов воды в реках равны, соответственно, 163 и 202 м. Промплощадка шахты и породный отвал расположены на водоразделе указанных рек. В состав гидрографической сети входят малые реки – Шумиха и Хорошовка, а также Сухой лог и Паленка (рис. 2, 3). Шахтные воды сбрасывались в р. Шумиху, сюда же попадала основная часть подотвальных вод породного отвала (рис. 3) до образования карстовой воронки в русле указанного водотока у северной части отвала. Карстовая воронка была обнаружена авторами в августе 2016 г.; с учетом данных космосъемки ее возникновение отнесено к 2015 г.

Методика исследования

В геолого-структурном отношении шахтное поле месторождения приурочено к средней и южной частям Шумихинской синклинали на площади Западно-Уральской зоны складчатости. Границами месторождения являются: на севере р. Косьва, на юге дизъюнктивное нарушение амплитудой до 100 м, расположенное между осью Шумихинской синклинали и осью Центральной Кизеловской антиклинали, на востоке и западе выходы угленосной толщ. Геологический разрез месторождения сложен в основном породами C_1 , согласно залегающими на отложениях D_3 и перекрытыми четвертичными образованиями; лишь на ограниченной площади встречаются отложения C_2 [1] (рис. 2–4). Нижний карбон включает: турнейский – C_{1t} , визейский – C_{1v} , и серпуховский – C_{1s} ярусы. Турнейский ярус сложен известняками, алевролитами, аргиллитами и песчаниками общей мощностью 300 м. Нижняя и средняя части визейского яруса являются угленосной толщей – hC_{1v1+2} , сложенной песчаниками, алевролитами, аргиллитами и пластами каменного угля общей мощностью 190 м, верхняя его часть – C_{1v3} , и серпуховский ярус – C_{1s} сложен закарстованными известняками и доломитами средней мощностью 340 м. Средний карбон представлен карбонатными породами башкирского яруса мощностью 50 м и глинисто-карбонатными породами московского яруса мощностью до 170 м. Угли Кизеловского бассейна, включая угли рассматриваемого месторожде-

ния, отличаются высоким содержанием пиритной серы, составляющим в среднем 6,5 % [2, 3]. Четвертичные отложения представлены в основном суглинками и глинами мощностью от 1–5 до 150 м, на площади 20 га они перекрыты плоским отвалом пород с включениями угля, выданными из шахты на поверхность при ведении гор-

ных работ. Высота отвала до 12 м. Карст проявляется в виде многочисленных воронок [4–6], последними полностью поглощается сток р. Сухой лог. Новая карстовая воронка полностью поглощает поверхностный сток с прилегающей территории и основную часть подотвальных вод (рис. 3, 4).

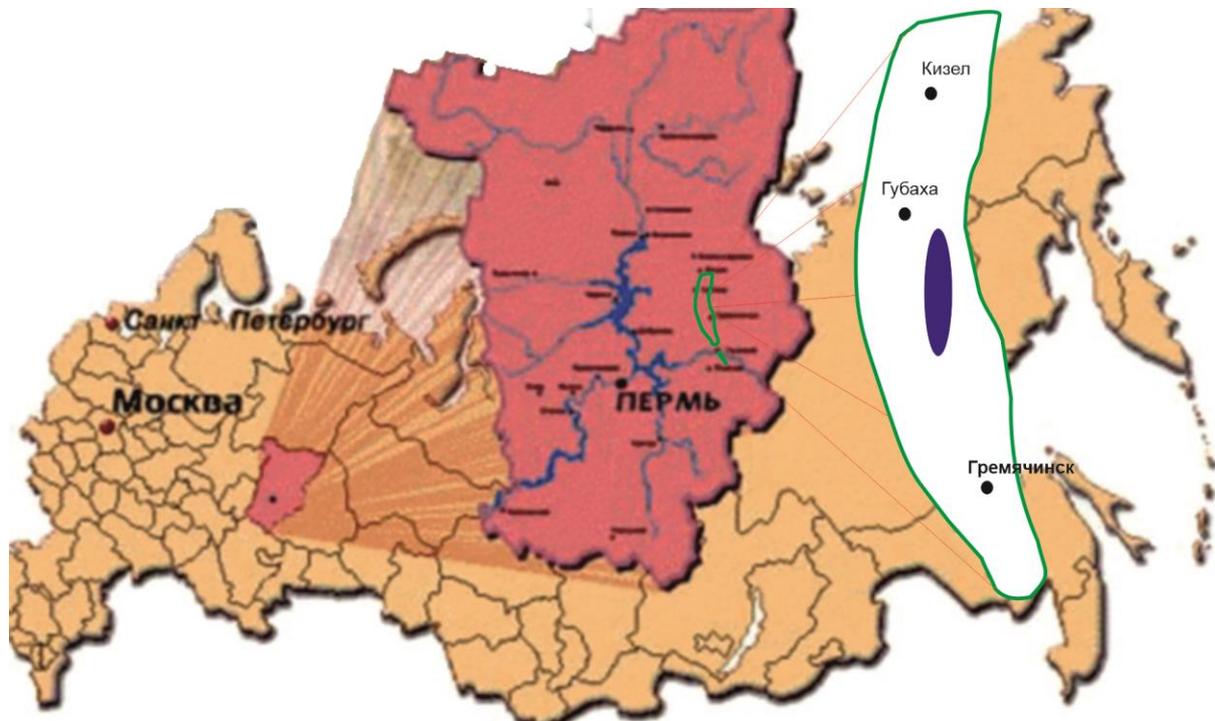


Рис. 1. Обзорная схема расположения Шумихинского месторождения угля
 Fig. 1. Overview diagram of the Shumikhinskoe coal deposit location

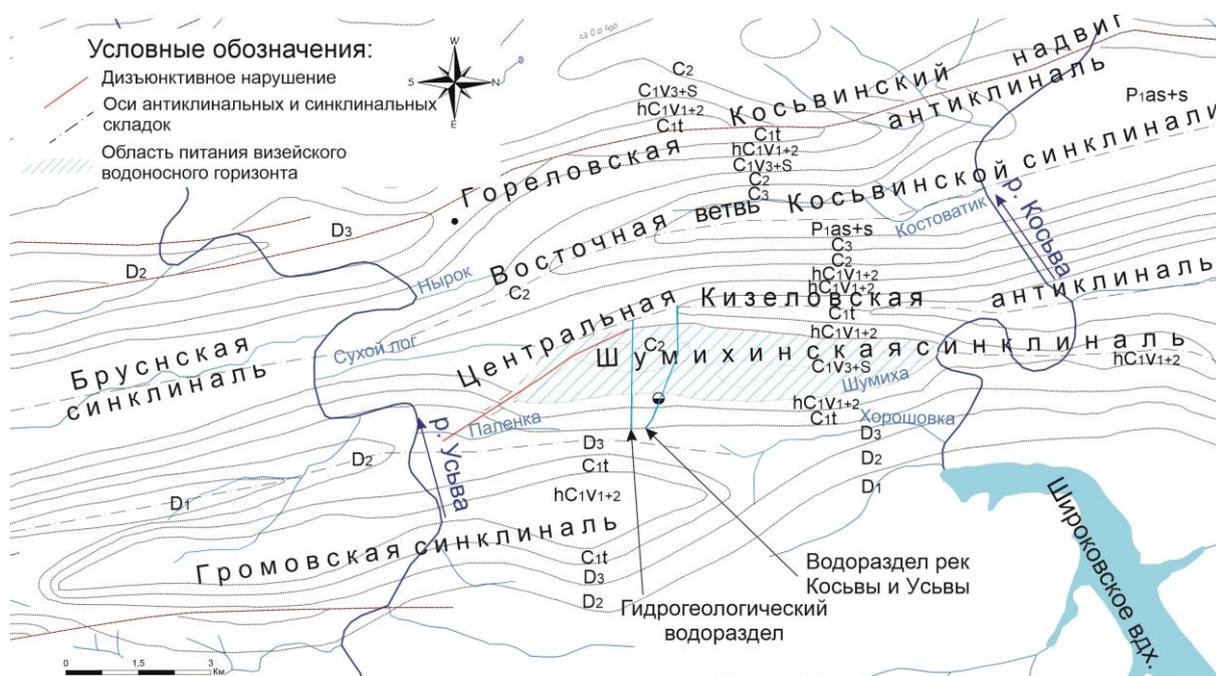


Рис. 2. Геологическая карта Кизеловского угольного бассейна в районе Шумихинской синклинали
 Fig. 2. Geological map of the Kizelovsky coal basin in the Shumikhinskaya syncline

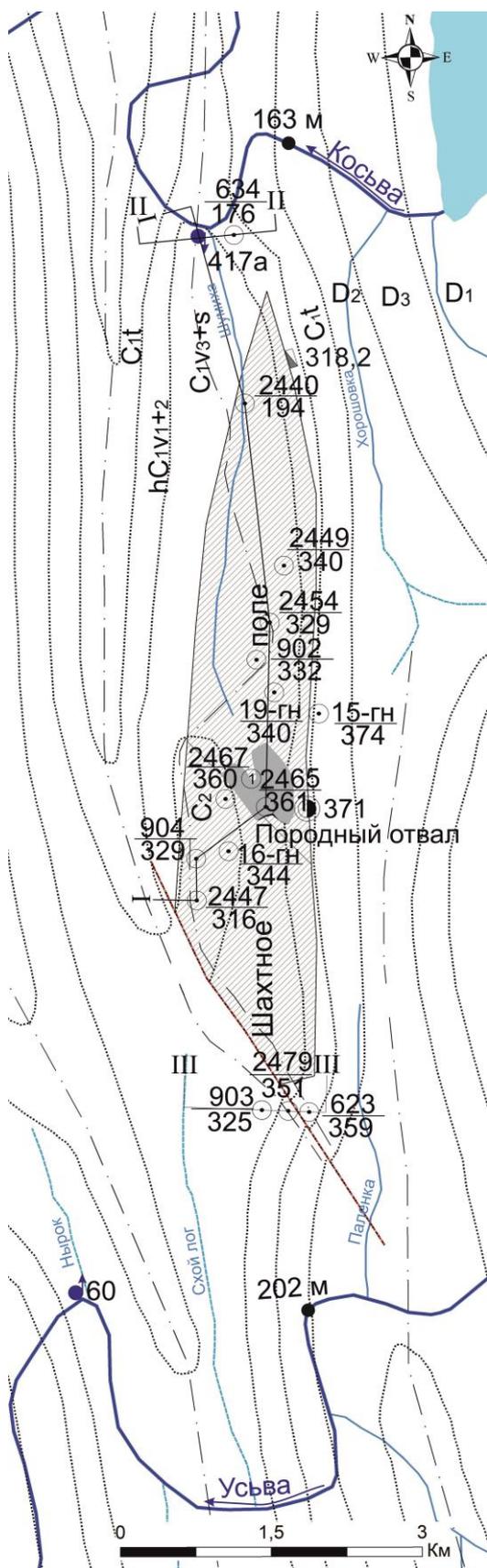


Рис. 3. Геологическая карта Шумихинского месторождения угля. Условные обозначения к рис. 3, 4 приведены на рис. 5

Fig. 3. Geological map of the Shumikhinskoe coal deposit. The notations to Fig. 3, 4 are given in Fig. 5

На шахтном поле выделяются: визейский горизонт трещинно-карстовых вод карбонатных отложений визейского, серпуховского и башкирского ярусов, комплекс трещинно-пластовых вод угленосной толщи и комплекс трещинно-пластовых и трещинно-карстовых вод турнейского яруса и верхнего девона [7–11]. Нижний из водоносных комплексов далее рассматривается лишь в составе турнейского яруса, т. к. подземные воды девонских отложений не испытывали воздействия горных работ и на шахтном поле не изучались. Вследствие высокой закарстованности и большой мощности карбонатных пород и хороших условий питания наибольшей водообильностью отличается визейский водоносный горизонт, являющийся и наиболее изученным. До работы шахты движение подземных вод горизонта происходило от гидрогеологического водораздела, находящегося в 0,7 км южнее породного отвала, к естественным областям разгрузки: на юго-запад на площадь восточной ветви Косьвинской синклинали и далее к р. Усьве и на север, к источнику 417-а на левом берегу р. Косьвы (рис. 2–4) [12]. При этом уровни подземных вод постепенно понижались от 304–316 м на водоразделе до отметок уреза воды в реках. Разгрузка подземных вод угленосной толщи происходила, вероятно, непосредственно в реки или очень рассредоточено, т. к. источников этих вод по берегам рек не обнаружено. К турнейским отложениям приурочен небольшой источник с дебитом 0,2 л/с на левом берегу р. Косьвы и источник с дебитом 1,5–2 л/с на правом берегу р. Косьвы. Отдельные данные о естественных уровнях подземных вод в обоих комплексах свидетельствуют о том, что они находились выше трещинно-карстовых вод визейского горизонта вследствие более высокого положения в рельефе выходов отложений угленосной толщи и турнейского яруса относительно выходов отложений визейского яруса (рис. 5).

Шахтное поле приурочено к восточному крылу и приосевой части Шумихинской синклинали. Горные работы велись на I, промежуточном, II и III горизонтах, отметка нижнего равна (-)230 м. Вынимались пласты 13 и 11 мощностью от 0,7 до 3 м, первый из них являлся верхним в разрезе. Управление кровлей велось полным обрушением [13]. Мощность междупластья на северном крыле шахты составляет 20–25 м, на южном крыле угольные пласты являются сближенными. Расстояние от пласта 13 до нижней границы карбонатной части визейского яруса равно 100 м, от пласта 11 до кровли турнейского яруса – около 60 м. Фактически нормальная мощность пород, отделяющих пласт 13 от визейского водоносного горизонта, достигает 130 м, т. к. нижняя пачка карбонатных пород визейского яруса представлена битуминозными незакарстованными известняками. Первый горизонт характеризуется крутым, вертикальным и обратным залеганием пластов, промежуточный горизонт – крутым залеганием пластов. Северное крыло II горизонта отличается пологим залеганием пластов в условиях приосевой части Шумихинской синклинали, на южном крыле горизонта имеет место крутое и наклонное залегание пластов. В этих условиях распространение

техногенных водопроницаемых трещин в кровельных породах вынутых пластов было минимальным на I горизонте и максимальным на северном крыле II го-

ризонта. В то же время дренирующему влиянию очистных работ I горизонта подвергались верхние водоносные горизонты турнейского яруса.

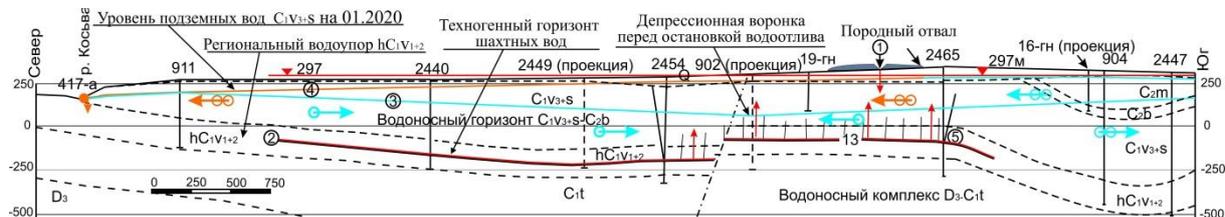
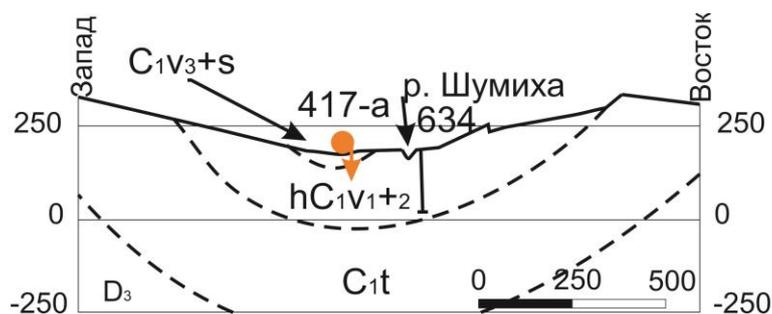


Рис. 4. Гидрогеологический разрез I-I Шумихинского месторождения угля от р. Косвы до скважины 2447

Fig. 4. Hydrogeological section I-I of the Shumikhinskoe coal deposit from the Kosva river to well 2447



Примечание: 1. Отметка устья скв.634-175,8 м, у ист. 417а-166 м, у Р. Шумихи 167 м. 2. Расстояние между скважиной и источником 210 м.

Условные обозначения:

- ⊙ $\frac{2449}{340}$ - Разведочная скважина; сверху номер, внизу отметка устья
- ⊙ $\frac{19-гн}{340}$ - Наблюдательная скважина
- ⊙ $\frac{374,5}{}$ - Клетевой ствол, справа отметка его устья
- ▽ $\frac{318,2}{}$ - Шурф 19, справа отметка его устья
- ▼ 297 - Уровень шахтных вод на 01.2020
- Угольный пласт 13 и зона распространения техногенных трещин, достигших визейского водоносного горизонта
- ① - Новая карстовая воронка
- ② - Северная граница горных работ
- ③ - Уровень подземных вод C_1V_{3+S} на 04.2000 г.
- ④ - Уровень подземных вод C_1V_{3+S} на 01.2020 г.
- ⑤ - Нижняя граница ведения горных работ
- ← ⊗ ← - Направление движения загрязненных подземных вод C_1V_{3+S} на 01.2020 г.
- ← ⊗ ← - Направление движения чистых подземных вод C_1V_{3+S} на 01.2020 г.
- ← ⊗ ← - Направление движения чистых подземных вод C_1V_{3+S} на 04.2000 г.
- ↑ ↓ - Загрязнение подземных вод C_1V_{3+S} шахтными и подотвальными водами

Рис. 5. Геологический разрез II-II по северной границе Шумихинского месторождения

Fig. 5. Geological section II-II along the northern boundary of the Shumikhinskoe field

Во время строительства шахты с 1958 по 1968 гг. и в первые годы добычи угля до 1973 г. шахтный приток формировался за счет подземных вод угленосной толщи, его средняя величина, за редким исключением, не превышала $100 \text{ м}^3/\text{час}$. Существенный рост среднего притока шахтных вод произошел в 1973 г. вследствие прорыва в июле того года подземных вод угленосной толщи и турнейского яруса с притоком до $1500 \text{ м}^3/\text{час}$ из зоны тектонического нарушения в полевой штрек 102 южного крыла шахты (рис. 6). Лишь быстрое снижение объема подземных вод, поступающих из зоны прорыва, спасло шахту от затопления. Формирование шахтных вод до 1983 г. происходило в основном за счет подземных вод угленосной толщи и турнейского яруса, в конце данного периода в обводнении шахты небольшое участие стал принимать визейский водоносный горизонт на самом северном участке промгоризонта, где в условиях некоторого выполаживания вынимались пласты 13 и 11 суммарной мощностью до 3–4 м. Рост обводненности шахты происходил постепенно по мере увеличения площади выработанного пространства. Ситуация с притоками шахтных вод резко изменилась с началом выемки в 1984 г. пласта 13 мощностью до 2–2,5 м на II горизонте в условиях пологого, до горизонтального,

залегания пластов. Техногенные водопродвижающие трещины в кровельных породах отработанного пласта достигли визейского водоносного горизонта, и уже в 1985 г. приток шахтных вод увеличился с 250 до $429 \text{ м}^3/\text{ч}$, а в следующем году достиг $518 \text{ м}^3/\text{ч}$. В 1990 г. подработка незатампонированной разведочной скважины 902 вызвала рост среднего притока шахтных вод до $555 \text{ м}^3/\text{ч}$, максимального до $802 \text{ м}^3/\text{ч}$. В последующем высокая обводненность шахты сохранялась до ее закрытия в 2000 г. После остановки в апреле 2000 г. шахтного водоотлива происходило затопление шахты поступающими в нее подземными водами с образованием на отработанной площади шахтного поля техногенного горизонта шахтных вод мощностью, определяемой вынимаемой мощностью пластов и высотой зоны обрушения кровельных пород над выработанным пространством, равной 3–6 мощностям вынутых пластов [14]. На северном крыле II горизонта мощность техногенного водоносного горизонта достигает 15–18 м. В июле 2014 г. начался излив шахтных вод на поверхность с дебитом от 4 до $10 \text{ м}^3/\text{ч}$ через разведочную скважину 634, расположенную на левом берегу р. Косьвы, в 75 м от ее русла и в 1450 м от северной границы горных работ шахты (рис. 3–5). Ранее скважина не фонтанировала.

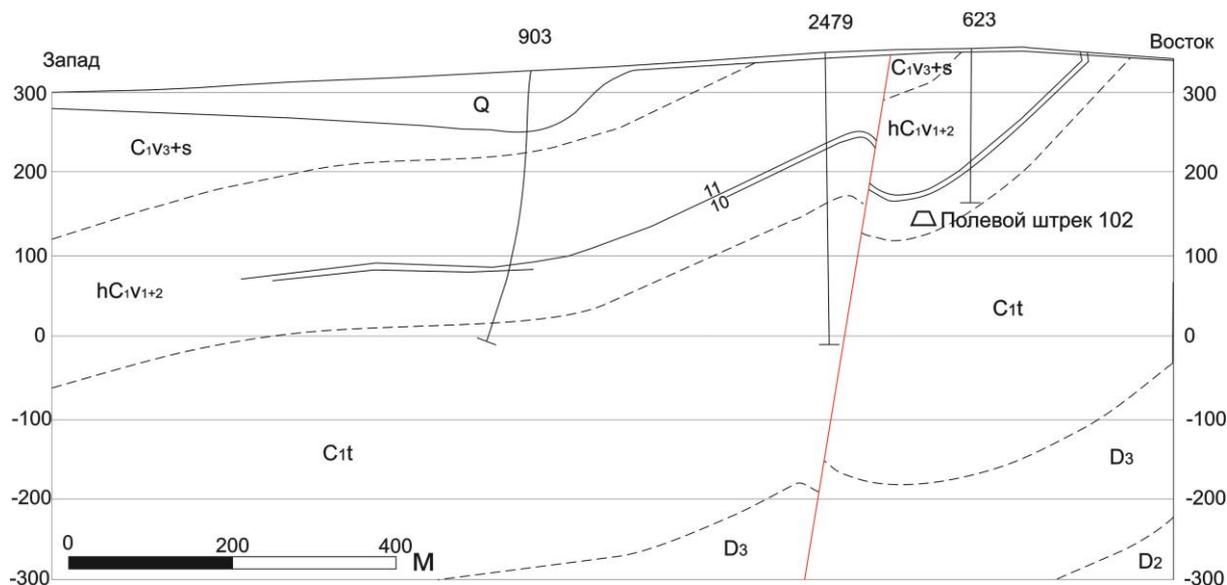


Рис. 6. Геологический разрез III-III по южной границе Шумихинского месторождения
 Fig. 6. Geological section III-III along the southern boundary of the Shumikhinskoe field

Результаты исследования

Сдвигание горных пород в выработанное пространство угольных пластов сопровождалось образованием водопродвижающих трещин в кровельных породах и нарушением естественных водоупоров, вследствие этого горные выработки становились новыми дренами подземных вод. Хорошим каналом поступления трещинно-карстовых вод в шахту являлась незатампонированная скважина 902 после её подработки по пласту 13. В результате активного дренирования подземных вод произошли большие негативные изменения гидрогеологических условий Шумихинского

месторождения. На совмещенных графиках изменения во времени притоков шахтных вод и уровней подземных вод визейского горизонта прослеживается хорошая связь между уровнями этих вод и величиной шахтных водопритокров (рис. 7). Уровни рассматриваемых вод во время работы шахты контролировались по наблюдательным скважинам 2467 и 2449, расположенным, соответственно, в средней и северной частях шахтного поля (рис. 3, 4). Они до 1981 г. испытывали лишь сезонные колебания, что свидетельствует об отсутствии участия трещинно-карстовых вод визейского горизонта в формировании шахтных водопритокров. К 1985 г. произошло небольшое сниже-

ние уровней подземных вод визейского горизонта вследствие дренирующего влияния горных работ на промгоризонте. Активное участие с 1984 г. данного водоносного горизонта в обводнении II горизонта шахты привело к отмеченному выше большому росту величины шахтных водопритоков и сопровождалось быстрым снижением уровней подземных вод, фиксировавшимся по скважинам до окончания наблюдений по ним (рис. 7). Учитывая сохранение больших притоков шахтных вод, обусловленных поступлением трещинно-карстовых вод по техногенным трещинам и подработанной скважине 902, вплоть до остановки водоотлива, предполагается, что скорость снижения уровней подземных вод также сохранилась на уровне, наблюдавшемся по скважине 2467 в 1986–1990 гг., до момента прекращения откачки воды из шахты. При этом уровень вод визейского горизонта по скважине 2449 снижался к началу 1996 г. до подошвы водоносного горизонта, имеющей здесь отметку 80 м, а по скважине 2467 – до отметки 115 м к началу 2000 г. Ко времени остановки шахтного водоотлива депрессионная воронка достигла максимальных размеров. Кардинально изменилось направление потока подземных вод визейского горизонта, вместо движения к естественным дренам – источнику 417-а на севере и р. Усьве на юге, трещинно-карстовые воды с большей части Шумихинской синклинали устремились к зоне их активного дренирования горными работами (рис. 4). Вне зоны дренирующего влияния горных работ осталась самая северная площадь распространения визейского горизонта, с которой подземные воды продолжали разгружаться через источник 417-а, но дебит последнего в 2000 г. составил всего 24 м³/ч (табл. 1). Водоносный комплекс угленосной толщи испытал наиболее сильное воздействие от ведения горных работ. Отдельные водоносные горизонты, разделенные в естественных условиях глинистыми породами и пластами угля, оказались гидравлически связанными водопроводящими трещинами, образовавшимися вследствие сдвижения горных пород в выработанное пространство. На северном крыле II горизонта водопроводящие трещины, а также ствол незатампонированной скважины 902 связали водоносный комплекс угленосной толщи с визейским водоносным горизонтом, а на северном крыле I горизонта, в условиях вертикального и опрокинутого залегания пластов, получили гидравлическую связь подземные воды угленосной толщи и верхних водоносных горизонтов турнейского яруса. Наблюдения за уровнем режимом подземных вод угленосной толщи во время работы шахты не проводились, однако из практики Кизеловского бассейна известно, что на площади отработки угольных пластов водоносный комплекс угленосной толщи дренировался практически до нижней отметки ведения горных работ, т. е. для условий шах. «Шумихинская» до отметки III горизонта (–)230 м.

Остановка шахтного водоотлива повлекла затопление горных выработок с образованием техногенного горизонта шахтных вод и восстановление уровней подземных вод, подвергшихся дренирующему влиянию шахты. Затопление горных выработок в услови-

ях высокой обводненности кизеловских шахт происходило быстро, особенно в начальный период, так, за первые полгода после остановки водоотлива крупнейшей в Кизеловском бассейне шах. им. Ленина уровень шахтных вод поднялся на 546 м [12]. Исходя из приведенных данных можно полагать, что уже в конце 2000 г. шахтные воды в горных выработках шахты «Шумихинская» приблизились к уровням трещинно-карстовых вод визейского горизонта и началось восстановление последних. Старые наблюдательные скважины к началу затопления шахты были выведены из строя, а новые еще не пробурены, поэтому наблюдения за восстановлением уровней подземных вод и уровнями шахтных вод в горных выработках стали проводиться с большим опозданием.

В 2003 г. на визейский водоносный горизонт были пробурены наблюдательные скважины: 19-гн в северной части шахтного поля и 16-гн в южной части, в этом же году в северной части шахтного поля в отложениях угленосной толщи и верхней части турнейского яруса была пробурена скважина 15-гн, которая использовалась для наблюдений за уровнем шахтных вод в горных выработках (рис. 3). При отчетной глубине скважин 200 м, предположительно из-за некачественно выполненных работ по их бурению и оборудованию, фактические замеры уровней по ним начались лишь в 2007–2008 гг., когда глубины залегания подземных вод уменьшились до 104–109 м, а шахтных вод до 143 м (рис. 7). Затопление горных выработок происходило в основном за счет трещинно-карстовых вод визейского горизонта, поэтому их уровень несколько превышал уровень затопления шахты до их приближения к естественному положению (рис. 7). На завершающем этапе восстановления динамического режима визейского водоносного горизонта все большая часть его ресурсов шла не на восстановление статических запасов данного горизонта, затопление горных выработок и пополнение запасов вод угленосной толщи, а направлялась к естественным областям разгрузки – источнику 417-а и р. Усьве. В данных условиях подъем уровней шахтных вод техногенного горизонта, подземных вод угленосной толщи и верхней части турнейского яруса шел быстрее и с 2016 г. эти воды по своему положению оказались выше уровня трещинно-карстовых вод визейского горизонта. По состоянию на начало 2020 г. уровень подземных вод визейского горизонта в северной части Шумихинской синклинали практически восстановился, при сохранении тренда, наблюдавшегося последние 4 года, уровень этих вод достигнет естественного положения в южной части синклинали через 10–13 лет, а шахтные воды техногенного горизонта через 6 лет поднимутся до устья самого северного шурфа 19, занимающего с отметкой 318,2 м наиболее низкое положение в рельефе из всех горных выработок шахты, и начнут изливаться на поверхность (рис. 3). Уровень шахтных вод при этом стабилизируется на отметке, близкой к отметке излива, на всем протяжении шахтного поля вследствие свободной гидравлической связи шахтных вод по выработанному пространству.

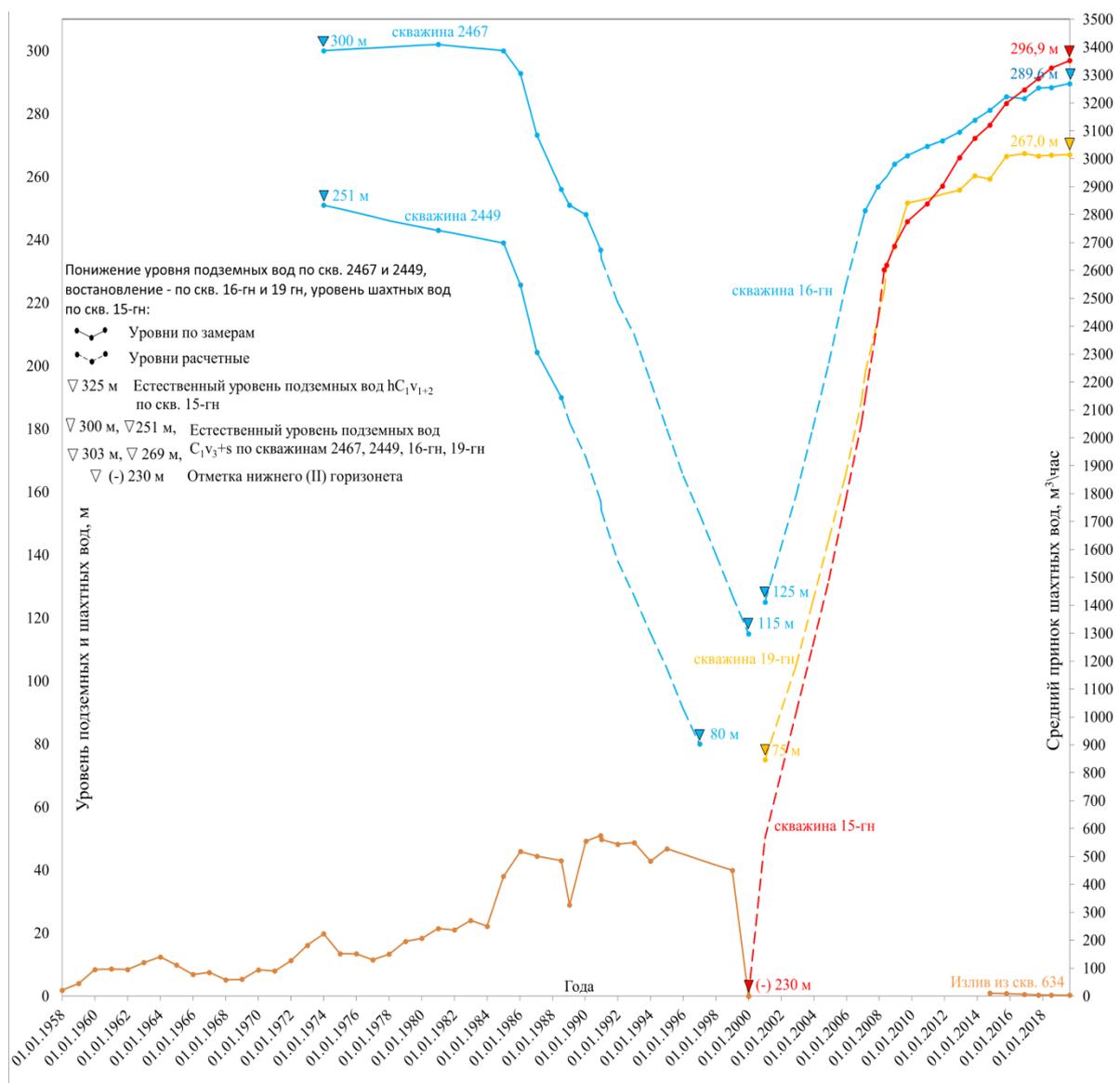


Рис. 7. Изменение уровней подземных вод C_{1V3+s} и hC_{1V1+2} и притоков шахтных вод во время работы и после закрытия шахты «Шумихинская»

Fig. 7. Variation of underground water level C_{1V3+s} and hC_{1V1+2} and mine water influxes at the working time and after the closure of mine «Shumikhinskaya»

В северной части шахтного поля уровень шахтных вод находится на десятки метров выше уровня подземных вод визейского горизонта; таким образом, создались условия для перетока шахтных вод в визейский водоносный горизонт. Уровень подземных вод угленосной толщи, связанных на шахтном поле с техногенным водоносным горизонтом, будет определяться отметками шахтных вод 318,2–319 м и не достигнет своих естественных отметок – до 350 м на широте гидрогеологического водораздела подземных вод. Ресурсы подземных вод угленосной толщи, а следовательно, и техногенного горизонта шахтных вод на поле шахты «Шумихинская» весьма ограничены небольшой площадью области питания этих вод и ее расположением на водоразделах местных малых рек (рис. 2, 3). Часть ресурсов техногенного горизонта шахтных вод разгружается через скважину 634, часть перетекает в визейский водоносный горизонт.

Дебит излива шахтных вод из шурфа 19 в этих условиях ожидается в среднем небольшим, до $10 \text{ м}^3/\text{ч}$, однако в период весеннего паводка он может многократно увеличиваться. Имеющиеся данные позволяют приблизительно оценить ресурсы визейского горизонта по дебиту источника 417-а. Уровни подземных вод горизонта на данной территории к 2010 г. в основном восстановились, то же самое можно сказать и о дебите источника 417-а. В период 2010–2020 гг. средний дебит последнего в летний меженьный период составлял $70 \text{ м}^3/\text{час}$, максимальный, связанный с весенним паводком, – $312 \text{ м}^3/\text{час}$, зимой наблюдения не проводились. Полагая, что дебит источника, близкий к среднему, наблюдается в течение 11 месяцев, а максимальный всего 1 месяц, среднегодовой дебит источника, характеризующий ресурсы визейского горизонта, можно оценить в $90 \text{ м}^3/\text{час}$. При площади питания источника 417-а равной $7,04 \text{ км}^2$ модуль подзем-

ного стока территории определяется приблизительно в $12,8 \text{ м}^3/\text{ч} \cdot \text{км}^2$, или $3,6 \text{ л/с} \cdot \text{км}^2$.

Подземные воды, поступающие в шахты Кизеловского бассейна, являются пресными и характеризуются нейтральной и слабощелочной реакцией [15, 16]. Окисление пирита, содержащегося в углях, приводит к образованию кислых шахтных вод с низкими значениями pH, повышенной минерализацией и высоким содержанием Fe, Al и ряда микроэлементов, многократно превышающим ПДК для вод питьевого и рыбохозяйственного назначения [3, 15–18]. Подобные изменения химического состава и свойств дождевых и талых вод происходят в недрах породных отвалов шахт с образованием кислых подотвальных вод. Зачастую содержание загрязняющих веществ в подотвальных водах больше, чем в шахтных водах, особенно это выражается в более высокой относительно Fe концентрации Al. Подобная картина наблюдается и на Шумихинском месторождении. Данные о химическом составе подземных, шахтных и подотвальных вод, включая основные результаты гидрохимического опробования, выполненного авторами в августе 2016 г., приведены в таблице.

Приведенные в таблице данные свидетельствуют о том, что в результате поступления в визейский горизонт шахтных и подотвальных вод трещинно-карстовые воды испытали сильное загрязнение, приводившее к многократному превышению ПДК для вод питьевого и рыбохозяйственного назначения по наиболее характерным для шахтных и подотвальных вод веществам: Fe, Al, Mn, Ni, Co, Li, Be. После 2010 г. происходило постепенное снижение уровня

загрязнения визейского горизонта, связанное, в частности, с большим уменьшением концентрации загрязняющих веществ в подотвальных водах. Однако качество вод источника 417-а все еще значительно хуже качества этих вод в естественных условиях, что выражается результатами химанализа вод источника 60 (рис. 3). Через этот источник происходит разгрузка визейского горизонта с южной части восточной ветви Косьвинской синклинали и, вероятно, южной части Шумихинской синклинал. Шахтные воды шах. «Шумихинская» по своим свойствам и химическому составу являются типичными для Кизеловского бассейна. Концентрация загрязняющих веществ в шахтных водах, изливающихся из скважины 634, выше, чем в шахтных водах при работе шахты, и имеет тенденцию к росту. Наиболее высокой является концентрация загрязняющих веществ в подотвальных водах, которые, как и объем этих вод, зависит от сезона года, количества и интенсивности осадков, продолжительности складирования породы в отвале. За период наблюдения произошло большое снижение содержания загрязняющих веществ в подотвальных водах – так, величина сухого остатка уменьшилась с $41,5$ до $5,1 \text{ г/дм}^3$. Во время эксплуатации месторождения откачиваемые на поверхность шахтные воды сбрасывались в р. Шумиху, загрязняя её, последняя в свою очередь загрязняла р. Косьву. После ликвидации шахты и затопления горных выработок образовался техногенный горизонт шахтных вод и произошло загрязнение шахтными и подотвальными водами визейского водоносного горизонта. Подверглись загрязнению и подземные воды самой угленосной толщи.

Таблица. Химический состав и дебиты подземных, шахтных и подотвальных вод

Table. Chemical composition and yields of groundwater, mine water and underspoil waters

Опробуемые воды. Место отбора пробы Tested water. Place of sampling	Дебиты источников воды, м ³ /ч Flow rates of water sources, m ³ /hour	Дата замера и опробования Date of measuring and testing	pH	Содержание, мг/дм ³ Concerning, mg/dm ³												
				Сухой остаток Dry residue	HCO ₃	SO ₄	Ca	Mg	Fe	Al	Mn	Ni	Co	Li	Be	
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
Подземные. Источник 417-а Underground feeder 417-а	24	29.08.00	6,77	511	76	288,0	96,0	21,8	0,26	0,32	0,191	0,038	0,015	0,065	0,0001	
	312	01.06.10	2,7	1392	–	862	71,9	18,5	132,5	72,38	0,687	0,160	0,081	0,703	0,0096	
	80	12.08.10	3,2	836	–	578	84,2	24,8	41,65	54,35	0,550	0,101	0,051	0,477	0,0057	
	74	18.08.16	4,09	610	–	452	111	32	10,5	32,5	0,42	0,06	0,03	0,14	0,0025	
Источник 60 Feeder 60	56	24.07.20	6,9	432	119	214	59	24	11,0	0,63	0,58	0,12	0,021	0,036	0,0004	
	200	19.09.02	7,66	152	159	9,6	42	9,1	0,19	0,28	0,008	0,003	0,002	0,003	0,0001	
Шахтные. Общий слив шахтных вод шах. «Шумихинская» на поверхность Mine waters. General dis- charge of mine water from the mine. «Shumikhinskaya» to the surface	207	15.06.1989	2,7	1680	–	1037	92,2	21,9	215,0	62,9	н/оп	н/оп	н/оп	н/оп	н/оп	
	5	11.07.14	6,1	2400	41	1230	153	33,7	582	0,08	3,16	0,127	0,143	0,082	0,0004	
	3	18.08.16	5,28	3494	–	2358	175	60	865	0,2	4,96	0,28	0,26	0,05	0,002	
	4	14.07.20	4,2	5824	–	3601	192	92	1810	10,0	11,0	2,4	0,65	0,12	0,029	
Подотвальные. Породный отвал шах. «Шумихинская» Underburden. The rock dump of the mine. «Shumikhinskaya»	31	10.10.02	2,08	41458	–	20378	125	176	4253	1713	12,7	5,46	2,10	12,2	0,262	
	7	31.08.09	2,1	32902	–	18499	385	293	3122	1852	19,4	2,76	1,27	13,15	0,1739	
	2	18.08.16	2,39	5687	–	4032	219	42	1374	223	4,4	1,10	0,51	1,60	0,040	
	7	23.09.19	2,6	5140	–	2340	243	75	99	370	4,1	0,51	0,25	4,1	0,016	

Образование кислых шахтных вод с высокой концентрацией железа не является особенностью Кизеловского бассейна, этот процесс происходит и на других угольных месторождениях, где они формировались как при добыче угля, так и после закрытия шахт [19–23]. В Великобритании, на Йоркширском месторождении угля, изливающиеся на поверхность из затопленных горных выработок кислые шахтные воды содержат до 100 мг/дм^3 железа [24], схожая ситуация и на угольных месторождениях Шотландии [25]. В Японии, на острове Кюсю, спустя 60 лет после прекращения эксплуатации угольного бассейна концентрация железа в выходящих на поверхность кислых шахтных водах достигает 119 мг/дм^3 , сульфатов – 1430 мг/дм^3 [26]. В США в Питсбургском угольном бассейне после его закрытия концентрации железа превышали 1 г/дм^3 [27].

К сожалению, рамки статьи не позволяют с достаточной полнотой рассмотреть вопросы формирования и изменения во времени и пространстве химического состава шахтных и подотвальных вод, загрязнения ими подземных вод Шумихинского месторождения. Авторы полагают необходимым вернуться к рассмотрению затронутой в статье темы после начала разлива шахтных вод техногенного горизонта на поверхность через шурф 19.

Выводы

Приведенные в статье данные позволяют сделать следующие основные выводы:

- Горные работы шахты «Шумихинская» оказали большое негативное воздействие на гидрогеологические условия Шумихинского месторождения угля во время отработки его запасов и продолжают его оказывать в постэксплуатационный период.
- Во время работы шахты произошли большие нарушения гидродинамического режима водоносных горизонтов, выразившиеся в изменении направления движения подземных вод, возникновении гидравлической связи между водоносными горизонтами из-за нарушения водоупоров, понижении уровней подземных вод, достигших 225 м для визейского водоносного горизонта и 580 м для угленосной толщи.
- За прошедшие 20 лет после остановки шахтного водоотлива уровни и направление движения подземных вод визейского горизонта практически восстановились. В затопленных горных выработках отработанной части шахтного поля образовался техногенный горизонт шахтных вод, ожидается, что через 6 лет эти воды поднимутся до отметки 318,2 м и начнут изливаться на поверхность через устье шурфа 19. Средний дебит разлива шахтных

вод предположительно не превысит $10 \text{ м}^3/\text{час}$, однако в весенний период он может многократно увеличиваться за счет попадания в горные выработки талых вод. Уровень подземных вод угленосной толщи будет определяться уровнем шахтных вод – 318,2–319 м, и поэтому не достигнет своего естественного положения – 350 м, на широте гидрогеологического водораздела. С 2014 г. частичная разгрузка шахтных вод со средним дебитом $5 \text{ м}^3/\text{час}$ происходит через разведочную скважину 634.

- Химический состав подземных вод визейского горизонта и угленосной толщи после ликвидации шахты ухудшился. Уровень шахтных вод техногенного горизонта на большей части шахтного поля превышает уровень вод визейского горизонта, поэтому происходит загрязнение последнего шахтными водами по техногенным трещинам и скважине 902. Кроме этого, данный водоносный горизонт загрязняется подотвальными водами через карстовую воронку, возникшую в 2015 г. Подземные воды визейского горизонта в естественном состоянии имеют хорошее качество и широко используются на территории Кизеловского бассейна для питьевого водоснабжения; в районе Шумихинского месторождения они являются загрязнителем р. Косьвы [28, 29], в которую впадают после выхода на поверхность в виде источника 417-а [30–33].
- На основании данных, имеющихся по наиболее старым шахтам Кизеловского бассейна, можно полагать, что образование кислых шахтных вод в горных выработках шахты «Шумихинская» будет происходить в течение сотен лет. Для улучшения геологической ситуации в районе Шумихинского месторождения необходимо в первую очередь провести рекультивацию породного отвала и ликвидировать карстовую воронку, поглощающую подотвальные воды.
- Следует продолжить гидрогеологический мониторинг. Необходимо также, с учетом результатов выполнения первоочередных природоохранных мероприятий и новых данных по объему и химическому составу шахтных вод, полученных после начала их разлива на поверхность из шурфа 19, разработать и осуществить дополнительные природоохранные работы.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Пермского научно-образовательного центра «Рациональное недропользование», 2022 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Снитко Г.П., Гай В.В. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200000. Издание второе. Серия Пермская. Лист О-40-Х (Кизел). Объяснительная записка. – М.: Московский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2017. – 167 с.
2. Геология месторождений угля и горючих сланцев СССР. Т. 4. Угольные бассейны и месторождения Урала. – М.: Изд-во «Недра», 1967. – 476 с.
3. Клер В.Р., Ненахова В.Ф., Сапрыкин Ф.Я. Металлогения и геохимия угленосных и сланцесодержащих толщ СССР. Закономерности концентрации элементов и методы их изучения. – М.: Изд-во «Наука», 1988. – 256 с.
4. Катаев В.Н., Золотарев Д.Р., Ермолович И.Г. Особенности развития карста в Кизеловском угольном бассейне // Геология и полезные ископаемые западного Урала. – 2019. – № 39. – С. 236–337.
5. Исследование гидрогеологических условий угольных месторождений на постэксплуатационном этапе с использованием

- гидродинамического моделирования (на примере Кизеловского угольного бассейна, Западный Урал, Косся) / П.А. Рыбников, Л.С. Рыбникова, Н.Г. Максимович, А.Д. Деменов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 3-1. – С. 475–487.
6. Максимович Н.Г., Мешерякова О.Ю. Влияние карста на формирование экологической обстановки на территории Кизеловского угольного бассейна // III Крымские карстологические чтения: Материалы международной научно-практической конференции. – Симферополь, 2021. – С. 76–80.
 7. Печеркин И.А. Подземные и шахтные воды Кизеловского каменноугольного бассейна: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Пермь, 1955. – 313 с.
 8. Кудряшов А.И., Осовецкий Б.М. Минерально-сырьевые ресурсы Пермского края. – Пермь: Изд-во «Книжная площадь», 2006. – 463 с.
 9. Копылов И.С. Геоэкология, гидрогеология и инженерная геология Пермского края. – Пермь: ИЦ Пермского государственного национального исследовательского университета, 2021. – 502 с.
 10. Копылов И.С. Гидрогеологическая карта и подземные воды Кизеловского угольного бассейна // Геоэкология, инженерная геодинамика, геологическая безопасность. Печеркинские чтения: сборник научных статей по материалам Международной научно-практической конференции. – Пермь, 2021. – С. 92–101.
 11. Оборин В.В., Копылов И.С. Обоснование гидрогеологического доизучения и геоэкологического картирования масштаба 1:200000 листа 0-40-х (Кизеловская площадь) // Геология и полезные ископаемые западного Урала. – 2020. – № 40. – С. 3–11.
 12. Имайкин А.К. Негативные геоэкологические последствия подземной добычи угля шахтой «Шумихинская» в Кизеловском угольном бассейне и рекомендации по снижению их воздействия на окружающую природную среду // Сергеевские чтения. Международный год планеты Земля: задачи геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Вып. 10: материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. – Москва, 2008. – С. 213–215.
 13. Управление кровлей и крепление в очистных забоях на угольных пластах с углом падения до 35°. Руководство КД 12.01.01.503-2001. – Киев: Минтопэнерго Украины, ДонУГИ, 2002. – 141 с.
 14. Синонян Р.Р. Маркшейдерское дело. – М.: Изд-во «Недра», 1982. – 303 с.
 15. Имайкин А.К. Оценка и прогноз гидрогеологических условий территории Кизеловского угольного бассейна после закрытия шахт: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Пермь, 2012. – 22 с.
 16. Имайкин А.К., Имайкин К.К. Гидрогеологические условия Кизеловского угольного бассейна во время и после окончания его эксплуатации, прогноз их изменений. – Пермь: Изд-во ПГНИУ, 2013. – 112 с.
 17. Baker V.J., Banfield J.F. Microbial communities in acid mine drainage // FEMS Microbiology Ecology. – 2003. – V. 44. – P. 139–152.
 18. Microbial oxidation of pyrite: experiments using microorganisms from an extreme acidic environment / K.J. Edwards., M.O. Schrenk, R. Hamers, J.F. Banfield // American Mineralogist – 1998. – V. 83. – P. 1444–1453.
 19. Burrell R., Whitworth K. The influence of mine water recovery on surface on gas and water discharges in the Yorkshire Coalfield // Mine Water and the Environment: Proc. of 7th International Mine Water Association Congress. – Katowice, Ustron, Poland, 2000. – P. 81–90.
 20. Donovan J.J., Leavitt B.R., Werner E. Long-term changes in water chemistry as a result of mine flooding in closed mines of the Pittsburgh coal basin, USA // Sixth International Conference Acid Rock Drainage. – Cairns, Queensland, USA, 2003. – P. 869–875.
 21. Health impacts of coal and coal use: possible solutions / R. Finkelman, W. Orem, V. Castranova, C.A. Taty, H.E. Belkin, B. Zheng, H.E. Lerch, S.V. Maharaj, A.L. Bates //
 22. International Journal of Coal Geology. – 2009. – V. 50. – P. 425–443.
 23. Finkelman R., Stracher G. B. Environmental and health impacts of coal fires // Coal and peat fires: a global perspective. – Amsterdam: Elsevier, 2011. – P. 115–125.
 24. Orem W.H., Finkelman R.B. Coal formation and geochemistry // Treatise on Geochemistry. – 2003. – V. 7. – P. 191–222.
 25. Younger P.L., Bradley K.F. Application of geochemical mineral exploration techniques to the cataloguing of problematic discharges from abandoned mines in North-East England // 5th International Mine Water Congress. – Nottingham, 1994. – P. 857–871.
 26. The environmental legacy of historic mining activities in the Almond River catchments, Scotland / S. Haunch, A. MacDonald, N. Brown, C. McDermott // Mine Water – Managing the Challenge. – Aachen, Germany: IMWA, 2011. – P. 581–586.
 27. Okamoto M., Kobayashi T., Sakamoto M. Physical properties of sediments deposited in the mine water from a closed coal mine // Engineering geology for tomorrow's cities: Proc. of the 10th Congress of the International Association for Engineering geology and the Environment. – Nottingham UK, 2006. – CD-ROM.
 28. Long-term changes in water chemistry as a result of mine flooding in closed mines of the Pittsburgh coal basin, USA / J.J. Donovan, B.R. Leavitt, A.J. Morris, E. Werner // 6th ICARD. – Cairns Australia, 2003. – P. 869–875.
 29. Меньшикова Е.А., Ушакова Е.С., Блинов С.М. Геохимическая специфика загрязнения рек в зоне влияния Кизеловского угольного бассейна // Экологическая безопасность в условиях антропогенной трансформации природной среды: сборник материалов всероссийской школы-семинара, посвященной памяти Н.Ф. Реймерса и Ф.П. Штильмарка. – Пермь, 2021. – С. 269–273.
 30. Репин И.С., Андреева Е.Д. Влияние разработки Кизеловского угольного бассейна на экологическое состояние бассейна реки Косвы // Природа и общество: в поисках гармонии. – 2020. – № 6. – С. 114–126.
 31. Powell J.D. Origin and influence of coal mine drainage on streams of the United States // Environmental Geology and Water Sciences. – 1988. – V. 11. – P. 141–152.
 32. Acid-base accounting: a geochemical tool for management of acid drainage in coal mines / S. Siddharth, A. Jamal, B.B. Dhar, R. Shukla // Mine Water Environ. – 2002. – V. 21. – P. 106–110.
 33. Tao X., Wu P., Tang C. Effect of acid mine drainage on a karst basin: a case study on the high-As coal mining area in Guizhou province, China // Environmental Earth Sciences. – 2012. – V. 65. – P. 631–638.
 34. Wright I.A., Paciuszkiewicz K., Belmer N. Increased water pollution after closure of Australia's longest operating underground coal mine a 13-month study of mine drainage, water chemistry and river ecology water // Air Soil Pollut. – 2018. – V. 229: 55. URL: <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3718-0> (15.11.2021).

Поступила: 20.11.2021 г.

Информация об авторах

Имайкин А.К., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории экологической геологии Естественного института Пермского государственного национального исследовательского университета.

Имайкин К.К., ведущий инженер научно-исследовательской лаборатории геологии техногенных процессов Естественного института Пермского государственного национального исследовательского университета.

UDC 556.3.04

CHANGES IN HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS OF THE SHUMIKHINSKY COAL DEPOSIT (PRE-URALS) AS A RESULT OF UNDERGROUND MINING

Alexander K. Imaykin¹,
imaykin@mail.ru

Kamil K. Imaykin¹,
imaykin@mail.ru

¹ Perm State National Research University,
4, Genkel street, Perm, 614068, Russia.

The relevance. Major changes in the hydrogeological conditions of the Shumikhinsky coal deposit during operation and after liquidation of the mine are identified and considered. Contamination of ground and surface waters by the technogenic horizon of acid mine waters and underspoil waters were established, the terms of termination of mine flooding and the volume of mine water outflow to the surface were determined. The work will be useful in the development of environmental protection measures.

Research objective: to study the hydrodynamic regime of groundwater and mine water during operation and after abandonment of the mine; investigation of chemical composition of mine water, underspoil waters and contaminated groundwater.

Methods: a review of general published sources, analysis of stock-keeping geological materials, hydrogeological monitoring data, field works performed by the authors in the mine field, and work with mine work plans.

Results. A hydro-geological section of the Shumikhinskoe coal deposit, reflecting the hydro-geological conditions at the time of maximum development of mining operations and 20 years after their termination, was constructed. Combined graphs of changes in groundwater and mine water levels, as well as mine water inflows, were plotted. The causes and nature of changes in the hydrogeological conditions in the area of the mine field were identified, and a forecast of their changes was made.

Conclusions. Mining works of mine «Shumihinskaya» had a great negative effect on the hydrogeological conditions of Shumihinskoe deposit. Mine liquidation did not result in full recovery of groundwater hydrodynamic conditions and caused formation of anthropogenic mine water table and increased groundwater pollution. If the rate of mine water rise remains unchanged, it is expected to be released to the surface through Pit 19 after 6 years.

Key words:

Kizelovsky coal basin, Shumikhinskoe deposit, groundwater, mine water, underspoil waters, hydrogeological forecast.

REFERENCES

1. Snitko G.P., Guy V.V. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:200000. Izdanie vtoroe. Seriya Permskaya. List O-40-X (Kizel). Obyasnitelnaya zapiska* [State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:200,000. Second edition. Permskaya series. Sheet O-40-X (Kizel). Explanatory note]. Moscow, Moscow branch of FGBU VSEGEI, 2017. 167 p.
2. *Geologiya mestorozhdeniy uglya i goryuchikh slantsev SSSR* [Geology of Coal and Oil Shale Deposits of the USSR]. Vol. 4. Coal Basins and Deposits of the Urals. Moscow, Nedra Publ., 1967. 476 p.
3. Clair V.R., Nenakhova V.F., Saprykin F.Ya. *Metallogeniya i geokhimiya uglensnykh i slantsevnykh tolshch SSSR. Zakonomernosti kontsentratsiy elementov i metody ikh izucheniya* [Metallogeny and geochemistry of coal and shale-bearing strata of the USSR. Regularities of the element concentrations and methods of their studies]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 256 p.
4. Kataev V.N., Zolotarev D.R., Ermolovich I.G. Features of karst development in Kizelovsky coal basin. *Geologiya i poleznye iskopaemye zapadnogo Urala*, 2019 no. 39, pp. 236–337. In Rus.
5. Rybnikov P.A., Rybnikova L.S., Maksimovich N.G., Demenev A.D. Investigation of hydrogeological conditions of coal deposits at the post-operational stage using hydrodynamic modeling (on the example of the Kizel coal basin, Western Urals, Russia). *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2020, vol. 3-1, pp. 475–487. In Rus.
6. Maksimovich N.G., Meshcheryakova O.Yu. Vliyanie karsta na formirovanie ekologicheskoy obstanovki na territorii Kizelovskogo ugolnogo basseyna [Impact of karst on the formation of environmental conditions in the Kizelovsky coal basin]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii III Krymskie karstologicheskije chteniya* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference III Crimean karstological readings]. Simferopol, 2021. pp. 76–80.
7. Pecherkin I.A. *Podzemnye i shakhtnye vody Kizelovskogo kamennougolnogo basseyna*. Diss. Kand. nauk [Underground and mine waters of the Kizelovsky coal basin. Cand. Diss.]. Perm, 1955. 313 p.
8. Kudryashov A.I., Osovetsky B.M. *Mineralno-syryevye resursy Permskogo kraja* [Mineral and raw material resources of Perm Krai]. Perm, Book Square Publ., 2006. 463 p.
9. Kopylov I.S. *Geokologiya, gidrogeologiya i inzhenernaya geologiya Permskogo kraja* [Geocology, Hydrogeology and Engineering Geology of Perm Region]. Perm, Perm State National Research University Publ., 2021. 502 p.
10. Kopylov I.S. *Gidrogeologicheskaya karta i podzemnye vody Kizelovskogo ugolnogo basseyna* [Hydrogeological map and underground waters of Kizelovsky coal basin]. *Geokologiya, inzhenernaya geodinamika, geologicheskaya bezopasnost. Pecherkinskie chteniya. Sbornik nauchnykh statey po materialam Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Geocology, engineering geodynamics, geological safety. Pecherkinskie readings. Book of scientific papers on the proceedings of International Scientific Conference]. Perm, 2021. pp. 92–101.
11. Oborin V.V., Kopylov I.S. Substantiation of hydrogeological pre-exploration and geo-ecological mapping at 1:200000 scale of sheet O-40-x (Kizelovskaya area). *Geologiya i poleznye iskopaemye zapadnogo Urala*, 2020, vol. 40, pp. 3–11. In Rus.
12. Imaykin A.K. Negativnye geokologicheskie posledstviya podzemnoy dobychi uglya shakhtoy «Shumikhinskaya» v Kizelovskom ugolnom basseyne i rekomendatsii po snizheniyu ikh vozdeystviya na okruzhayushchuyu prirodnyuyu sredu [Negative geo-ecological consequences of underground coal mining by Shumikhinskaya mine in Kizelovsky coal basin and recommendations on reduction of their impact on environment]. *Sergeevskie chteniya. Mezhdunarodny god planety Zemlya: zadachi geologii, inzhenernoy geologii i gidrogeologii. Vypusk 10: materialy godichnoy sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geologii, inzhenernoy geologii i gidrogeologii* [Sergeev readings. International Year of Planet Earth: problems of geocology, engineering geology and hydrogeology. Vol. 10:

- Materials of annual session of RAS Scientific Council on problems of geoecology, engineering geology and hydrogeology]. Moscow, 2008. pp. 213–215.
13. *Upravlenie krovley i kreplenie v ochistnykh zaboyakh na ugolnykh plastakh s uglom padeniya do 35°. Rukovodstvo KD 12.01.01.503-2001* [Roofing management and fastening in the working face at coal seams with a dip angle up to 35°. Guidance KD 12.01.01.503. – 2001]. Kyiv, Ministry of Fuel and Energy of Ukraine, Don UHI, 2002. 141 p.
 14. Sinonyan R.R. *Markshederskoe delo* [Mine surveying]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 303 p.
 15. Imaykin A.K. *Otsenka i prognoz gidrogeologicheskikh usloviy territorii Kizelovskogo ugolnogo basseyna posle zakrytiya shakht*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Assessment and forecast of hydrogeological conditions of Kizelovsky coal basin territory after mine closure. Cand. Diss. Abstract]. Perm, 2012. 22 p.
 16. Imaykin A.K., Imaykin K.K. *Gidrogeologicheskie usloviya Kizelovskogo ugolnogo basseyna v protsesse i posle ekspluatatsii, Prognoz ikh izmeneniya* [Hydrogeological conditions of Kizelovsky coal basin during and after its operation, Forecast of their changes]. Perm, PGNIU Publ., 2013. 112 p.
 17. Baker B.J., Banfield J.F. Microbial communities in acid mine drainage. *FEMS Microbiology Ecology*, 2003, vol. 44, pp. 139–152.
 18. Edwards K.J., Schrenk M.O., Hamers R., Banfield J.F. Microbial oxidation of pyrite: experiments using microorganisms from an extreme acidic environment. *American Mineralogist*, 1998, vol. 83, pp. 1444–1453.
 19. Burrell R., Whitworth K. The influence of mine water recovery on surface on gas and water discharges in the Yorkshire Coalfield. *Mine Water and the Environment. Proceedings of 7th International Mine Water Association Congress*. Katowice, Ustron, Poland, 2000. pp. 81–90.
 20. Donovan J.J., Leavitt B.R., Werner E. Long-term changes in water chemistry as a result of mine flooding in closed mines of the Pittsburgh coal basin, USA. *Sixth International Conference Acid Rock Drainage*. Cairns, Queensland, USA, 2003. pp. 869–875.
 21. Finkelman R., Orem W., Castranova V., Taty C.A., Belkin H.E., Zheng B., Lerch H.E., Maharaj S.V., Bates A.L. Health impacts of coal and coal use: possible solutions. *International Journal of Coal Geology*, 2002, vol. 50, pp. 425–443.
 22. Finkelman R., Stracher G.B. Environmental and health impacts of coal fires. *Coal and peat fires: a global perspective*. Amsterdam, Elsevier, 2011. pp. 115–125.
 23. Orem W.H., Finkelman R.B. Coal formation and geochemistry. *Treatise on Geochemistry*, 2003, vol. 7, pp. 191–222.
 24. Younger P.L., Bradley K.F. Application of geochemical mineral exploration techniques to the cataloguing of problematic discharges from abandoned mines in North-East England. *5th International Mine Water Congress*, Nottingham, 1994. pp. 857–871.
 25. Haunch S., MacDonald A., Brown N., McDermott C. The environmental legacy of historic mining activities in the Almond river catchments, Scotland. *Mine Water – Managing the Challenges*. Aachen, Germany, IMWA Publ., 2011. pp. 581–586.
 26. Okamoto M., Kobayashi T., Sakamoto M. Physical properties of sediments deposited in the mine water from a closed coal mine. *Engineering geology for tomorrow's cities. Proceedings of the 10th Congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment*. Nottingham UK, 2006. CD-ROM.
 27. Donovan J.J., Leavitt B R, Morris A.J., Werner E. Long-term changes in water chemistry as a result of mine flooding in closed mines of the Pittsburgh coal basin, USA. *6th ICARD*. Cairns Australia, 2003. pp. 869–875.
 28. Menshikova E.A., Ushakova E.S., Blinov S.M. Geokhicheskaya spetsifika zagryazneniya rek v zone vliyaniya Kizelovskogo ugolnogo basseyna [Geochemical specificity of river pollution in zone of influence of Kizelovsky coal basin]. *Ekologicheskaya bezopasnost v usloviyakh antropogennoy transformatsii prirodnoy sredy. Sbornik materialov vsrossiyskoy shkoly-seminara, posvyashchennoy pamyati N.F. Rejmersa i F.R. Shtilmarka* [Ecological safety in conditions of anthropogenic transformation of natural environment: collection of materials of All-Russian School-Seminar devoted to memory of N.F. Reimers and F.R. Stilmark]. Perm, 2021. pp. 269–273.
 29. Repin I.S., Andreeva E.D. Impact of Kizelovsky coal basin development on the ecological state of the Kosva river basin. *Priroda i obshchestvo: v poiskah garmonii*, 2020, no. 6, pp. 114–126. In Rus.
 30. Powell J.D. Origin and influence of coal mine drainage on streams of the United States. *Environmental Geology and Water Sciences*, 1988, vol. 11, pp. 141–152.
 31. Siddharth S., Jamal A., Dhar B.B., Shukla R. Acid-base accounting: a geochemical tool for managem of acid drainage in coal mines. *Mine Water Environ*, 2002, vol. 21, pp. 106–110.
 32. Tao X., Wu P., Tang C. et al. Effect of acid mine drainage on a karst basin: a case study on the high-As coal mining area in Guizhou province, China. *Environmental Earth Sciences*, 2012, vol. 65, p. 631–638.
 33. Wright I.A., Paciuszkiewicz K., Belmer N. Increased water pollution after closure of Australia's longest operating underground coal mine a 13-month study of mine drainage, water chemistry and river ecology water. *Air Soil Pollut*, 2018, vol. 229: 55. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3718-0> (accessed 15 November 2021).

Received: 20 November 2021.

Information about the authors

Alexander K. Imaykin, Cand. Sc., researcher, Perm State National Research University.

Kamil K. Imaykin, leading engineer, Perm State National Research University.

УДК 622.253.35

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД БЕРЕЗОВСКОГО РУДНИКА ОАО «БЕЛАРУСЬКАЛИЙ»

Зайцев Артем Вячеславович¹,
aerolog.artem@gmail.com

Бородавкин Дмитрий Алексеевич¹,
borodavkin.dmitriy@gmail.com

Бублик Сергей Анатольевич¹,
serega-bublik@mail.ru

Агеева Ксения Михайловна¹,
kimageeva@gmail.com

¹ Горный институт УрО РАН,
Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а.

Актуальность. С увеличением глубины ведения работ происходит естественное повышение температур горных пород и, как следствие, увеличение температуры воздуха в рабочих зонах. Наиболее эффективным мероприятием по снижению температур воздуха является применение систем кондиционирования. Наличие данных о тепловых свойствах горных пород на этапе предпроектной проработки позволяет избежать необоснованных запасов мощностей холодильного оборудования, снижая капитальные и эксплуатационные затраты.

Цель: исследование температуры нетронутого массива горных пород для определения геотермической ступени для условий Березовского рудника 1 РУ ОАО «Беларуськалий».

Объектом исследования в настоящей работе является шахтное поле Березовского рудника компании ОАО «Беларуськалий». **Методы:** проведены экспериментальные измерения температуры пород в шпурах, пробуренных в горных выработках на различных глубинах, проведена статистическая обработка данных, выполнена аппроксимация поля температуры как функции от пространственных координат.

Результаты. Исследованы температуры нетронутого массива горных пород, получена аппроксимирующая зависимость ожидаемой температуры пород на заданной глубине. Полученная в результате исследований величина геотермической ступени составила 64,9 м/°С, что выше значений, рассчитанных ранее согласно инструкции по расчету требуемого количества воздуха для исследуемого рудника и данных скважинной термометрии. При этом полученное значение соответствует данным карты геотермической ступени в верхней части земной коры на территории СССР. Проведенное исследование температур массива горных пород для горизонтального разреза шахтного поля указывает на наличие зависимости температуры от всех трех координат, что свидетельствует о наличии латеральной изменчивости поля температур, которая не может быть объяснена исключительно падением пласта.

Ключевые слова:

Рудник, коэффициент детерминации, геотермия, геотермическая ступень, термовлажностная съемка рабочих зон, температура массива горных пород, тепловой режим.

Введение

В настоящее время большинство предприятий вынуждены разрабатывать все более глубокие залежи. Увеличение глубины ведения горных работ ведет к естественному повышению температуры породного массива, что в первую очередь вызвано геотермической ступенью [1]. Как следствие, температуры воздуха в зонах ведения горных работ также возрастают из-за теплообмена с породным массивом [2]. Кроме того, на температуру воздуха в горных выработках рудника могут влиять температура воздуха на дневной поверхности, гидростатическое сжатие/расширение воздуха при его движении по вертикальным/наклонным выработкам, влагообмен, окислительные процессы, а также местные источники теплоты [3–5].

Таким образом, в современных условиях интенсивного развития горных работ негативное воздействие, вызванное повышением температур, становится все более заметным, что неблагоприятно влияет на здоровье горнорабочих, снижает производительность

труда, увеличивает вероятность возникновения аварийных ситуаций на горных предприятиях [6, 7]. Все это ведет к необходимости регулирования теплового режима в горных выработках.

Согласно пункту 152 «Правил безопасности при ведении горных работ...» температура воздуха в забоях подготовительных и очистных выработок и на рабочих местах с постоянным присутствием персонала не должна превышать 26 °С. При температуре воздуха выше 26 °С должны предусматриваться различные мероприятия по его охлаждению. Разработка мероприятий, направленных на регулирование теплового режима, обычно влечет за собой значительные финансовые затраты. При этом измерение и анализ распределения свойств горных пород в массиве на этапе предпроектной проработки позволяют избежать необоснованных запасов мощностей оборудования, используемого для борьбы с негативным влиянием температур, и тем самым снижать капитальные и эксплуатационные затраты на реализацию мероприятий

по охлаждению воздуха [8]. Все это влечет за собой повышение экономических показателей предприятия и повышает его конкурентоспособность на рынке.

Объектом исследования в настоящей работе является Березовский рудник 1 РУ ОАО «Беларуськалий» Старобинского месторождения. Для данного рудника, как и для других калийных рудников Старобинского месторождения, актуальной является проблема нормализации микроклимата в рабочих зонах. Это связано с большой глубиной ведения горных работ, а также с существенным тепловым влиянием применяемого горнодобывающего оборудования. Для корректного прогнозирования теплового режима подземных рабочих зон рудника и подбора эффективных мероприятий по нормализации теплового режима необходимо, в частности, знать геотермическую ступень (геотермический градиент) на данном участке. Последняя, как правило, определяется из скважинной термометрии [7, 9, 10].

Однако этот способ не является единственно возможным, помимо него для эксплуатируемых рудников могут применяться методы, основанные на прямом измерении температуры пород на различных глубинах и дальнейшем определении аппроксимирующей зависимости температуры от глубины. В опре-

деленных условиях применяется также метод, в рамках которого измеряется не температура пород, а температура воздуха. Именно такой метод применялся при разработке «Инструкции по расчету количества воздуха, необходимого для проветривания рудников Старобинского месторождения», в 2014 г. Были выполнены замеры температуры воздуха в вентиляционных штреках главных направлений. Мотивацией для выбора данного метода послужило отсутствие данных по распределению температуры породного массива по глубине геотермических скважин, а также известный факт о том, что при удалении воздушной струи от воздухоподающих стволов на расстоянии 2500–3000 м происходит процесс выравнивания температуры воздуха до температуры породного массива [3]. Следовательно, температуры воздуха в выработках, находящихся на данном удалении и не имеющих техногенных источников выделения теплоты, наиболее близки к температуре непогрешенного породного массива. Измеренные температуры в вентиляционных штреках главных направлений были приняты в качестве температур нетронутого породного массива для определения геотермической ступени. Результаты замеров представлены в табл. 1.

Таблица 1. Данные температурных съемок на рудниках ОАО «Беларуськалий»

Table 1. Thermal survey data at the mines of Belaruskali company

Рудник Mine	Ствол Shaft	Горизонт Horizon	Средняя температура пород, °С Average rock temperature, °С	Абсолютная отметка, м Elevation, m	Глубина, м Depth, m
1 РУ 1 MG	3	Устье Shaft collar	27,9	154,0	0,0
		–264 м/м	18,7	–264,1	418,1
		–305 м/м	19,5	–305,0	459,0
		–430 м/м	20,5	–446,0	600,0
2 РУ 2 MG	3	Устье Shaft collar	21,5	180,3	0
		–445 м/м	20,1	–445,3	625,3
3 РУ 3 MG	3	Устье Shaft collar	20,1	162,0	0,00
		–420 м/м	19,4	–424,7	586,7
		–620 м/м	21,9	–621,4	783,4
4 РУ 4 MG	3	Устье Shaft collar	15,3	155,0	0,0
		–440 м/м	20,9	–438,0	594,0
	4	Устье Shaft collar	14,4	155,0	0,0
		–670 м/м	21,6	–636,7	791,7
	6	Устье Shaft collar	15,4	148,0	0,0
		Березовский участок Berezovsky area	19,4	–421,3	570,3
Краснослободский рудник Krasnoslobodsky mine	2	Устье Shaft collar	20,2	178,0	0
		–290 м/м	20,5	–290,1	468,1
		–445 м/м	21,4	–443,8	621,8

Полученный массив экспериментальных данных позволил получить аппроксимирующую зависимость ожидаемой температуры пород на заданной глубине:

$$t_{\text{п}} = 5,31 + 0,015 \cdot z, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1)$$

где z – глубина искомой точки относительно земной поверхности, м. Глубина определялась путем суммирования высотной отметки искомой точки, взятой по

модулю, с высотной отметкой поверхности воздухоподающих стволов рудника. Абсолютное отклонение зависимости (1) от экспериментальных данных составляет 1,12 °С, среднее отклонение – 0,46 °С.

Важно отметить, что данные, полученные в результате замеров по описанному методу, могут не отражать истинную температуру нетронутого массива,

поскольку на них накладывается дополнительный искажающий фактор, связанный с изменением температуры породного массива вследствие эксплуатации горных выработок (влияние теплоты горного оборудования, температуры атмосферного воздуха и пр.).

Измерения температуры пород стенок горных выработок также могут нести в себе определенную погрешность, тем большую, чем длительнее эксплуатируется рассматриваемая горная выработка, чем выше скорость воздуха в выработке и чем выше разница температур между породным массивом и воздухом [3, 11]. Из существующих представлений о закономерностях теплопереноса в породах [12, 13] следует, что в горных выработках, удаленных от воздухоподводящих стволов и не имеющих техногенных источников тепловыделений, глубина тепловых возмущений обычно не превышает 1–2 м. Под глубиной тепловых возмущений понимается расстояние от стенки выработки вглубь массива, на котором температура породы испытывает существенные колебания вследствие теплообмена с воздухом в выработке.

Данный вывод указывает на возможность применения еще одного метода расчета фактической геотермической ступени для условий шахтного поля для Березовского рудника 1 РУ ОАО «Беларуськалий». Идея предлагаемого в работе метода заключается в том, чтобы исключить влияние фактора теплообмена воздуха с массивом путем прямых измерений температуры в термометрических шпурах, пробуренных на вентиляционных штреках рудника. Данные исследований позволят не только определить геотермическую ступень, но также провести анализ пространственного (вертикального и латерального) изменения температуры породного массива в пределах шахтного поля, а также повысить точность прогноза температуры в рабочих зонах подготовительных и очистных забоев.

По данным многочисленных исследований, изменение температуры пород с глубиной характеризуется незначительными отклонениями от линейной зависимости, что обычно объясняется тепловыми аномалиями, вызванными работой оборудования и различием теплопроводности пород. Наряду с местными тепловыми аномалиями, наблюдаются и аномальные термоявления (зоны местного увеличения температуры породного массива), вызванные воздействием водоносных горизонтов [14–16]. Различные тектонические нарушения также приводят к искажению теплового потока, поступающего из недр Земли. В любом регионе встречаются структуры, влияние которых на тепловое поле не всегда поддается простому решению. В таких случаях это влияние изучается моделированием и геотермическим исследованием районов [17, 18]. Это в меньшей степени справедливо для исследуемого в статье случая месторождения в осадочно-породном бассейне, однако несмотря на это исследование вопроса о величине латеральной изменчивости температуры пород имеет определенный научный интерес.

Согласно представленным в литературе [19] термометрическим исследованиям верхних слоев пород

для Припятского прогиба в Республике Беларусь, плотность теплового потока в окрестности г. Солигорск составляет 40–45 мВт/м². На рис. 1 представлена кривая геотермической ступени в окрестности г. Солигорск.

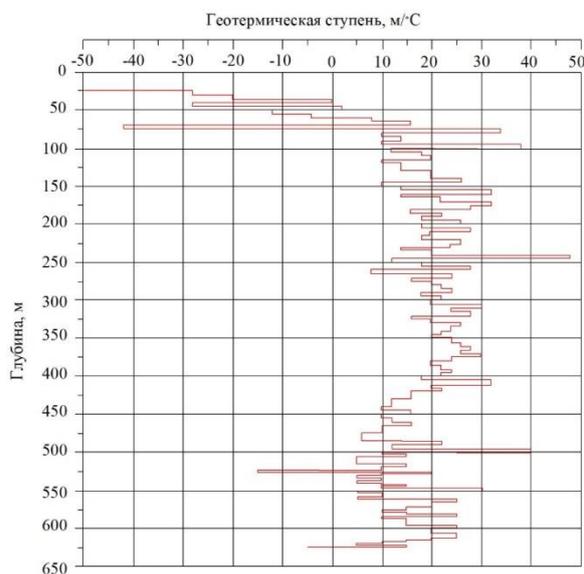


Рис. 1. Кривая геотермической ступени по скважине № 966 в окрестностях г. Солигорск

Fig. 1. Geothermal step plot for well no. 966 in the vicinity of Soligorsk city

В вышележащих слоях происходит монотонное возрастание значения геотермической ступени с глубиной. Залегающая ниже зоны пресных вод глинистомергельная толща является водоупором. В данном интервале геотермическая ступень принимает значения близкие к 27 м/°C в зависимости от наличия пропластков разного литологического состава. Ниже залегают каменная соль, обладающая высокой теплопроводностью, при этом геотермическая ступень в данной зоне снижается до значений 30 м/°C. При этом полученные данные не соответствуют данным температурных съемок на действующих рудниках ОАО «Беларуськалий». Для уточнения сведений о фактических тепловых свойствах пород в рамках рассматриваемой работы выполнено исследование температуры массива горных пород непосредственно на Березовском руднике 1 РУ.

Сведения об объекте исследования

Исследуемый в работе рудник относится к Старобинскому месторождению калийных солей. Упоминание о геотермической ступени месторождения приведено на карте геотермического градиента в верхней части земной коры на территории СССР [20]. Согласно карте, геотермическая ступень в окрестностях Минской области не превышает 66,6 м/°C.

Шахтное поле Березовского рудника 1 РУ расположено в центральной впадине северо-западной краевой части Шатилковской депрессии Припятского прогиба. Центральная впадина обладает асимметричной синклиальной формой. В структурном отноше-

нии поле относится к южному крылу центральной впадины. Залегание характеризуется падением продуктивных пластов в северо-восточном направлении. Угол падения составляет $1^{\circ}30'$. При этом рассматриваемый в работе III калийный горизонт относится к пластовой залежи моноклиналиного залегания, угол падения варьируется от 1° до 3° .

Район осложнён небольшими грядами и холмами при этом в целом обладает равнинным рельефом. Абсолютные отметки располагаются в диапазоне от 138 до 173 м.

Промышленный пласт рудника представлен каменной солью, сильвинитом и карналлитом, которые переслоены мергелями, алевролитами, доломитами. Исследуемый горизонт сложен тремя пластами:

- 1) верхним сильвинитовым (забалансовым);
- 2) глинисто-карналлитовым;
- 3) нижним сильвинитовым (промышленным).

Проведение эксперимента

В рамках работы проведены комплексные исследования температуры массива для рабочих зон подготовительных и очистных забоев Березовского рудника 1 РУ. Замеры температуры массива выполнялись в подготовительных и очистных забоях (рис. 2). Для решения задачи выполнено бурение шпуров в разных участках шахтного поля (рис. 3). Глубина бурения определена с учетом теплового влияния воздушных потоков на массив в программно-вычислительном комплексе «Аэросеть» на основе модели сопряженного теплообмена, описанной в [21]. По результатам

моделирования при теплообмене воздуха с температурой $+40^{\circ}\text{C}$ и стенок массива в течение 6 месяцев глубина тепловых возмущений не превышает 2 м. Под значимыми тепловыми возмущениями принималось изменение температуры на $0,1^{\circ}\text{C}$. На основании полученных данных минимальная глубина шпуров должна составлять 3 м. Предлагаемый запас позволит избежать влияния температуры воздуха на массив и получить достоверные значения температуры нетронутого массива.

Замер выполнялся не ранее чем через 48 часов после бурения для исключения тепловых возмущений от бурильных установок. В качестве средства измерения использовался одноканальный термометр testo 925 с подключенным высокоточным погружным зондом testo, с диапазоном измерений $-35...80^{\circ}\text{C}$ и абсолютной погрешностью до $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. В исследовании участвовали рабочие зоны подготовительных и очистных забоев (рис. 3). Для замера в пробуренный шпур помещался зонд. Корректным считался замер, при котором зонд погружен на всю глубину шпура, а показания прибора имеют неизменные значения в течение 30 минут. Время проведения одного замера составляло от 30 до 45 минут.

На рис. 3 указаны точки, где выполнялись замеры. Для исследования приняты рабочие зоны, рассредоточенные по разным частям шахтного поля. Это позволяет в перспективе получить наиболее достоверную картину о латеральной изменчивости температуры в пределах шахтного поля.

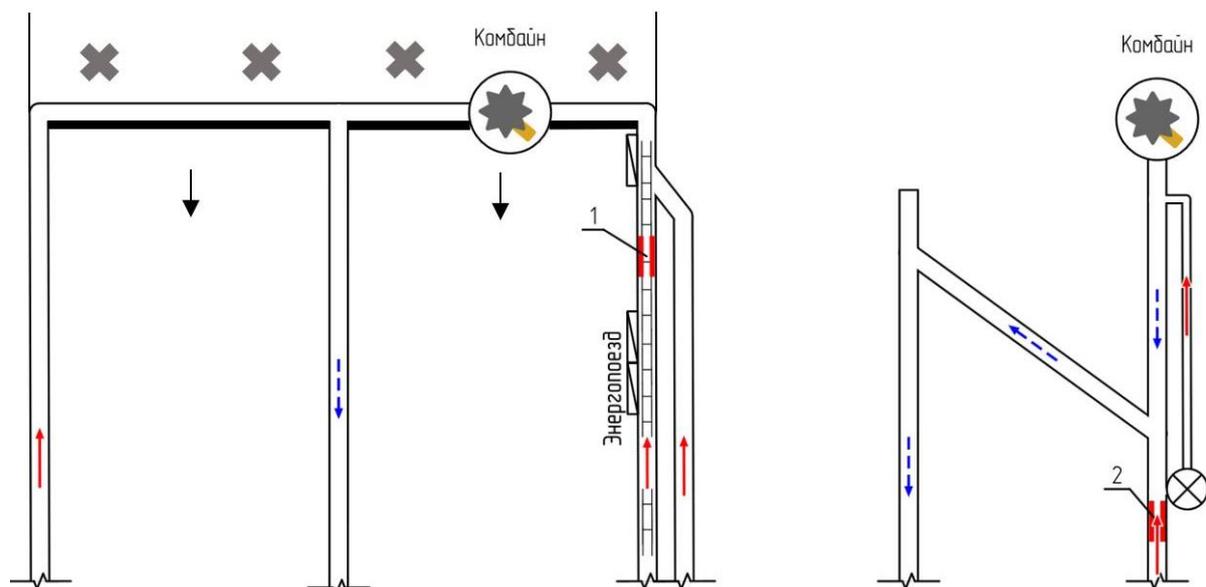


Рис. 2. Схема расположения замерных точек для очистных и подготовительных забоев (1 – конвейерный штрек лавы, 2 – транспортная выработка)

Fig. 2. Measurement points layout for breakage face and development heading (1 – belt entry longwall, 2 – haulage working)

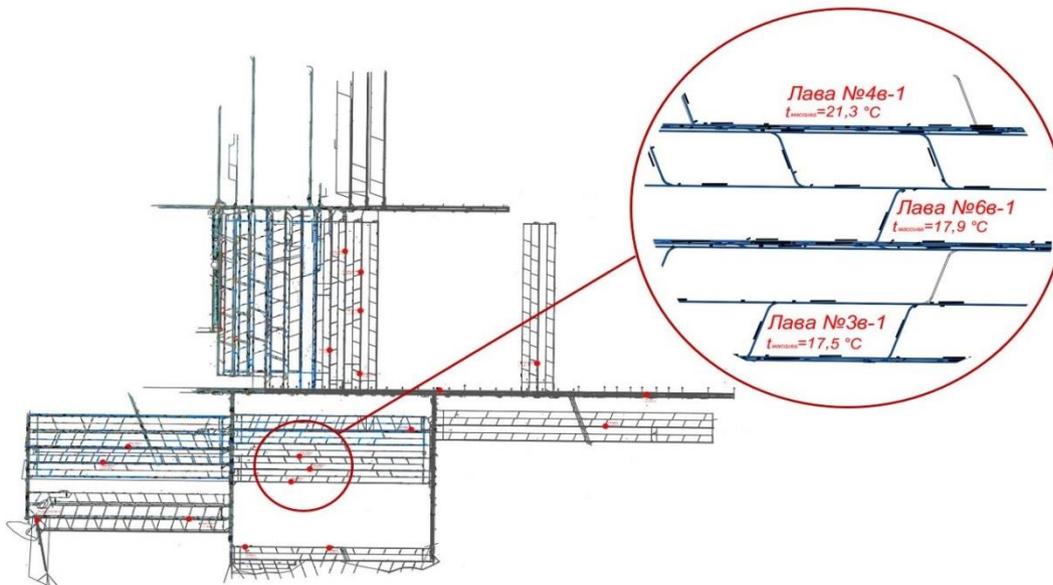


Рис. 3. Расположение замерных точек в пределах шахтного поля Березовского рудника 1 РУ
 Fig. 3. Measurement points layout within mine field of Berezovsky mine

Обработка результатов

Согласно общим представлениям [3] зависимость температуры массива горных пород от глубины имеет линейный характер (температура горных пород тем выше, чем больше глубина ведения горных работ).

На основании выполненных замеров построен график линейной аппроксимации температуры массива для подготовительных и очистных забоев как функции глубины ведения горных работ (рис. 4). Выбор линейной аппроксимации обусловлен тем, что на практике изменение температуры с глубиной чаще всего реализуется по линейной или кусочно-линейной зависимости [3].

Линейная аппроксимация производилась методом наименьших квадратов. Значения температур массива, полученные в большинстве очистных забоев лав, существенно превышают значения температур, полученных в подготовительных забоях (обозначены на рис. 4 как ПК). Коэффициент детерминации $R^2=0,401$, что говорит о слабой корреляции экспериментальных данных с вычисленной линейной аппроксимацией. Это связано с существенными тепловыми возмущениями от работающего оборудования в конвейерных штреках лав (привод конвейера, энергопоезд).

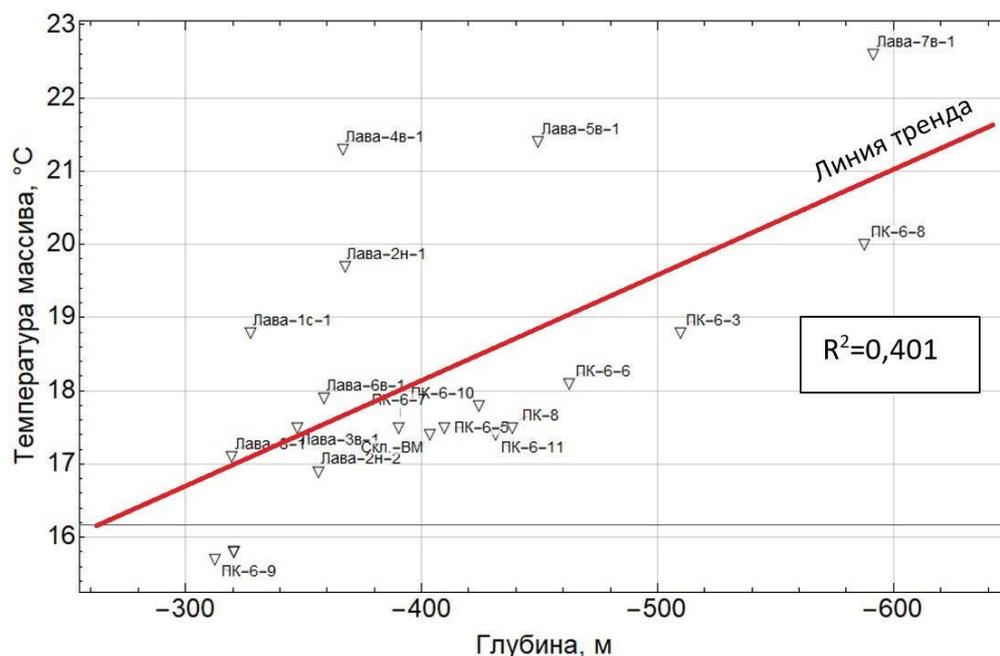


Рис. 4. График линейной аппроксимации температуры массива в зависимости от глубины ведения работ для подготовительных и очистных забоев

Fig. 4. Linear approximation of the temperature-depth relation for breakage face and development heading

Для исключения теплового возмущения от электрического оборудования построен график линейной аппроксимации температуры массива в зависимости от глубины ведения работ, учитывающий только подготовительные забои (рис. 5). Полученное значение коэффициента детерминации свидетельствует о высокой связи замеренных данных и линейной аппроксимации.

Полученная аппроксимирующая зависимость температуры массива от глубины имеет следующий вид:

$$t_{\Pi} = 11,0 - 0,015 \cdot z, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (2)$$

Абсолютное отклонение аппроксимирующей зависимости от экспериментальных данных составляет 0,64 °С, среднее отклонение – 0,2 °С.

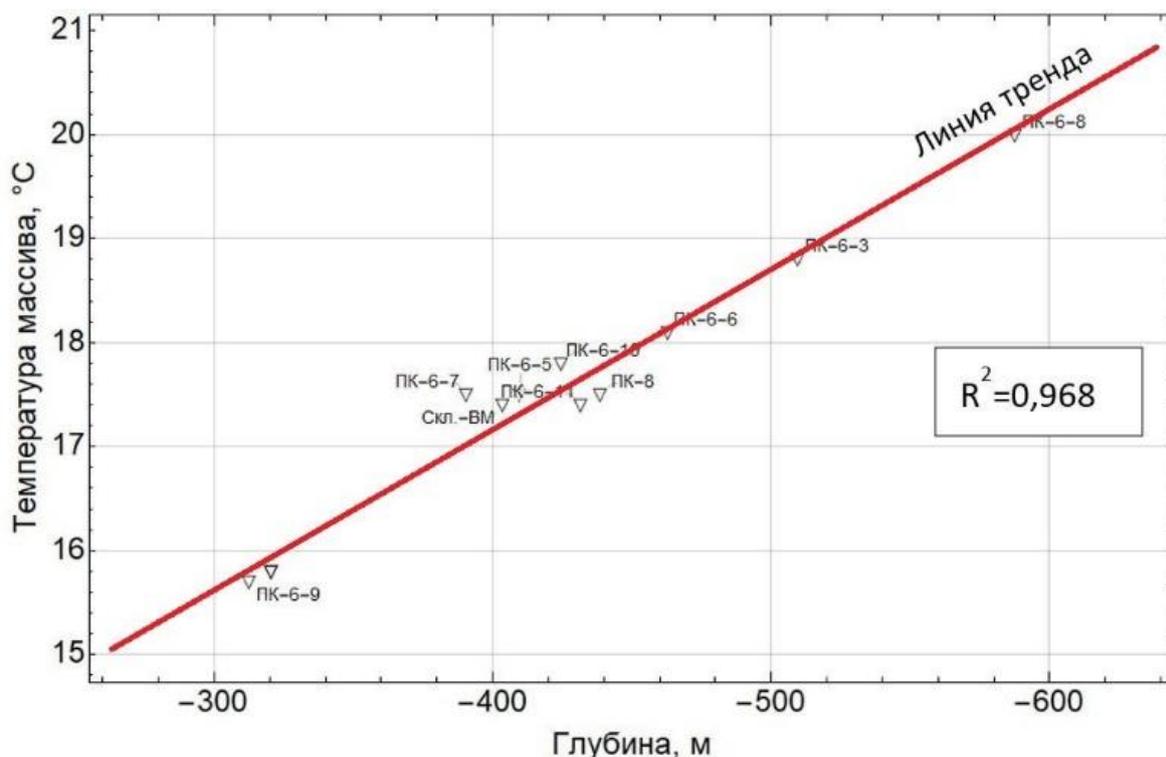


Рис. 5. График линейной аппроксимации температуры массива в зависимости от глубины ведения работ для подготовительных забоев

Fig. 5. Linear approximation of the temperature-depth relation for development heading

По результатам замеров в подготовительных забоях выполнен расчет геотермической ступени для Березовского рудника 1 РУ. В табл. 2 представлено сравнение полученного значения геотермической ступени со значе-

нием из «Инструкции по расчету количества воздуха, необходимого для проветривания рудников Старобинского месторождения» 2014 г., а также со значениями из других литературных источников.

Таблица 2. Сравнение геотермических ступеней

Table 2. Comparison of geothermal steps

Геотермическая ступень, м°С/Geothermal step, m°С			
Согласно инструкции по расчету требуемого количества воздуха (формула (1)) Value determined according to the instruction for calculating of the required amount of air (formula (1))	Согласно результатам термометрии по скважине № 966 в окрестностях г. Солигорск Value determined from results of thermometry in the well no. 966 near Soligorsk	Согласно карте геотермического градиента в верхней части земной коры на территории СССР Value from the map of the geothermal stage in the upper part of the earth's crust in the USSR	Согласно данным измерений в шпурах (формула (2)) Value determined according to the measured data in short holes (formula (2))
47,6	30,0	Менее 66,6/Less than 66,6	64,9

Из сравнения видно, что полученное значение геотермической ступени имеет более высокие значения, чем рассчитанное по формуле (1) из инструкции и полученное по данным термометрии по скважине № 966. При этом полученное значение вполне соответствует данным [17].

Кроме того, в рамках исследования построено распределение температур для горизонтального раз-

реза шахтного поля на глубине –391 м в координатах (x; y) (рис. 6).

В результате анализа получена зависимость изменения температуры массива от пространственных координат:

$$t = 8,03 + 0,0000046 \cdot x + 0,00018 \cdot y - 0,011 \cdot z,$$

где x, y, z – пространственные координаты.

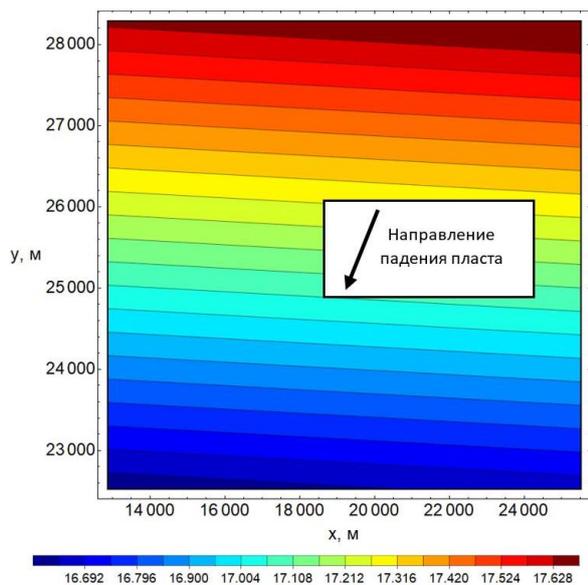


Рис. 6. Контурная карта температуры массива для глубины –391 м

Fig. 6. Contour map of the rock mass temperature for the depth of –391 m

Абсолютное отклонение полученной зависимости от экспериментальных данных равняется $0,58\text{ }^{\circ}\text{C}$, среднее отклонение – $0,22\text{ }^{\circ}\text{C}$. Величина коэффициента детерминации R^2 равна $0,97$, что свидетельствует о высокой связи замеренных данных и линейной аппроксимации.

Полученное поле температур зависит от всех трех координат, что указывает на наличие латеральной изменчивости, которая не может быть объяснена исключительно падением пласта. Это говорит о несправедливости классической гипотезы об идеально однородном поле в пределах рассматриваемой высотной отметки. Все это происходит по причине того, что в реальных условиях тепловой поток, теплопроводность пород, температура на границе геотермозоны различны в разных местах, а сама поверхность геотермозоны не является геометрически правильной. Это выражается в различии температур массива на одинаковых глубинах и, как следствие, неоднородности величины геотермической ступени в пределах одной глубины. Кроме того, при расчетах игнорируется влияние физико-химических и физико-механических процессов, происходящих в недрах Земли. К первым относятся химические реакции, ко вторым – деформация пород, перемещение геологических тел, конвективный перенос тепла.

Выводы

Выполненные исследования позволяют сформулировать следующие выводы:

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подвигни К.А. Анализ источников тепловыделения глубоких горизонтов угольных шахт // 6-я Международная научно-практическая конференция Инновационные перспективы Донбасса. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2020. – С. 60–75.

1. Величина геотермической ступени, полученная в результате замеров в разных частях шахтного поля Березовского рудника 1 РУ, составляет $64,9\text{ м}/^{\circ}\text{C}$, что выше данных, описанных в литературе ($\sim 30\text{--}40\text{ м}/^{\circ}\text{C}$), но в то же время согласуется с данными карты геотермического градиента в верхней части земной коры на территории СССР.
2. Температуры массива в районе очистных забоев в среднем имеют более высокие значения, чем температуры массива подготовительных забоев при одинаковых глубинах. Это свидетельствует о нагреве воздуха от работающего электрического оборудования, что влечет за собой нагрев породного массива в среднем на величину около $2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для получения достоверных результатов температуры нетронутого массива в зоне интенсивного ведения очистных работ необходимо увеличить глубину бурения шпуров. Для реализации данной цели рекомендуется провести дополнительное моделирование теплообменных процессов в очистных забоях.
3. На основании полученных результатов определена функция зависимости температуры массива для III калийного горизонта. Построены температурные карты шахтного поля. Полученные данные позволят прогнозировать температуры воздуха в рабочих зонах, проектировать системы вентиляции и кондиционирования воздуха в неблагоприятных микроклиматических условиях.
4. Температура массива в пределах рассмотренной высотной отметки обладает латеральной изменчивостью. Неоднородность температурного поля вызвана изменчивостью теплопроводности пород по высоте и, как следствие, изменчивостью локальных тепловых потоков.
5. В целом результаты работ показывают, что перспективным способом определения геотермической ступени для эксплуатируемых рудников, а также пространственного распределения температур является проведение экспериментальных исследований температуры массива в шпурах, пробуриваемых в различных участках шахтного поля. Данный подход позволяет устанавливать закономерности формирования и распределения температурного поля, выявлять вариации и аномалии, которые невозможно отследить при использовании расчетных формул, представленных в литературе.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от «29» декабря 2020 г.

2. Кормициков Д.С., Попов М.Д. Нормализация теплового режима глубоких залежей рудника «Таймырский» до момента ввода системы кондиционирования // Горное эхо. – 2019. – № 2. – С. 92–96.
3. Зайцев А.В. Научные основы расчета и управления тепловым режимом подземных рудников: дис. ... д-ра техн. наук. – Пермь, 2019. – 247 с.

4. Щербань А.Н., Кремнев С.А., Журавленко В.Я. Руководство по регулированию теплового режима шахт. – М.: Изд-во «Недра», 1977. – 359 с.
5. Semin M., Zaitsev A. On a possible mechanism for the water build-up formation in mine ventilation shafts // *Thermal Science and Engineering Progress*. – 2020. – V. 20. – № 100760.
6. Влияние условий труда на функциональное состояние персонала работников, занятых на добыче нефти термощахтным способом / О.Ю. Устинова, В.Г. Костарев, В.Б. Алексеев, Е.М. Власова, А.Е. Носов, А.В. Зайцев, Л.Ю. Левин // *Гигиена и санитария*. – 2020. – Т. 99. – № 11. – С. 1222–1229.
7. Wüst G. Thermometric measurement of depth // *The International Hydrographic Review*. – 1933. – V. 10. – № 1. – P. 28–49.
8. Brake D.J. Mine ventilation: a practitioner's manual. – Brisbane: Mine Ventilation. Australia Publ., 2012. – 686 p.
9. Powell R., Holland T. Optimal geothermometry and geobarometry // *American Mineralogist*. – 1994. – V. 79. – № 1–2. – P. 120–133.
10. Lasaga A.C. Geospeedometry: an extension of geothermometry // *Kinetics and equilibrium in mineral reactions*. – New York: Springer Publ., 1983. – P. 81–114.
11. Особенности формирования микроклиматических условий в горных выработках глубоких рудников / В.Н. Карелин, А.В. Кравченко, Л.Ю. Левин, Б.П. Казаков, А.В. Зайцев // *Горный журнал*. – 2013. – № 6. – С. 65–68.
12. McPherson M.J. The analysis and simulation of heat flow into underground airways // *International Journal of Mining and Geological Engineering*. – 1986. – V. 4. – № 3. – P. 165–195.
13. A review on experience feedback and numerical modeling of packed-bed thermal energy storage systems / T. Esence, A. Bruch, S. Molina, B. Stutz, J. Fourmigue // *Solar Energy*. – 2017. – V. 153. – P. 628–654.
14. Черемский Г.А. Прикладная геотермия. – Л.: Изд-во «Недра», 1977. – 224 с.
15. Тепловое поле на северо-востоке Украины / О.В. Арясова, В.В. Гордиенко, И.В. Гордиенко, О.В. Завгородняя // *Доповіді Національної академії наук України*. – 2011. – № 5. – С. 113–118.
16. Shangxian Y., Wen L. Geothermic mine water forming mechanism and integrated preventive technologies in Wutongzhuang Mine Area, China // *An Interdisciplinary Response to Mine Water Challenges* / Eds. W. Sui, Ya. Sun, Ch. Wang. – China, Xuzhou: University of Mining and Technology Press, 2014. – P. 666–670.
17. Геотермические условия осадочно-породных бассейнов земного шара / А.Н. Резников, С.М. Астахов, С.А. Резников, Д.А. Маллак // *Геология нефти и газа*. – 2013. – № 4. – С. 49–56.
18. Jessop A.M., Ghomshei M.M., Drury M.J. Geothermal energy in Canada // *Geothermics*. – 1991. – V. 20. – № 5–6. – P. 369–385.
19. Дубаневич М.А., Зуй В.И., Мартынова О.А. Геотермический Атлас Беларуси. – Минск: Национальная библиотека Беларуси, 2018. – 89 с.
20. Макаренко Ф.А., Поляк Б.Г., Сугробов В.М. Конвективное перераспределение тепла в пределах земной коры. – М.: Изд-во «Наука», 1970. – 70 с.
21. Левин Л.Ю., Семин М.А., Зайцев А.В. Разработка математических методов прогнозирования микроклиматических условий в сети горных выработок произвольной топологии // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2014. – № 2. – С. 154–161.

Поступила 17.06.2022 г.

Информация об авторах

Зайцев А.В., доктор технических наук, заведующий сектором отдела аэрологии и теплофизики Горного института УрО РАН.

Бородавкин Д.А., младший научный сотрудник отдела аэрологии и теплофизики Горного института УрО РАН.

Бублик С.А., младший научный сотрудник отдела аэрологии и теплофизики Горного института УрО РАН.

Агеева К.М., инженер отдела аэрологии и теплофизики Горного института УрО РАН.

UDC 622.253.35

STUDY OF ROCK TEMPERATURE DISTRIBUTION IN THE BEREZOVSKY MINE FIELD OF BELARUSKALI COMPANY

Artem V. Zaitsev¹,
aerolog.artem@gmail.com

Dmitry A. Borodavkin¹,
borodavkin.dmitriy@gmail.com

Sergey A. Bublik¹,
serega-bublik@mail.ru

Ksenia M. Ageeva¹,
kmageeva@gmail.com

¹ Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
78a, Sibirskaya street, Perm, 614007, Russia.

The relevance. An increase in the depth of mining leads to a natural growth in the temperature of rocks and air temperature in the working areas. The most effective measure to reduce air temperatures is the use of air conditioning systems. The availability of data on the thermal properties of rocks at the stage of pre-design study makes it possible to avoid unreasonable reserves of refrigeration equipment capacity, reducing capital and operating costs.

The main aim of the research is to study rock temperature distribution in the Berezovsky mine field of Belaruskali company to determine a geothermal step.

Object of the research is the Berezovsky mine field of Belaruskali company.

Methods of the study include experimental measurements of the temperature of rocks in boreholes drilled in mine workings at different depths, statistical data processing, and approximation of the temperature field as a function of spatial coordinates.

Results. The temperatures of the virgin rock mass are investigated, an approximating dependence of the expected temperature of rocks at a given depth is obtained. The value of the geothermal step obtained in the course of the study was 64,9 m/°C. This value exceeds the values that were calculated according to the instructions for calculating the required amount of air for the mine and the previous data on the well thermometry. At that, the obtained value corresponds to the data on the map of the geothermal stage in the upper part of the earth's crust in the USSR. The study of rock mass temperature for horizontal section of the mine field shows that temperature depends significantly on all three coordinates. This indicates the presence of lateral variability of the temperature field, which cannot be explained solely by seam gradient.

Key words:

Mine, coefficient of determination, geothermy, geothermal step, thermal and humidity survey of working areas, rock mass temperature, thermal conditions.

The research was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the agreement on the State task no. 075-03-2021-374, «29» December 2020.

REFERENCES

- Podvigin K.A. Analiz istochnikov teplovydeleniya glubokikh gorizontov ugolnykh shakht [Analysis of sources of heat release in deep horizons of coal mines]. 6-ya Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya. *Innovatsionnye perspektivy Donbassa* [6th International Scientific and Practical Conference. Innovative Prospects of Donbass]. Donetsk, Donetsk National Technical University Publ., 2020. pp. 60–75.
- Kormshchikov D.S., Popov M.D. Normalizatsiya teplovogo rezhima glubokikh zalezhey rudnika «Taymyrskiy» do momenta vvoda sistemy konditsionirovaniya [Normalization of the thermal regime of the deep deposits of the Taimyrsky mine until the commissioning of the air conditioning system]. *Gornoe echo*, 2019, no. 2, pp. 92–96.
- Zaitsev A.V. *Nauchnye osnovy rascheta i upravleniya teplovym rezhimom podzemnykh rudnikov*. Diss. Dokt. nauk [Scientific bases of calculation and management of thermal regime of underground mines. Dr. Diss.]. Perm, 2019. 247 p.
- Shcherban A.N., Kremnev S.A., Zhuravlenko V.Ya. *Rukovodstvo po regulirovaniyu teplovogo rezhima shakht* [Guidelines for regulating the thermal regime of mines]. Moscow, Nedra Publ., 1977. 359 p.
- Semin M., Zaitsev A. On a possible mechanism for the water build-up formation in mine ventilation shafts. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2020, vol. 20, no. 100760.
- Ustinova O.Yu., Kostarev V.G., Alekseev V.B., Vlasova E.M., Nosov A.E., Zaitsev A.V., Levin L.Yu. The impact of working conditions on the functional state of employees in thermoshaft oil production. *Hygiene and Sanitation*, 2020, vol. 99, no. 11, pp. 1222–1229. In Rus.
- Wüst G. Thermometric measurement of depth. *The International Hydrographic Review*, 1933, vol. 10, no. 1, pp. 28–49.
- Brake D.J. *Mine ventilation: a practitioner's manual*. Brisbane, Mine Ventilation. Australia Publ., 2012. 686 p.
- Powell R., Holland T. Optimal geothermometry and geobarometry. *American Mineralogist*, 1994, vol. 79, no. 1–2, pp. 120–133.
- Lasaga A.C. *Geospeedometry: an extension of geothermometry. Kinetics and equilibrium in mineral reactions*. New York, Springer Publ., 1983. pp. 81–114.
- Karelin V.N., Kravchenko A.V., Levin L.Yu., Kazakov B.P., Zaitsev A.V. Features of forming microclimatic conditions in mining excavations of deep mines. *Gorny zhurnal*, 2013, no. 6, pp. 65–68. In Rus.
- McPherson M.J. The analysis and simulation of heat flow into underground airways. *International Journal of Mining and Geological Engineering*, 1986, vol. 4, no. 3, pp. 165–195.

13. Esence T., Bruch A., Molina S., Stutz B., Fourmigue J. A review on experience feedback and numerical modeling of packed-bed thermal energy storage systems. *Solar Energy*, 2017, vol. 153, pp. 628–654.
14. Cheremenskiy G.A. *Prikladnaya geotermiya* [Applied geothermy]. Leningrad, Nedra Publ., 1977. 224 p.
15. Aryasova O. V., Gordienko V.V., Gordienko I.V., Zavgorodnyaya O.V. Heat field on the north-east of Ukraine. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 2011, no. 5, pp. 113–118. In Rus.
16. Shangxian Y., Wen L. Geothermic mine water forming mechanism and integrated preventive technologies in Wutongzhuang Mine Area, China. *An Interdisciplinary Response to Mine Water Challenges*. Eds. W. Sui, Ya. Sun, Ch. Wang. China, Xuzhou, University of Mining and Technology Press Publ., 2014. pp. 666–670.
17. Reznikov A. N., Astahov S.M., Reznikov S.A., Mallak D.A. Geothermal regime of the world sedimentary basins. *Oil and gas geology*, 2013, no. 4, pp. 49–56. In Rus.
18. Jessop A.M., Ghomshei M.M., Drury M.J. Geothermal energy in Canada. *Geothermics*, 1991, vol. 20, no. 5–6, pp. 369–385.
19. Dubanevich M.A., Zuy V.I., Martynova O.A. *Geotermicheskiy Atlas Belarusi* [Geothermal Atlas of Belarus]. Minsk, National Library of Belarus Publ., 2018. 89 p.
20. Makarenko F.A., Polyak B.G., Sugrobov V.M. *Konvektivnoe pereraspredelenie tepla v predelakh zemnoy kory* [Convective redistribution of heat within the Earth's crust]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 70 p.
21. Levin L.Y., Semin M.A., Zaitsev A.V. Mathematical methods of forecasting microclimate conditions in an arbitrary layout network of underground excavations. *Journal of Mining Science*, 2014, vol. 50, no. 2, pp. 371–378.

Received: 17 June 2022.

Information about the authors

Artem V. Zaitsev, Dr. Sc., head of the sector of the department, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Dmitry A. Borodavkin, post-graduate student, junior researcher, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Sergey A. Bublik, post-graduate student, junior researcher, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Ksenia M. Ageeva, engineer, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

УДК 622.276.63

ОБОСНОВАНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ИЗВИЛИСТОСТИ ПОРОВЫХ КАНАЛОВ КОЛЛЕКТОРОВ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ПО ДАННЫМ КАПИЛЛЯРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Ахметов Расуль Тухбатуллович¹,
info@of.ugntu.ru

Кулешова Любовь Сергеевна¹,
markl212@mail.ru

Велиев Эльчин Фикрет оглы²,
elchinf.veliyev@socar.az

Мухаметшин Вячеслав Вячеславович³,
vv@of.ugntu.ru

Сафиуллина Альбина Ринатовна¹,
safullina.a.r@yandex.ru

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет в г. Октябрьском, Россия, 452607, г. Октябрьский, ул. Девонская, 54а.

² НИПИ «Нефтегаз», SOCAR, Азербайджан, AZ1012, г. Баку, пр. Гасан-бека Зардаби, 88А.

³ Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

Актуальность. Гидравлическая извилистость оказывает существенное влияние на фильтрационные параметры пласта-коллектора. Исследование и создание аналитической модели гидравлической извилистости имеет важное значение для повышения достоверности и точности определения абсолютной и фазовой проницаемостей коллекторов нефти и газа.

Цель: совершенствование математической модели абсолютной и фазовой проницаемости на основе данных капилляриметрических исследований для использования при компьютерном моделировании разработки.

Объекты: продуктивные пласты юрского и нижнемелового возраста отдельных месторождений Западной Сибири.

Методы: статистическая обработка данных капилляриметрических исследований, анализ и обоснование математической модели гидравлической извилистости поровых каналов пластов-коллекторов.

Результаты. В соответствии с электрогидродинамической аналогией при обосновании аналитической модели гидравлической извилистости предлагается использовать электрическую извилистость, которая достаточно хорошо получена специалистами-геофизиками для следующих моделей геометрии пустотного пространства пород-коллекторов нефти и газа: 1) совокупность капилляров различного поперечного сечения; 2) простая гантельная модель, в которой извилистость определяется сужением и расширением сечений поровых каналов; 3) сложная гантельная модель, при которой происходят изменения не только сечения, но и реальной длины поровых каналов. На основе анализа математических моделей для сред с различной геометрией установлено, что электрическая извилистость выражается обратной степенной функцией от коэффициента открытой пористости. Отмечается, что если электрическая извилистость определяется коэффициентом открытой пористости, то гидравлическая извилистость – той частью пористости, по которой происходит движение флюида: для водонасыщенного коллектора – эффективная пористость, а для продуктивного пласта – динамическая пористость. В условиях Западной Сибири для любого месторождения на коллекции образцов керна в лабораторных условиях получают капиллярные характеристики, а также пористость и проницаемость продуктивного пласта. Далее путём комплексной статистической обработки данных капилляриметрии и фильтрационно-ёмкостных характеристик пласта определяют параметры аналитической модели извилистости. В работе показано, что использование предлагаемой аналитической модели гидравлической извилистости поровых каналов существенно повышает достоверность и точность определения абсолютной проницаемости по данным капилляриметрических исследований.

Ключевые слова:

Гидравлическая извилистость, капилляриметрические исследования, абсолютная проницаемость, поровые каналы, гантельная модель.

Введение

Известно, что коэффициент проницаемости пород-коллекторов нефти и газа во многом определяет степень выработки запасов, динамику добычи и, как следствие, рентабельность разработки месторождений [1–7].

Определение этого важного параметра, характеризующего геолого-физические свойства пластов, проводится по результатам гидродинамических, геофизических и лабораторных исследований. При этом погрешности определения проницаемости в отдельных случаях могут быть довольно значительными [8–12]. Зачастую определение проницаемости проводится в

недостаточных объемах по причинам организационного и финансового характера [13–17], что приводит к широкому использованию косвенных оценок для решения задач анализа проектирования, мониторинга и регулирования процесса добычи нефти [18–23], а также к использованию метода аналогий [24–29].

Такой подход может также приводить к значительным рискам принятия ошибочных управляющих решений [30–35].

В связи с этим для повышения достоверности и точности определения абсолютной проницаемости продуктивных пластов Западной Сибири по данным капилляриметрических исследований проведено изучение влияния извилистости поровых каналов на изменение значений этого важного геолого-физического параметра пород-коллекторов.

Методы и материалы

Под извилистостью понимается отклонение действительной длины пути фильтрационного потока (электрического тока) от длины образца горной породы [36].

По А. Ханину извилистость – это соотношение между видимой и реальной величиной пути движения флюида или соотношение между самым широким и самым узким размером порового канала [37].

Извилистость поровых каналов создает дополнительное сопротивление движению жидкостей и газов в коллекторе и, соответственно, снижает его проницаемость. Извилистость влияет на процесс вытеснения нефти водой: чем больше извилистость, тем меньше коэффициент вытеснения.

Кроме того, гидравлическая извилистость оказывает существенное влияние на относительные фазовые проницаемости для нефти и воды.

Очевидно, практический интерес представляет извилистость поровых каналов, по которым происходит фильтрация флюидов, то есть гидравлическая извилистость. Однако в соответствии с электрогидродинамической аналогией, вместо гидравлической (T_f) можно использовать электрическую извилистость (T_e). Однако при этом необходимо иметь в виду, что размеры поровых каналов при фильтрации жидкости и движении электрического тока различаются. Это связано с тем, что остаточная вода не участвует в движении флюидов, хотя она является проводником электрического тока.

Кроме того, в продуктивных пластах не только остаточная вода, но и остаточная нефть являются неподвижными.

Понятие электрической извилистости введено специалистами-геофизиками и исследовано в условиях простейших моделей пород-коллекторов.

Результаты и обсуждения

Рассмотрим математические выражения для электрической извилистости для отдельных моделей пород-коллекторов.

1. Модель пучка капилляров различного сечения.

Возьмем единичный куб горной породы, пронизанный капиллярными трубками различного сечения. Пусть поровые каналы (капилляры) полностью заполнены пластовой водой удельного сопротивления $\rho_{в}$.

Пусть все капилляры имеют продольную (змейвидную) извилистость. Поскольку мы взяли единичный куб породы, длина каждого капилляра численно равна коэффициенту извилистости T_0 .

Тогда удельное сопротивление водонасыщенной породы $\rho_{вп}$ равно:

$$\rho_{вп} = \rho_{в} \frac{T_0}{\sum_{i=1}^n S_i}, \quad (1)$$

где n – общее число капилляров; S_i – сечения капиллярных трубок.

С другой стороны:

$$P_{п} = \frac{\rho_{вп}}{\rho_{в}},$$

где $P_{п}$ – параметр пористости.

Поэтому формулу (1) можно преобразовать к следующему виду:

$$\sum_{i=1}^n S_i = T_0 \cdot P_{п}^{-1}. \quad (2)$$

Теперь определим коэффициент пористости единичного куба породы $K_{п}$:

$$K_{п} = T_0 \sum_{i=1}^n S_i.$$

Если в последней формуле вместо суммы сечений капилляров подставить ее значение в соответствии с формулой (2), то окончательно получим:

$$T_0^2 = P_{п} K_{п}. \quad (3)$$

Таким образом, квадрат продольной извилистости равен произведению параметров пористости на коэффициент пористости. Данная формула (3) впервые была предложена В.Н. Дахновым [38].

В соответствии с формулой Арчи–Дахнова, параметр пористости определяется как:

$$P_{п} = \frac{a_0}{K_{п}^{m_0}},$$

где a_0 и m_0 – постоянные величины для данного пласта-коллектора.

Поэтому окончательно получим формулу (4):

$$T_0^2 = \frac{a_0}{K_{п}^{m_0-1}}. \quad (4)$$

2. Гантельная модель.

В данном случае каждый поровой канал представлен чередованием капилляров большого (S_6) и малого (S_m) сечения. Капилляры большого сечения моделируют поры, а малого сечения – межпоровые сужения. При этом предполагается, что видимая и реальная длина капилляров совпадают, то есть продольная извилистость (T_0) равна единице [39].

Для соотношения сечений в работе [40] получена следующая формула (5):

$$\frac{S_6}{S_m} = 1 + \frac{P_{п1} K_{п} - 1}{p(1-p)} \approx \frac{P_{п1} K_{п}}{p(1-p)}, \quad (5)$$

где p – линейная доля межпоровых сужений; $(1-p)$ – линейная доля пор. Причем, как показано в работах [41, 42], $p \approx 1 - \sqrt[3]{K_{п}}$; $1-p \approx \sqrt[3]{K_{п}}$.

Непосредственные расчеты показывают, что произведение $p \cdot (1-p) \approx 0,25$.

Очевидно, соотношение S_6/S_m определяет квадрат поперечной извилистости (T_1^2) поровых каналов. Поэтому получим формулу (6):

$$T_1^2 \approx 4P_{п1}K_{п1} = \frac{4a_1}{K_{п1}^{m_1-1}}, \quad (6)$$

где a_1 и m_1 – постоянные величины.

3. Гантельная модель с продольной извилистостью.

В данном случае поровые каналы обладают извилистостью как в направлении движения тока, так и в поперечном направлении из-за изменчивости сечения каналов.

Если известны линейные доли микро- и макрокапилляров, то для гантельной модели, обладающей продольной извилистостью, можно написать следующие уравнения:

$$\left[\frac{p}{S_M} + \frac{1-p}{S_6} \right] \frac{T_0}{N_f} = P_{п2},$$

$$[pS_M + (1-p)S_6]T_0N_f = K_{п1},$$

где T_0 – продольная извилистость; N_f – число капилляров на единицу площади (площадная плотность капилляров).

Если почленно перемножить обе части этих уравнений, то для соотношения сечений получим следующее выражение:

$$\frac{S_6}{S_M} = 1 + \frac{P_{п2}K_{п1}-1}{p(1-p)}.$$

Данную формулу можно преобразовать в следующую формулу:

$$T_2^2 \approx \frac{4P_{п2}K_{п1}}{T_0^2}. \quad (7)$$

Здесь нами принято во внимание, что $p(1-p) \approx 0,25$.

Поскольку $P_{п2} = \frac{a_2}{K_{п2}^{m_2}}$, где a_2 и m_2 – постоянные величины, формула (7) приводится к следующему виду:

$$T_2^2 = \frac{4a_2}{K_{п2}^{m_2-1}} \frac{a_0}{K_{п0}^{m_0-1}} = 4 \frac{a_2/a_0}{K_{п2}^{m_2-1} K_{п0}^{m_0-1}}.$$

Таким образом, для всех рассмотренных моделей пустотного пространства структура математической модели для извилистости поровых каналов практически неизменна и имеет следующий вид:

$$T_3^2 = P_{п3}K_{п3} = \frac{a}{K_{п3}^{m-1}},$$

где a и m – постоянные величины для данного пласта-коллектора.

Очевидно, формула для гидравлического параметра пористости имеет такую же структуру, но отличается величиной параметров a и m . Кроме того, при расчете гидравлического параметра необходимо использовать не открытую пористость, а лишь ту часть пористости, по которой происходит фильтрация флюида: для водоносного пласта – эффективная пористость, для нефтеносного – динамическая пористость.

Таким образом, формула для гидравлической извилистости должна иметь следующий вид:

- $P_{п2} = \frac{a_r}{K_{п2}^{m_r}}$ – для водонасыщенной породы,

где $K_{п2} = K_{п1}(1-K_{во})$; a_r и m_r – постоянные величины для данного пласта; $K_{во}$ – остаточная водонасыщенность;

- $P_{п2} = \frac{a}{K_{п2}^{m_2}}$ – для нефтенасыщенной породы,

где $K_{п2} = K_{п1}(1-K_{во}-K_{но})$; $K_{но}$ – остаточная нефтенасыщенность.

Рассмотрим методику расчета гидравлической извилистости пластов-коллекторов Западной Сибири по данным капиллярных исследований

Для расчета коэффициента проницаемости по данным капиллярных исследований в работе предлагается следующая формула В. Парселля [43]:

$$K_{пр} = \frac{K_{п1}}{8T_r^2} (2\sigma \cos \theta)^2 \int_{K_{во}}^{1,0} \frac{dK_B}{p^2(K_B)}, \quad (8)$$

где $K_{п1}$ – пористость; T_r – гидравлическая извилистость; K_B – текущая водонасыщенность; $K_{во}$ – остаточная водонасыщенность; σ – поверхностное натяжение; θ – угол смачивания; p – капиллярное давление.

Следует отметить, что в формуле Парселля использован литологический коэффициент λ , но мы воспользуемся коэффициентом извилистости, то есть величиной, обратной литологическому коэффициенту.

Для расчета коэффициента проницаемости по формуле (8) воспользуемся аппроксимацией кривых капиллярного давления, предложенной исследователями Брукс–Кори [44]:

$$K_B = K_{во} + (1 - K_{во}) \left(\frac{p_0}{p_K} \right)^\alpha, \quad (9)$$

где p_K – капиллярное давление; p_0 – начальное капиллярное давление, соответствующее началу процесса вытеснения при капилляриметрии; α – показатель крутизны капиллярных кривых.

Из формулы (9) выразим капиллярное давление как функцию текущей водонасыщенности:

$$p_K = p_0 \left(\frac{K_B - K_{во}}{1 - K_{во}} \right)^{\frac{1}{\alpha}}.$$

Примем следующие обозначения: $K_B^* = \left(\frac{K_B - K_{во}}{1 - K_{во}} \right)$ – нормированная водонасыщенность, $b = \frac{1}{\alpha}$ – показатель неоднородности поровых каналов по размерам.

Тогда получим простую формулу:

$$p_K = p_0 (K_B^*)^b.$$

Вычислим интеграл в формуле (8). Для этого сделаем замену переменных:

$$K_B^* = \left(\frac{K_B - K_{во}}{1 - K_{во}} \right).$$

Тогда $dK_B = (1 - K_{во})dK_B^*$.

Причем при $K_B = K_{во}$ имеем $K_B^* = 0$, а при $K_B = 1,0$ имеем $K_B^* = 1$.

Тогда

$$\int_{K_{во}}^{1,0} \frac{dK_B}{p_0^2 K_B^{2b}} = \frac{(1-K_{во})}{p_0^2} \int_0^1 \frac{dK_B^*}{(K_B^*)^{2b}} = \frac{1-K_{во}}{p_0^2(1-2b)}.$$

Теперь подставим выражение для интеграла в формулу (8):

$$K_{пр} = \frac{K_{п1}(1-K_{во})(2\sigma \cos \theta)^2}{8T_r^2 p_0^2 (1-2b)}.$$

Если обозначить $S = \frac{(2\sigma \cos \theta)^2}{p_0^2(1-2b)}$, $K_{п3} = K_{п1}(1-K_{во})$, то получим:

$$K_{пр} = \frac{K_{п3}S}{8T_r^2}. \quad (10)$$

Выше нами было показано, что гидравлическая извилистость водонасыщенных пород выражается формулой:

$$T_r^2 = \frac{a}{K_{п.э}^m}$$

Тогда формула (10) приобретает следующий вид:

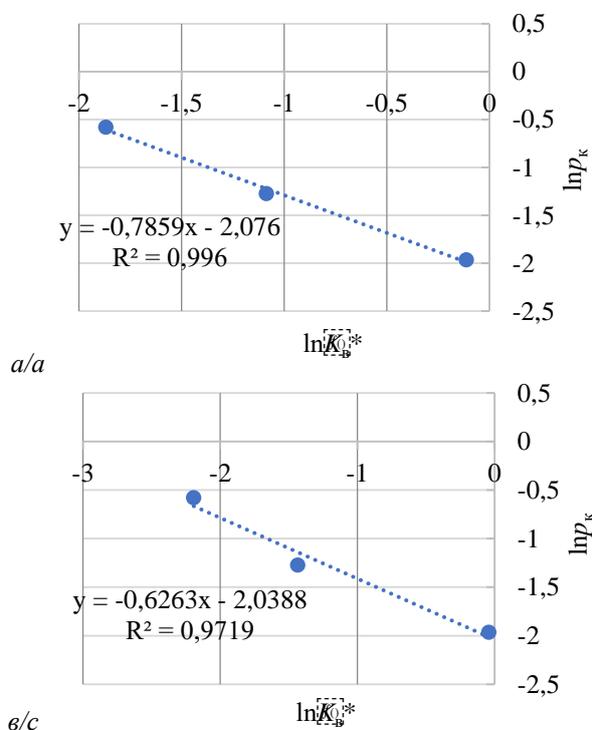
$$K_{пр} = \frac{(K_{п.э})^{m+1} S}{8a} = A(K_{п.э})^{m+1} S,$$

где $A = \frac{1}{8a}$.

Для определения параметров гидравлической извилистости данную формулу почленно разделим на S и прологарифмируем:

$$\ln \frac{K_{пр}}{S} = \ln A + (m + 1) \ln K_{п.э}.$$

В результате в логарифмической системе координат мы получим линейное уравнение, которое позволяет определить параметры коэффициента гидравлической извилистости.



На рис. 1 представлены примеры сопоставления капиллярного давления и нормированной водонасыщенности в логарифмической системе координат для отдельных образцов зерна из пласта БВ10 Северо-Поточного месторождения.

При этом каждая точка графика соответствует фиксированному значению капиллярных давлений: 0,014; 0,028; 0,056 МПа.

Как видно из рисунка, в логарифмической системе координат кривые капиллярного давления с хорошей точностью преобразуются в прямые линии.

Очевидно, свободный член уравнения регрессии соответствует логарифму начального давления p_0 , угловой коэффициент – параметру « b ».

Такие построения графиков сопоставления капиллярного давления с нормированной водонасыщенно-

стью необходимы для всех исследованных образцов. И для каждого образца следует рассчитать значение интеграла по формуле:

$$S = \frac{(2\sigma \cos \theta)^2}{p_0^2(1-2b)}. \quad (11)$$

Далее строят график сопоставления логарифма соотношения $K_{пр}/S$ от логарифма эффективной пористости и по коэффициентам уравнения регрессии определяют константы A и m .

Окончательно математическая модель гидравлической извилистости для рассматриваемого объекта имеет следующий вид:

$$T_r = \frac{a}{K_{п.э}^{m-1}},$$

где $a = \frac{1}{8} e^{(-A)}$.

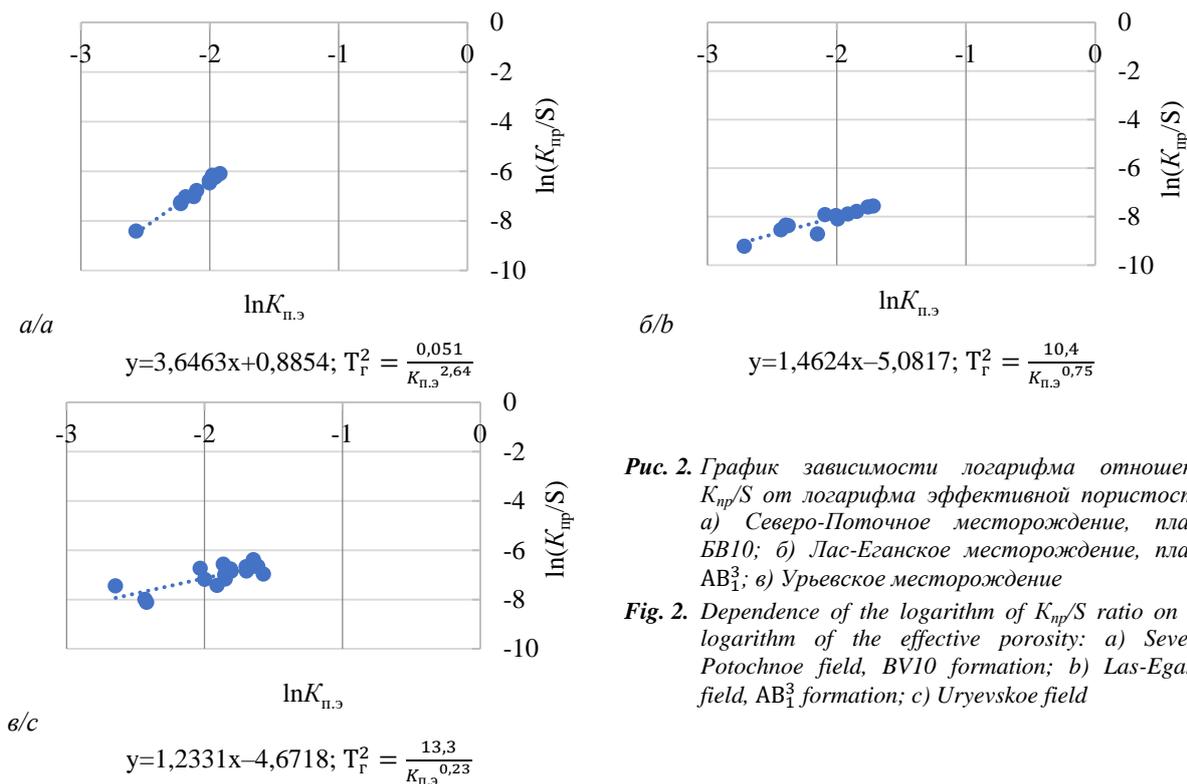


Рис. 2. График зависимости логарифма отношения $K_{пр}/S$ от логарифма эффективной пористости: а) Северо-Поточное месторождение, пласт БВ10; б) Лас-Еганское месторождение, пласт АВ₁³; в) Урьевское месторождение

Fig. 2. Dependence of the logarithm of $K_{пр}/S$ ratio on the logarithm of the effective porosity: а) Severo-Potochnoe field, BV10 formation; б) Las-Egansk field, AV₁³ formation; в) Uryevskoe field

На рис. 2 представлены графики зависимости отношения $K_{пр}/S$ от эффективной пористости для трёх разных месторождений Западной Сибири в логарифмической системе координат: Северо-Поточное, Лас-Еганское, Урьевское месторождения.

Как следует из рассмотрения графиков, корреляционная связь между указанными параметрами достаточно хорошая и вполне может быть использована для расчёта гидравлической извилистости. Там же даны уравнения регрессии для графиков сопоставления и математические модели для гидравлической извилистости.

Для проверки достоверности полученных моделей гидравлической извилистости оценим точность определения абсолютной проницаемости с использованием этих математических моделей.

Подставим в формулу (10) выражение для математической модели гидравлической извилистости для данного месторождения. Тогда получим:

$$K_{пр.р} = \frac{(K_{п.э})^{m+1} S}{8a},$$

где $K_{пр.р}$ – расчётное значение абсолютной проницаемости; a и m – параметры модели, численные значения которых известны для данного месторождения; S – величина интеграла, вычисленная для каждого образца по кривым капиллярного давления по формуле (11).

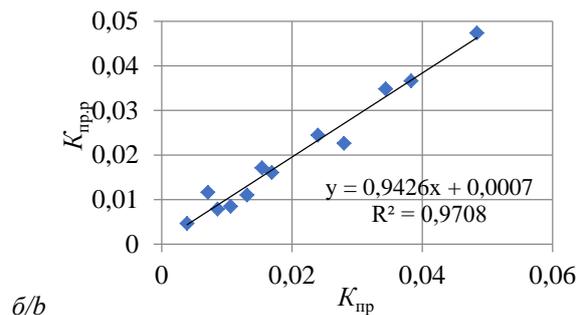
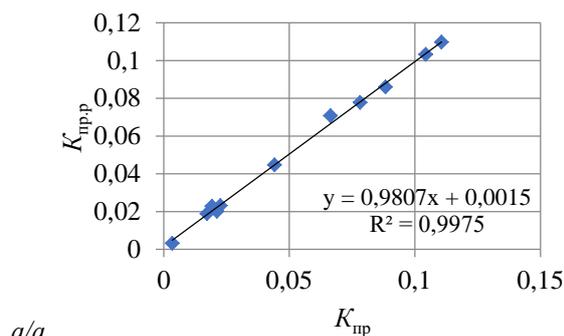
На рис. 3 представлены результаты сопоставления расчётных значений абсолютной проницаемости и экспериментальных значений, полученных в лабораторных условиях для каждого образца ядра для нескольких месторождений Западной Сибири.

Из рассмотрения графиков сопоставления следует, что расчётные и экспериментальные значения проницаемости хорошо согласуются друг с другом, причём коэффициенты корреляции превышают 0,95.

На основании этого можно сделать вывод о том, что предлагаемая модель гидравлической извилистости вполне удовлетворительно описывает реальную структуру пустотного пространства коллекторов Западной Сибири.

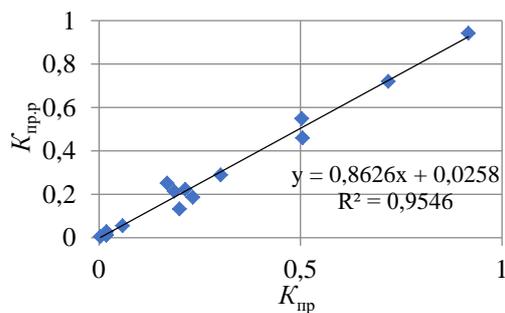
Выводы

1. В соответствии с электрогидродинамической аналогией структура математической модели гидравлической извилистости аналогична структуре модели электрической извилистости.
2. Как электрическая, так и гидравлическая извилистость определяются величиной пористости, по которой происходит движение электрического тока или фильтрационного потока. При электрической извилистости это открытая пористость. При гидравлической извилистости величина пористости зависит от характера насыщения пласта: в водонасыщенном пласте – эффективная пористость, в продуктивном пласте – динамическая пористость.
3. Учёт влияния гидравлической извилистости резко повышает точность и достоверность определения абсолютной проницаемости пластов-коллекторов нефти по данным капилляриметрических исследований. Расчётные и экспериментальные значения проницаемости хорошо коррелируются, причём коэффициент корреляции превышает 0,95.



a/a

b/b



в/с

Рис. 3. Сопоставление расчетных и экспериментальных значений абсолютной проницаемости: а) Северо-Поточное месторождение, пласт BV10; б) Лас-Еганское месторождение, пласт АВ₁; в) Урьевское месторождение

Fig. 3. Comparison of absolute permeability calculated and experimental values: a) Severo-Potochnoe field, BV10 formation; b) Las-Egansk field, AB₁ formation; c) Uryevskoe field

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диагностические критерии выделения фильтрационных потоков в процессе гидродинамических исследований горизонтальных скважин / В.Л. Сергеев, В.Х. Донг, Д.Э. Хагай, А.В. Игнатенко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 2. – С. 181–187. DOI: 10.18799/24131830/2020/2/2504.
2. Определение объемного коэффициента сетки скважин для оценки конечного коэффициента нефтеизвлечения при разработке залежей нефти горизонтальными скважинами / И.Н. Хакимзянов, В.Ш. Мухаметшин, Р.Н. Бахтизин, Р.И. Шешдилов // SOCAR Proceedings. – 2021. – № 2. – С. 47–53. DOI: 10.5510/OGP20210200495.
3. Шелепов В.В., Тюкавкина О.В. Геофизические методы определения коллекторских свойств сложнопостроенных нижне-среднеюрских залежей в пределах месторождений широтного Приобья // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2020. – № 1. – С. 37–41. DOI: 10.33623/0579-9406-2020-1-37-41.
4. Методический подход к определению оптимальных геологических характеристик при планировании ГРП на многопластовых объектах / В.А. Грищенко, Р.У. Рабаев, И.Н. Асылгареев, В.Ш. Мухаметшин, Р.Ф. Якупов // SOCAR Proceedings. – 2021. – Специальный выпуск. – № 2. – С. 182–191. DOI: 10.5510/OGP2021SI200587.
5. Оптимизация проведения гидродинамических исследований скважин в условиях карбонатного коллектора / А.Е. Давыдова, А.А. Шуренко, Н.М. Дадакин, А.Д. Шуталев, Б.Б. Квеско // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2018. – Т. 17. – № 2. – С. 123–135. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.2.3
6. Mason H.E., Smith M.M., Carroll S.A. Calibration of NMR porosity to estimate permeability in carbonate reservoirs // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2019. – V. 87. – P. 19–26. DOI: 10.1016/j.ijggc.2019.05.008.
7. Мухаметшин В.В. Повышение эффективности управления разработкой залежей Западно-Сибирской нефтегазосной провинции на основе дифференциации и группирования // Геология и геофизика. – 2021. – Т. 62. – № 12. – С. 1672–1685. DOI: 10.15372/GiG2021102.
8. A novel analytical well test model for fractured vuggy carbonate reservoirs considering the coupling between oil flow and wave propagation / X. Du, Zh. Lu, D. Li, Y. Xu, P. Li, D. Lu // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – № 173. – P. 447–461. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.09.077.
9. Ali Y. Jirjees, Abdulaziz M. Abdulaziz. Influences of uncertainty in well log petrophysics and fluid properties on well test interpretation: an application in West Al Qurna Oil Field, South Iraq // Egyptian Journal of Petroleum. – 2019. – V. 28. – № 4. – P. 383–392. DOI: 10.1016/j.ejpe.2019.08.005.
10. Application of X-ray computed tomography for the virtual permeability prediction of fiber reinforcements for liquid composite molding processes: a review / M.A. Ali, R. Umer, K.A. Khan, W.J. Cantwell // Composites Science and Technology. – 2019. – V. 184. – P. 1–20. DOI: 10.1016/j.compscitech.2019.107828.
11. Хайрединов Н.Ш., Попов А.М., Мухаметшин В.Ш. Повышение эффективности заводнения низкопродуктивных залежей нефти в карбонатных коллекторах. Нефтяное хозяйство. – 1992. – № 9. – С. 18–20.
12. Artificial neural network-based time-domain interwell tracer testing for ultralow-permeability fractured reservoirs / Cheng Jing, Xiaowei Dong, Wenhao Cuid, Zhenzhen Dong, Long Rena, Xiaoyu Gua, Yanlong He, Chunsheng Pu, Xiaoyu Liu // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2020. – V. 195. – P. 1–9. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.107558.
13. Feng Zh., Daoyong Ya. Determination of minimum permeability plateau and characteristic length in porous media with non-Darcy flow behavior // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2014. – V. 119. – P. 8–16. DOI: 10.1016/j.petrol.2014.04.018.
14. Методические подходы к повышению эффективности системы заводнения на поздней стадии разработки / В.А. Грищенко, И.М. Циклис, В.Ш. Мухаметшин, Р.Ф. Якупов // SOCAR Proceedings. – 2021. – Специальный выпуск. – № 2. – С. 161–171. DOI: 10.5510/OGP2021SI200583.
15. Formation permeability evaluation and productivity prediction based on mobility from pressure measurement while drilling / Sh.I. Xinlei, C.U.I. Yunjiang, X.U. Wankun, Zhang Jiansheng, Guan Yeqin // Petroleum Exploration and Development. – 2020. – V. 47. – № 1. – P. 146–153. DOI: 10.1016/S1876-3804(20)60013-1.
16. Ghareb H., Veronique J. Developed correlations between sound wave velocity and porosity, permeability and mechanical properties of sandstone core samples // Petroleum Research. – 2020. – V. 5. – № 4. – P. 326–338. DOI: 10.1016/j.ptlrs.2020.07.001.
17. Harmonic pulse testing for well performance monitoring / P.A. Fokker, E.S. Borello, F. Verga, D. Viberti // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – V. 162. – P. 446–459. DOI: 10.1016/j.petrol.2017.12.053.
18. Козырев Н.Д., Вишняков А.Ю., Путилов И.С. Оценка влияния параметров неопределенности на прогнозирование показателей разработки // Недропользование. – 2020. – Т. 20. – № 4. – С. 356–368. DOI: 10.15593/2712-8008/2020.4.5.
19. Мухаметшин В.В. Устранение неопределенностей при решении задач воздействия на призабойную зону скважин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 7. – С. 40–50.
20. Influences of test method and loading history on permeability of tight reservoir rocks / Decheng Zhang, P.G. Ranjith, M.S.A. Perera, C.P. Zhang // Energy. – 2020. – V. 195. – P. 1–15. DOI: 10.1016/j.energy.2020.116902.

21. Циклическое заводнение бобриковского горизонта Сабанчинского нефтяного месторождения / А.Ф. Яртнев, А.Г. Хабибрахманов, В.Б. Подалов, А.И. Бакиров // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 3. – С. 85–87. DOI: 10.24887/0028-2448-2017-3-85-87.
22. Дифференциация и группирование сложнопостроенных залежей нефти в карбонатных коллекторах в решении задач управления разработкой / В.Ш. Мухаметшин, И.Н. Хакимзянов, Р.Н. Бахтизин, Л.С. Кулешова // SOCAR Proceedings. – 2021. – Специальный выпуск. – № 1. – С. 88–97. DOI: 10.5510/OGP2021SI100513.
23. Разработка дизайна гидродинамического исследования в условиях карбонатного коллектора / А.Е. Давыдова, А.А. Щуренко, Н.М. Дадакин, А.Д. Шуталев, Б.Б. Квеско // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 6. – С. 68–79. DOI: 10.18799/24131830/2019/6/2128.
24. Мухаметшин В.В. Обоснование трендов повышения степени выработки запасов нефти нижнемеловых отложений Западной Сибири на основе идентификации объектов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 5. – С. 117–124.
25. Сергеев В.Л., Нгуен Ф.Т.Х. Модели и алгоритмы адаптивной интерпретации результатов комбинированных газогидродинамических исследований интеллектуальных скважин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 10. – С. 67–75.
26. Interference well-test model for vertical well with double-segment fracture in a multi-well system / Jiazheng Qin, Shiqing Cheng, Peng Li, Youwei He, Xin Lu, Haiyang Yu // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – V. 183. – P. 1–14. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106412.
27. Мухаметшин В.Ш., Кулешова Л.С., Сафиуллина А.Р. Группирование и выделение залежей нефти в карбонатных коллекторах по продуктивности на стадии проведения геолого-разведочных работ // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 12. – С. 43–51. DOI: 10.18799/24131830/2021/12/2982.
28. Сметкина М.А., Мелкишев О.А., Присяжнюк М.А. Уточнение значений проницаемости при адаптации гидродинамической модели // Недропользование. – 2020. – Т. 20. – № 3. – С. 223–230. DOI: 10.15593/2712-8008/2020.3.3
29. Экспериментальное исследование вязкостных свойств эмульсионных систем с содержанием наночастиц SiO₂ / Ю.В. Зейтман, В.Ш. Мухаметшин, В.В. Сергеев, Ф.С. Кинзябаев // Нанотехнологии в строительстве. – 2017. – Т. 9. – № 2. – С. 16–38. DOI: 10.15828/2075-8545-2017-9-2-16-38.
30. Jun He, Kegang Ling. Measuring permeabilities of Middle-Bakken samples using three different methods // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2016. – V. 31. – P. 28–38. DOI: 10.1016/j.jngse.2016.03.007.
31. Бульгин Д.В., Николаев А.Н., Елесин А.В. Гидродинамическая оценка эффективности потокотклоняющих технологий в условиях образования техногенных каналов фильтрации // Георесурсы. – 2018. – Т. 20. – № 3. – С. 172–177. DOI: 10.18599/grs.2018.3.172-177.
32. Экспериментальное исследование влияния коллоидных систем с наночастицами на фильтрационные характеристики трещин гидравлического разрыва пласта / В.В. Сергеев, Р.Р. Шарапов, А.Ю. Кудымов, Ю.В. Зейтман, В.Ш. Мухаметшин // Нанотехнологии в строительстве. – 2020. – Т. 12. – № 2. – С. 100–107. DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-2-100-107.
33. Hutton A.C. Petrographic classification of oil shales // International Journal of Coal Geology. – 1987. – V. 8. – № 3. – P. 203–231. DOI: 10.1016/0166-5162(87)90032-2.
34. Evolution of anisotropic permeability of fractured sandstones subjected to true-triaxial stresses during reservoir depletion / Tongwen Jiang, Wei Yao, Xiongwei Sun, Chunyan Qi, Xing Li, Kaiwen Xia, Jie Zhang, M.H.B. Nasser // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2020. – V. 200. – P. 1–17. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.108251.
35. Yakupov R.F., Mukhametshin V.Sh., Tyncherov K.T. Filtration model of oil coning in a bottom water-drive reservoir // Periodico Tch Quimica. – 2018. – V. 15. – Iss. 30. – P. 725–733.
36. Ромм Е.С. Структурные модели порового пространства горных пород. – Л.: Недра, 1985. – 240 с.
37. Ханнел А.А. Породы-коллекторы нефти и газа и их изучение. – М.: Недра, 1969. – 368 с.
38. Дахнов В.Н. Интерпретация результатов геофизических исследований скважин. – М.: Недра, 1972. – 365 с.
39. Плотность распределения фильтрующих поровых каналов пластов-коллекторов Западной Сибири / Р.Т. Ахметов, Л.С. Кулешова, Р.У. Рабаев, В.В. Мухаметшин, А.М. Маляренко, Д.И. Кобица, Д.И. Ахметшина // SOCAR Proceedings. – 2021. – Специальный выпуск. – № 2. – С. 221–228. DOI: 10.5510/OGP2021SI200600.
40. Количественная оценка гидравлической извилистости коллекторов нефти и газа Западной Сибири на основе капилляриметрических исследований / Р.Т. Ахметов, А.М. Маляренко, Л.С. Кулешова, В.В. Мухаметшин, А.Р. Сафиуллина // SOCAR Proceedings. – 2021. – № 2. – С. 77–84. DOI: 10.5510/OGP20210200498.
41. Аналитические связи между фильтрационно-ёмкостными параметрами продуктивных пластов Западной Сибири на основе обобщенной математической модели капиллярных кривых / В.В. Мухаметшин, Р.Т. Ахметов, Л.С. Кулешова, О.А. Грезина // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 8. – С. 135–141. DOI: 10.18799/24131830/2021/8/3311.
42. Группирование эксплуатационных объектов на основе параметров обобщенной модели кривых капиллярного давления на примере ряда нефтяных месторождений Западной Сибири / Р.Т. Ахметов, В.В. Мухаметшин, Л.С. Кулешова, О.А. Грезина // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 11. – С. 89–97. DOI: 10.18799/24131830/2021/11/3084.
43. Purcell W.R. Capillary pressures – their measurement using mercury and the calculation of permeability therefrom // Trans AIME. – 1949. – V. 186. – P. 39–48.
44. Brooks R.H., Corey A.T. Hydraulic properties of porous media // Hydrology Papers. Colorado State University. Fort Collins, Colorado. – 1964. – № 3. – P. 1–37.

Поступила 17.06.2022 г.

Информация об авторах

Ахметов Р.Т., кандидат технических наук, профессор кафедры разведки и разработки нефтяных и газовых месторождений, филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Октябрьском.

Кулешова Л.С., кандидат технических наук, доцент кафедры разведки и разработки нефтяных и газовых месторождений, заместитель директора по УР, филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Октябрьском.

Велиев Э.Ф. о.глы, кандидат технических наук, заместитель заведующего лабораторией аналитических исследований, НИПИ «Нефтегаз».

Мухаметшин В.В., доктор технических наук, профессор кафедры разведки и разработки нефтяных и газовых месторождений, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

Сафиуллина А.Р., научный сотрудник кафедры разведки и разработки нефтяных и газовых месторождений, филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Октябрьском.

UDC 622.276.63

SUBSTANTIATION OF AN ANALYTICAL MODEL OF RESERVOIR PORE CHANNELS HYDRAULIC TORTUOSITY IN WESTERN SIBERIA BASED ON CAPILLARY RESEARCH DATA

Rasul T. Akhmetov¹,
info@of.ugntu.ru

Lyubov S. Kuleshova¹,
markl212@mail.ru

Elchin Fikret ogly Veliyev²,
elchinf.veliyev@socar.az

Vyacheslav V. Mukhametshin³,
vv@of.ugntu.ru

Albina R. Safiullina¹,
safiullina.a.r@yandex.ru

¹ Ufa State Petroleum Technological University, Branch of the University in the City of Oktyabrsky, 54a, Devonskaya street, Oktyabrsky, 452607, Russia.

² «Oil Gas Scientific Research Project» Institute, SOCAR, 88A, Hasan-bek Zardabi avenue, Baku, AZ1012, Azerbaijan.

³ Ufa State Petroleum Technological University, 1, Kosmonavtov street, Ufa, 450064, Russia.

Relevance. Hydraulic tortuosity has a significant impact on the filtration parameters of the reservoir. The study and creation of an analytical model of hydraulic tortuosity are important for improving the reliability and accuracy of oil and gas reservoirs' absolute and phase permeability determining.

Purpose: improvement of absolute and phase permeability mathematical model based on the capillarimetric studies data for using in development computer stimulation.

Facilities: productive strata of individual fields of the Jurassic and Lower Cretaceous age in Western Siberia.

Methods: statistical processing of capillarimetric data, analysis, and substantiation of the hydraulic tortuosity mathematical model of reservoir pore channels.

Results. In accordance with the electrohydrodynamic analogy, when substantiating the analytical model of hydraulic tortuosity, it is proposed to use electrical tortuosity, which is quite well obtained by geophysicists for the following models of the void space geometry of oil and gas reservoir rocks: 1) a set of different cross sections capillaries, 2) simple dumbbell model, in which the tortuosity is determined by the narrowing and expansion of the pore channels sections, 3) complex dumbbell model, in which not only the cross section, but also the actual length of the pore channels changes. Based on the mathematical models analysis for media with different geometries, it was found that the electrical tortuosity is expressed as an inverse power function of the open porosity coefficient. The authors note that if the electrical tortuosity is determined by the open porosity coefficient, then the hydraulic tortuosity is determined by the part of the porosity along which the fluid moves: for the water of a saturated reservoir, this is the effective porosity, and for the reservoir, it is the dynamic porosity. In the conditions of Western Siberia for any field on a collection of core samples, capillary characteristics are obtained in the laboratory, as well as the porosity and permeability of the reservoir. Further, by complex statistical processing of capillarimetry data and porosity characteristics of the formation, the parameters of the analytical model of tortuosity are determined. The paper shows that the use of the proposed hydraulic tortuosity of pore channels analytical model significantly increases the reliability and accuracy of absolute permeability determining according to capillary measurements.

Ключевые слова:

Hydraulic tortuosity, capillarimetric studies, absolute permeability, pore channels, dumbbell model.

REFERENCES

1. Sergeev V.L., Hoang D.V., Khagay D.E., Ignatenko A.V. Diagnostic criteria for identification of filtration flows during horizontal well tests. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 2, pp. 181–187. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2020/2/2504.
2. Khakimzyanov I.N., Mukhametshin V.Sh., Bakhtizin R.N., Sheshdirov R.I. Determination of well spacing volumetric factor for assessment of final oil recovery in reservoirs developed by horizontal wells. *SOCAR Proceedings*, 2021, no. 2, pp. 47–53. In Rus. DOI: 10.5510/OGP20210200495.
3. Shelepov V.V., Tyukavkina O.V. Geophysical methods for determining the reservoir properties of complexly constructed lower and middle Jurassic deposits within the oil-gas fields of the Ob river region. *Moscow University Bulletin. Series 4: Geology*, 2020, vol. 75, no. 2, pp. 145–149. DOI: 10.3103/S0145875220020088.
4. Grishchenko V.A., Rabaev R.U., Asylgareev I.N., Mukhametshin V.Sh., Yakupov R.F. Methodological approach to optimal geological and technological characteristics determining when planning hydraulic fracturing at multilayer facilities. *SOCAR Proceedings*, 2021, Special Issue, no. 2, pp. 182–191. In Rus. DOI: 10.5510/OGP2021SI200587.
5. Davydova A.E., Shchurenko A.A., Dadakin N.M., Shutalev A.D., Kvesko B.B. Optimization of carbonate reservoir well testing. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2018, vol. 17, no. 2, pp. 123–135. In Rus. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.2.3.

6. Mason H.E., Smith M.M., Carroll S.A. Calibration of NMR porosity to estimate permeability in carbonate reservoirs. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2019, vol. 87, pp. 19–26. DOI: 10.1016/j.ijggc.2019.05.008.
7. Mukhametshin V.V. Improving the efficiency of managing the development of the West Siberian oil and gas province fields on the basis of differentiation and grouping. *Russian Geology and Geophysics*, 2021, vol. 62, no. 12, pp. 1373–1384. DOI: 10.2113/RGG20183871.
8. Du X., Lu Zh., Li D., Xu Y., Li P., Lu D. A novel analytical well test model for fractured vuggy carbonate reservoirs considering the coupling between oil flow and wave propagation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, no. 173, pp. 447–461. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.09.077.
9. Ali Y. Jirjees, Abdulaziz M. Abdulaziz. Influences of uncertainty in well log petrophysics and fluid properties on well test interpretation: an application in West Al Qurna Oil Field, South Iraq. *Egyptian Journal of Petroleum*, 2019, vol. 28, no. 4, pp. 383–392. DOI: 10.1016/j.ejpe.2019.08.005.
10. Ali M.A., Umer R., Khan K.A., Cantwell W.J. Application of X-ray computed tomography for the virtual permeability prediction of fiber reinforcements for liquid composite molding processes: a review. *Composites Science and Technology*, 2019, vol. 184, pp. 1–20. DOI: 10.1016/j.compscitech.2019.107828.
11. Khayredinov N.Sh., Popov A.M., Mukhametshin V.Sh. Increasing the flooding efficiency of poor-producing oil deposits in carbonate collectors. *Oil industry*, 1992, no. 9, pp. 18–20. In Rus.
12. Jing Cheng, Dong Xiaowei, Cuid Wenhao, Dong Zhenzhen, Rena Long, Gua Xiaoyu, He Yanlong, Pu Chunsheng, Liu Xiaoyu. Artificial neural network-based time-domain interwell tracer testing for ultralow-permeability fractured reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, vol. 195, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.107558.
13. Feng Zhang, Daoyong Yang. Determination of minimum permeability plateau and characteristic length in porous media with non-Darcy flow behavior. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2014, vol. 119, pp. 8–16. DOI: 10.1016/j.petrol.2014.04.018.
14. Grishchenko V.A., Tsiklis I.M., Mukhametshin V.Sh., Yakupov R.F. Methodological approaches to increasing the flooding system efficiency at the later stage of reservoir development. *SOCAR Proceedings*, 2021, Special Issue, no. 2, pp. 161–171. In Rus. DOI: 10.5510/OGP2021SI200583.
15. Xinlei Sh.I., Yunjiang C.U.I., Wankun X.U., Jiansheng Zhang, Yeqin Guan. Formation permeability evaluation and productivity prediction based on mobility from pressure measurement while drilling. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, vol. 47, no. 1, pp. 146–153. DOI: 10.1016/S1876-3804(20)60013-1.
16. Ghareb Hamada, Veronique Joseph. Developed correlations between sound wave velocity and porosity, permeability and mechanical properties of sandstone core samples. *Petroleum Research*, 2020, vol. 5, no. 4, pp. 326–338. DOI: 10.1016/j.ptlrs.2020.07.001.
17. Fokker P.A., Borello E.S., Verga F., Viberti D. Harmonic pulse testing for well performance monitoring. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 162, pp. 446–459. DOI: 10.1016/j.petrol.2017.12.053.
18. Kozyrev N.D., Vishnyakov A.Yu., Putilov I.S. Assessment of the uncertainty parameters influence on the development indicators forecasting. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 356–368. DOI: 10.15593/2712-8008/2020.4.5.
19. Mukhametshin V.V. Eliminating uncertainties in solving bottom hole zone stimulation tasks. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 7, pp. 40–50. In Rus.
20. Decheng Zhang, Ranjith P.G., Perera M.S.A., Zhang C.P. Influences of test method and loading history on permeability of tight reservoir rocks. *Energy*, 2020, vol. 195, pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.energy.2020.116902.
21. Yartiev A.F., Khabibrakhmanov A.G., Podavalov V.B., Bakirov A.I. Cyclic water flooding of bobric formation at Sabanchinskoye field. *Oil Industry*, 2017, no. 3, pp. 85–87. In Rus. DOI: 10.24887/0028-2448-2017-3-85-87.
22. Mukhametshin V.Sh., Khakimzyanov I.N., Bakhtizin R.N., Kuleshova L.S. Differentiation and grouping of complex-structured oil reservoirs in carbonate reservoirs in development management problems solving. *SOCAR Proceedings*, 2021, Special Iss., no. 1, pp. 88–97. In Rus. DOI: 10.5510/OGP2021SI100513.
23. Davydova A.E., Shchurenko A.A., Dadakin N.M., Shutalev A.D., Kvesko B.B. Well testing design development in carbonate reservoir. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 6, pp. 68–79. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2019/6/2128.
24. Mukhametshin V.V. Rationale for trends in increasing oil reserves depletion in Western Siberia cretaceous deposits based on targets identification. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 5, pp. 117–124. In Rus.
25. Sergeev V.L., Nguyen Ph.T.H. Models and algorithms for adaptive interpretation of combined well test data of intelligent wells. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 10, pp. 67–75. In Rus.
26. Jiazheng Qin, Shiqing Cheng, Peng Li, Youwei He, Xin Lu, Haiyang Yu. Interference well-test model for vertical well with double-segment fracture in a multi-well system. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 183, pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106412.
27. Mukhametshin V.Sh., Kuleshova L.S., Safiullina A.R. Grouping and determining oil reservoirs in carbonate reservoirs by their productivity at the stage of geological exploration. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 12, pp. 43–51. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2021/12/2982.
28. Smetkina M.A., Melkishev O.A., Prisyazhnyuk M.A. Refining the values of permeability when adapting the hydrodynamic model. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 223–230. DOI: 10.15593/2712-8008/2020.3.3.
29. Zeigman Yu.V., Mukhametshin V.Sh., Sergeev V.V., Kinzybaev F.S. Experimental study of viscosity properties of emulsion system with SiO₂ nanoparticles. *Nanotechnologies in Construction*, 2017, vol. 9, no. 2, pp. 16–38. In Rus. DOI: 10.15828/2075-8545-2017-9-2-16-38.
30. Jun He, Kegang Ling. Measuring permeabilities of Middle-Bakken samples using three different methods. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, vol. 31, pp. 28–38. DOI: 10.1016/j.jngse.2016.03.007.
31. Bulygin D.V., Nikolaev A.N., Elesin A.V. Hydrodynamic evaluation of the efficiency of flow deflecting technologies in conditions of formation of man-made filtration channels. *Georesources*, 2018, vol. 20, no. 3, pp. 172–177. In Rus. DOI: 10.18599/grs.2018.3.172-177.
32. Sergeev V.V., Sharapov R.R., Kudymov A.Y., Zeigman Y.V., Mukhametshin V.S. Experimental research of the colloidal systems with nanoparticles influence on filtration characteristics of hydraulic fractures. *Nanotechnologies in Construction*, 2020, vol. 12, no. 2, pp. 100–107. In Rus. DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-2-100-107.
33. Hutton A.C. Petrographic classification of oil shales. *International Journal of Coal Geology*, 1987, vol. 8, no. 3, pp. 203–231. DOI: 10.1016/0166-5162(87)90032-2.
34. Tongwen Jiang, Wei Yao, Xiongwei Sun, Chunyan Qi, Xing Li, Kaiwen Xia, Jie Zhang, M.H.B. Nasser. Evolution of anisotropic permeability of fractured sandstones subjected to true-triaxial stresses during reservoir depletion. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, vol. 200, pp. 1–17. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.108251.
35. Yakupov R.F., Mukhametshin V.Sh., Tyncherov K.T. Filtration model of oil coning in a bottom water-drive reservoir. *Periodico Tche Quimica*, 2018, vol. 15, Iss. 30, pp. 725–733.
36. Romm E.S. *Strukturnye modeli porovogo prostranstva gornyykh porod* [Structural models of the pore space of rocks]. Leningrad, Nedra Publ., 1985. 240 p.
37. Khanin A.A. *Porody-kollektory nefi i gaza i ikh izuchenie* [Rocks-reservoirs of oil and gas and their study]. Moscow, Nedra Publ., 1969. 368 p.
38. Dakhnov V.N. *Interpretatsiya rezultatov geofizicheskikh issledovaniy skvazhin* [Interpretation of the results of geophysical studies of wells]. Moscow, Nedra Publ., 1972. 365 p.

39. Akhmetov R.T., Kuleshova L.S., Rabaev R.U., Mukhametshin V.V., Malyarenko A.M., Kobishcha D.I., Akhmetshina D.I. Filtering pore channels distribution density in Western Siberia. *SOCAR Proceedings*, 2021, Special Issue, no. 2, pp. 221–228. In Rus. DOI: 10.5510/OGP2021SI200600.
40. Akhmetov R.T., Malyarenko A.M., Kuleshova L.S., Mukhametshin V.V., Safiullina A.R. Quantitative assessment of hydraulic tortuosity of oil and gas reservoirs in western siberia based on capillarimetric studies. *SOCAR Proceedings*, 2021, no. 2, pp. 77–84. In Rus. DOI: 10.5510/OGP20210200498.
41. Mukhametshin V.V., Akhmetov R.T., Kuleshova L.S., Grezina O.A. Analytical links between porosity and permeability correlations of productive strata of Western Siberia based on a generalized mathematical model of capillary curves. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 8, pp. 135–141. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2021/8/3311.
42. Akhmetov R.T., Mukhametshin V.V., Kuleshova L.S., Grezina O.A. Production facilities grouping based on the parameters of the capillary pressure curves generalized model on the example of Western Siberia oil fields. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 11, pp. 89–97. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2021/11/3084.
43. Purcell W.R. Capillary pressures – their measurement using mercury and the calculation of permeability therefrom. *Trans AIME*, 1949, vol. 186, pp. 39–48.
44. Brooks R.H., Corey A.T. Hydraulic Properties of Porous Media. *Hydrology Papers. Colorado State University*, 1964, no. 3, pp. 1–37.

Received: 17 June 2022.

Information about the authors

Rasul T. Akhmetov, Cand. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University, Branch of the University in the City of Oktyabrsky.

Lyubov S. Kuleshova, Cand. Sc., associate professor, deputy director for Academic Affairs, Ufa State Petroleum Technological University, Branch of the University in the City of Oktyabrsky.

Elchin Fikret ogly Veliyev, Cand. Sc., deputy laboratory manager, Analytical Investigations Laboratory, «Oil Gas Scientific Research Project» Institute, SOCAR.

Vyacheslav V. Mukhametshin, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University.

Albina R. Safiullina, researcher, Ufa State Petroleum Technological University, Branch of the University in the City of Oktyabrsky.

УДК 622.243.24

ОЦЕНКА ВЯЗКОСТИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ КСАНТАНОВЫХ СМОЛ

Ламбин Анатолий Иванович¹,
alambin@ex.istu.edu

Аверкина Елена Владимировна¹,
averkina.l@yandex.ru

Ерыгина Анастасия Николаевна²,
erygina_an@irkutskoil.ru

Красинская Анастасия Сергеевна²,
krasinskaya_as@irkutskoil.ru

¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

² ООО «ИНК-СЕРВИС»,
Россия, 664007, г. Иркутск, ул. Октябрьской Революции, 24А.

Актуальность. Повсеместное применение биополимеров в составе буровых растворов позволяет совершенствовать последние в плане улучшения гидравлики циркуляционной системы, повышения выносной способности промывочной жидкости, решения вопросов устойчивости стенок открытого ствола скважины. Интерес к применению в бурении растительных камедей повышается.

Целью статьи является определение отличительных свойств водных растворов полимера в реологическом плане. Реологические свойства бурового раствора являются важным фактором производительности процесса углубления скважины. Благодаря реологической кривой бурового раствора мы можем более точно оценить эквивалентную циркуляционную плотность и способность выносить из скважины продукты разрушения, оптимизировать гидравлические параметры и др.

Объектом исследования являются реологические свойства водных растворов биополимеров, в частности ксантановой камеди, которую компании-производители поставляют в виде порошка.

Методы: инструментальные методы определения реологических параметров водных растворов биополимеров по ГОСТ 33696 (ISO 10416), оценка и анализ распределения дисперсии при трехкратных измерениях в каждой точке опыта.

Результаты. Разработана «Методика лабораторных испытаний химических реагентов для приготовления буровых растворов на соответствие требованиям ООО «ИНК-СЕРВИС». Проведено статистическое исследование отличий в показателях напряжения сдвига водных растворов исследуемых порошков. Из-за неподчинения величин измеряемых напряжений нормальному распределению использовался непараметрический критерий сравнения Манна–Уитни, расчеты которого по двум всевозможным сочетаниям малых выборок показали отсутствие отличий. Показана подверженность реологических показателей водных растворов ксантановых порошков псевдопластическим значениям степенной модели Освальда де Вейля.

Ключевые слова:

Ксантановая камедь, биополимер, реологические свойства, вискозиметрия, напряжение сдвига, вязкость, критерий сравнения.

Введение

Строительство скважины при разведке или добыче углеводородов является сложнейшей и дорогостоящей операцией, оцениваемой как минимум в 1–1,5 миллиона долларов. Стоимость строительства в значительной степени зависит от характеристик применяемого для промывки скважины бурового раствора. При этом растут требования к буровому раствору с точки зрения экологии, триботехнических и гидродинамических условий, а также устойчивости стенок скважины [1]. Этим требованиям во многом отвечают промывочные жидкости на водной основе, в состав которых в качестве улучшающих добавок входят биополимеры [2, 3]. В частности, к биополимерам относят полисахариды, получаемые на основе гуаровых или ксантановых смол (камедей). Больше применение в буровых растворах находит ксантановая камедь [4–6], промышленного производства которой в России пока нет. Основным поставщиком является Китай и частично Австрия. Малая добавка ксантановой камеди в буровой раствор в

количестве 1,5...7 кг/м³ значительно улучшает реологический профиль жидкости, определяющий высокую вязкость при низких скоростях сдвига и, наоборот, низкую вязкость при больших скоростях сдвига [7]. Такие растворы, у которых величина динамического напряжения сдвига превышает пластическую вязкость, иногда называют растворами с «обратной» вязкостью. Как следствие, такие растворы обладают низкой эффективной вязкостью при высоких скоростях течения (в бурительных трубах, в забойном двигателе, в насадках долота), что позволяет снизить потери давления и увеличить гидродинамическую мощность на долоте или забойном двигателе, увеличить скорость проходки. При низких скоростях сдвига вязкость резко увеличивается, что сказывается на эффективности очистки скважины. Биополимер эффективно работает во всех буровых растворах на водной основе – от утяжеленных до систем с низким содержанием твердой фазы, включая пресную, морскую воду, системы на основе соленой воды и плотные рассолы [8].

Химическая формула ксантановой камеди: $C_{35}H_{49}O_{29}$, молекулярная масса может составлять от 5 до 20 млн, ее снижения добиваются путем облучения. Раствор ксантана устойчив к ферментам, спиртам, ПАВ, кислотам (кроме соляной) и щелочам, высоким (до 120 °С) и низким (до –18 °С) температурам. Его способность работать в соленой воде делает его универсальным. Это связано с его короткими боковыми цепями, состоящими из трех сахаров, которые предотвращают свертывание полимера в солевых условиях [9]. Это уникально для анионных полимеров и действительно отличает ксантан от других типов полисахаридов. Смола по своей силе в качестве загустителя превосходит крахмал в пять–восемь раз. В смеси с другими камедями эффект загущения выше [10].

Биополимерный буровой раствор в процессе бурения выполняет множество сложных и ответственных функций. Главным свойством тиксотропных систем на основе биополимеров, в отличие от других полимеров на основе полисахаридов, является их способность при небольших концентрациях создавать системы, обладающие псевдопластичностью, то есть аномалией вязкости [11]. Реология псевдопластичных жидкостей описывается моделью Освальда де Вейля [12, 13].

При моделировании рецептуры бурового раствора на биополимерной основе важным вопросом всегда остается выбор качественного полимерного реагента, изменяющего реологические характеристики в широком диапазоне скоростей и обеспечивающего высокую выносную способность при низких скоростях сдвига.

Поскольку в настоящее время рынок химических реагентов изобилует компаниями, предлагающими добавки ксантанового типа, это приводит к определенным трудностям при их выборе и создании состава бурового раствора, который будет обеспечивать оптимальные реологические характеристики в процессе строительства скважины.

Поэтому возникает необходимость создания четкого алгоритма подбора ксантановой камеди при приготовлении бурового раствора для конкретных геолого-технических условий строительства скважин.

Цель статьи – оценить различие составов водных растворов ксантанового реагента различных производителей по их вязкостным свойствам.

Методика исследования

Для проведения исследований кафедрой нефтегазового дела Иркутского национального исследовательского технического университета (ИРНТУ) совместно с компанией ООО «ИНК-СЕРВИС» была разработана «Методика лабораторных испытаний химических реагентов для приготовления буровых растворов на соответствие требованиям ООО "ИНК-СЕРВИС"». Данная методика предназначена для руководства при проведении испытаний химических реагентов, применяемых в буровых растворах, при строительстве нефтяных и газовых скважин на месторождениях ГК «ИНК» и включает в себя правила

приемки материалов, правила хранения и утилизации материалов, а также технические задания на выполнение работ по определению качества биополимеров, крахмалов, полианионной целлюлозы высокой и низкой вязкости, бактерицидов, пеногасителей, а также смазочных добавок. Требования методики составлены на основе следующих нормативных документов: ГОСТ Р 56946 (ISO 13500), ГОСТ 33696 (ISO 10416), ГОСТ 33213 (ISO 10414-1).

Испытания материалов для буровых растворов проводились с целью сравнительного анализа качества конкурирующих между собой продуктов различных производителей химических реагентов.

В рамках разработанной методики изучалась вязкость водных растворов ксантановых смол различного производства. Всего было испытано семь разновидностей биополимера (ксантановая камедь) различных компаний, представленных ООО «ИНК-СЕРВИС», которые были обозначены Б1, Б2...Б7.

Согласно требованиям методики, приготавливались три типа раствора по 300 мл путем добавления полимера в установленной концентрации 1,5 г в дистиллированную воду, в 30%-й раствор NaCl и 25%-й минерализованный раствор KCl [14]. Измерение вязкости проводилось на ротационном вискозиметре OFITE, модель 900, при скорости 600, 300, 6 и 3 об/мин до тех пор, пока показания прибора не стабилизируются для каждой из скоростей вращения.

Требуемые показания вискозиметра (табл. 1) соответствуют значениям угла закручивания пружины вискозиметра для бурового раствора, используемого при бурении скважин на объектах ООО «ИНК-СЕРВИС».

Результаты лабораторных испытаний биополимеров представлены в табл. 1.

Совместное рассмотрение реологических критериев позволяет комплексно оценивать технологические свойства биополимерного бурового раствора и его уровень в качестве гидродинамического агента бурящейся скважины [15]. Анализируя данные табл. 1, можно видеть, что растворы с биополимерами Б-3, Б-5, Б-6, Б-7 соответствуют требуемым показаниям угла закручивания вискозиметра и могут быть приняты в качестве структурообразователя бурового раствора.

Кроме установления соответствия измеренных показателей требуемым в данном случае появилась необходимость оценки различия показаний вискозиметра как для отдельного раствора, так и для растворов, содержащих разные марки ксантановой камеди.

Изменчивость показаний прибора определяли путем вычисления оценки дисперсии при тоекратных измерениях в каждой точке опыта по формуле [15]:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (1)$$

с последующим определением среднеквадратического отклонения по формуле:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (2)$$

где x_i – измеряемая величина; \bar{x} – среднее измеренных величин; n – число измеренных величин.

Таблица 1. Требования к показаниям вискозиметра и результаты измерений

Table 1. Requirements for viscometer readings and measurement results

Шифр биополимера/ Разновидность раствора Biopolymer cipher/ Type of solution		Требуемые показания вискозиметра (угол закручивания при частоте вращения, об/мин) Required viscometer readings (twist angle at rotation speed/rpm)				Полученные показания вискозиметра Received viscometer readings				Среднеквадратическое отклонение показаний вискозиметра Standard deviation of the viscometer readings			
		600	300	6	3	600	300	6	3	600	300	6	3
Б-1 В-1	вода water	35	27	14	13	47,5	39,0	16,7	16,0	0,8660	1,0969	0,4041	0,2082
	NaCl	50	37	13	12	54,8	40,3	10,3	8,8	1,8770	1,0969	0,3215	0,3215
	KCl	39	31	13	12	47,4	37,4	14,1	12,7	1,0440	0,7506	0,6110	0,795
Б-2 В-2	вода water	35	27	14	13	38,6	32,6	14,9	13,7	0,7810	0,6700	0,2517	0,3606
	NaCl	50	37	13	12	49,7	37,7	11,8	11,0	0,8386	0,3055	0,0577	0,0577
	KCl	39	31	13	12	38,4	31,6	11,8	11,0	0,1155	0,4933	0,1528	0,1155
Б-3 В-3	вода water	35	27	14	13	39,4	33,3	15,8	14,6	0,6197	1,1590	1,4572	1,8009
	NaCl	50	37	13	12	65,9	49,6	15,8	14,1	3,2741	2,7839	1,5716	1,7898
	KCl	39	31	13	12	53,1	41,7	15,4	14,1	1,4048	1,3014	0,8386	0,5774
Б-4 В-4	вода water	35	27	14	13	47,7	35,9	15,6	14,4	0,1155	0,3055	0,2082	0,0577
	NaCl	50	37	13	12	56,0	42,4	11,6	10,1	1,1590	2,9297	0,6000	0,4509
	KCl	39	31	13	12	46,2	35,7	13,7	11,6	1,5588	1,1060	0,8083	1,1533
Б-5 В-5	вода water	35	27	14	13	43,5	35,8	16,3	15,4	0,3464	0,8505	0,6658	0,4933
	NaCl	50	37	13	12	60,8	45,4	13,8	12,1	1,0536	0,5507	0,4619	0,3512
	KCl	39	31	13	12	51,2	40,7	15,4	13,8	1,1547	1,0549	1,0440	1,4154
Б-6 В-6	вода water	35	27	14	13	42,1	35,7	16,9	16,0	0,4933	0,5507	0,6807	0,3055
	NaCl	50	37	13	12	55,2	41,5	13,6	11,6	2,8054	1,6803	1,7214	0,9849
	KCl	39	31	13	12	42,6	34,1	13,9	12,2	0,0580	0,3055	0,4000	0,3056
Б-7 В-7	вода water	35	27	14	13	45,7	35,2	16,4	15,5	0,2517	1,4154	0,2000	0,3000
	NaCl	50	37	13	12	60,5	44,8	13,9	12,4	1,7616	2,0518	0,8888	0,9644
	KCl	39	31	13	12	45,9	36,4	13,4	11,9	0,1155	0,3464	0,3464	0,5196

Значения среднеквадратических отклонений вычисленные по формулам (1), (2) представлены в табл. 1. Максимальные ошибки отмечены при измерении значений поворота боба вискозиметра на малых скоростях сдвига. Наибольшая ошибка составила 12,7% для реагента Б-3 в солевых растворах.

Как отмечалось выше, реология растворов полимеров описывается моделью Освальда де Вейля:

$$\tau = K\dot{\gamma}^n, \quad (3)$$

где τ – напряжение сдвига, Па; K – коэффициент консистенции; n – показатель отклонения от ньютоновского поведения жидкости.

Здесь n определяется по формуле [16]:

$$n = 3,32 \lg \left(\frac{\theta_{600}}{\theta_{300}} \right), K = \theta_{600} / (1022)^n, \quad (4)$$

где θ_{600} и θ_{300} – показания вискозиметра при 600 и 300 оборотов в минуту.

Прямолинейность графика на рис. 1, построенного в координатах: десятичный логарифм измеренной вязкости жидкости – логарифм частоты вращения ротора вискозиметра, подтверждает полную подчиненность жидкости идеальному степенному закону (3).

На рис. 2 приведено отличие показаний вискозиметра при измерении напряжения сдвига от расчетных значений по формуле (3) для раствора Б-3 с показателем нелинейности $n=0,5454$ и коэффициентом консистенции $K=1,4789$.

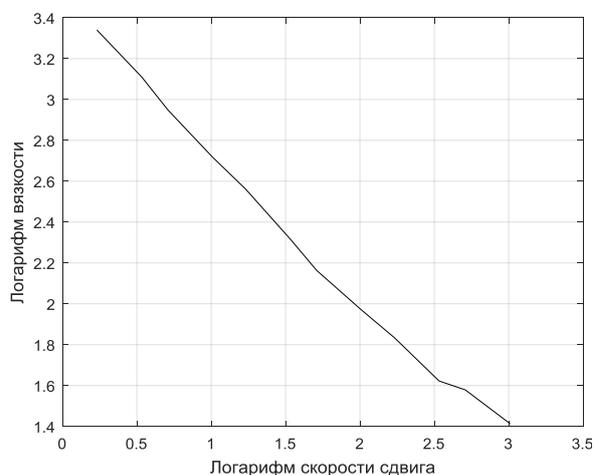


Рис. 1. Зависимость вязкости от скорости сдвига, выраженная в логарифмах их измеренных значений

Fig. 1. Dependence of viscosity on shear rate, expressed in logarithms of their measured values

Такое отличие характерно для всех рассмотренных растворов.

Рассматривая полученные кривые, можно видеть, что кривые напряжения сдвига практически параллельны друг другу, это подтверждает, что ошибка между измеренными значениями и вычисленными постоянна. Вычисленные по формуле (3), представляющей идеальный степенной закон, значения

напряжения сдвига отличаются от измеренных значений со среднеквадратической ошибкой, равной 10,3. Можно предположить, что для сдвиговых условий в реальной скважине эта ошибка будет иметь примерно такой же порядок.

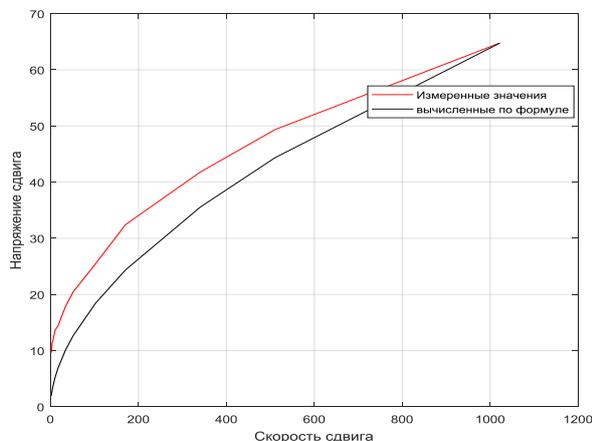


Рис. 2. Отличие значений напряжения сдвига измеренных и вычисленных по формуле (3)

Fig. 2. Difference between the values of the shear stress measured and calculated by the formula (3)

Однако для реальных буровых растворов идеальный закон неприемлем, и в расчетах промывки скважины пользуются обобщенным степенным законом, основанным на отношении касательного напряжения к скорости сдвига у стенки, ограничивающей поток раствора [17].

На рис. 3, 4 представлена реологическая характеристика водного раствора биополимера Б-3 и Б-7, где показаны кривые кажущейся вязкости и напряжения сдвига. Касательная прямая, проведенная к прямолинейному участку кривой напряжения сдвига и продолженная до пересечения с осью ординат, определяет τ_c – предельное динамическое напряжение сдвига, соответствующее конкретному состоянию раствора, что является одной из характеристик бурового раствора.

Сравнивая графики рис. 3, 4, видно, что кривые кажущейся вязкости и напряжения сдвига для водных растворов биополимеров Б-3 и Б-7 мало различаются. Следовательно, любой из представленных полимеров может определять одинаковые реологические параметры при идентичных условиях приготовления растворов.

Рассматривая рис. 5, можно видеть, что водные растворы полимеров Б-1, Б-2 и Б-3 имеют примерно одинаковые кривые зависимости реологических параметров, что подтверждает схожесть реагентов по химическому составу. Можно предположить, что биополимеры мало отличаются по молекулярному весу.

В свою очередь реологическая характеристика водных растворов полимеров зависит от молекулярного веса и гидродинамического размера молекул реагента, а также их взаимодействия между собой. Знание указанной характеристики полимеров позволяет

качественно решать технологические задачи при строительстве скважины путем выбора полимеров с соответствующими макромолекулярными характеристиками [4].

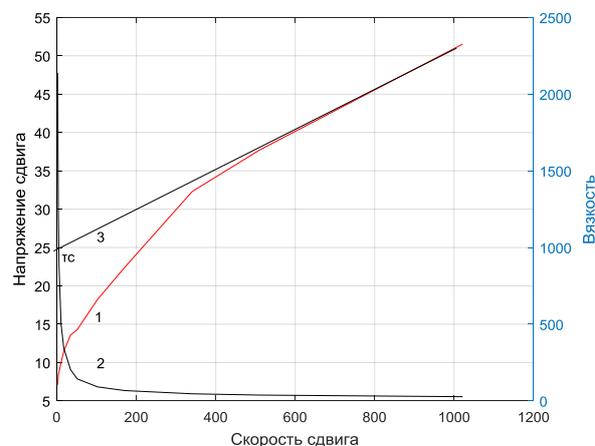


Рис. 3. Зависимость эффективной вязкости и напряжения сдвига от скорости сдвига для биополимера Б-3: data 1 – напряжение сдвига, Па; data 2 – эффективная вязкость, Па·с; data 3 – линия, определяющая предельное динамическое напряжение сдвига

Fig. 3. Dependence of the effective viscosity and shear stress on the shear rate for biopolymer B-3: data 1 – shear stress, Pa; data 2 – effective viscosity, Pa·sec; data 3 – line determining the maximum dynamic shear stress

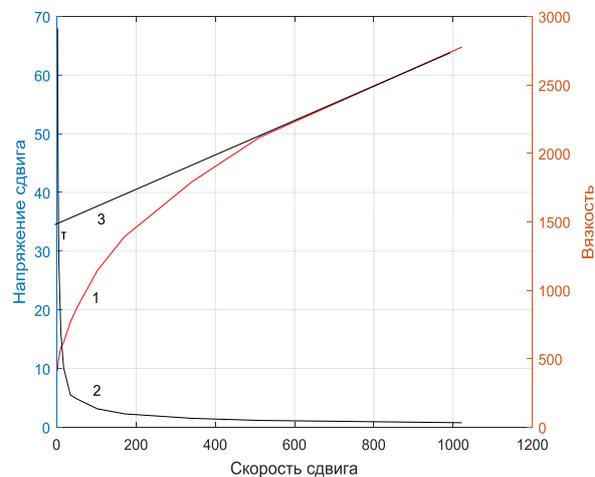


Рис. 4. Зависимость эффективной вязкости и напряжения сдвига от скорости сдвига для биополимера Б-7: data 1 – напряжение сдвига, Па; data 2 – эффективная вязкость, Па·с; data 3 – линия, определяющая предельное динамическое напряжение сдвига

Fig. 4. Dependence of the effective viscosity and shear stress on the shear rate for biopolymer B-7: data 1 – shear stress, Pa; data 2 – effective viscosity, Pa·sec; data 3 – line determining the maximum dynamic shear stress

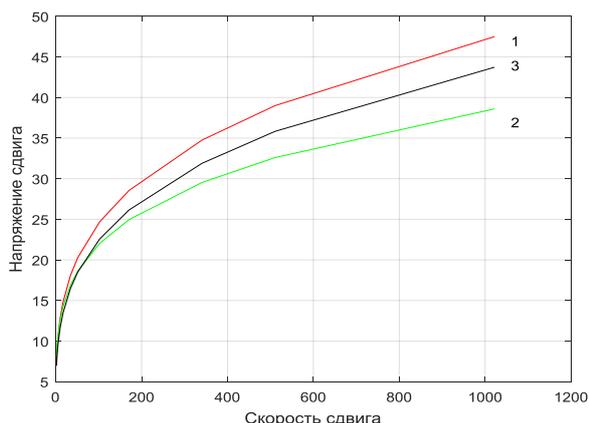


Рис. 5. Визуализация расчетных значений (формула (3)) водных растворов полимеров Б-1, Б-2, Б-3

Fig. 5. Visualization of calculated values (formula (3)) of aqueous solutions of polymer B-1, B-2, B-3

Следующим этапом изучения вязкости водных растворов полимеров явилось определение статистической значимости отличий одних растворов от других по показателям вязкости и напряжению сдвига. В силу сверх малых выборок указанных значений применение параметрических критериев значимости

затруднено [18]. При распределении по степенному закону величины не группируются вокруг среднего значения. К примеру, применение статистики Стьюдента требует нормального распределения выборочных значений [19]. В результате проверка нулевой гипотезы осуществлялась путем применения непараметрического (рангового) критерия Манна–Уитни [20]. Его критическое значение для выборок в 4 величины равно единице. В нашем случае расчетные значения критерия превышают критическое значение и составляют 4...6 и больше, что говорит о незначимости различий вязкостных характеристик водных растворов биополимеров.

Незначимость различий подтверждается и коэффициентом корреляции Пирсона [20, 21], который вычислен для всех сравниваемых пар растворов и представлен в табл. 2. Этот коэффициент определяет линейность связи сравниваемых пар, и, как видно, его табличные значения отражают очень высокую коррелятивность, объясняющую одинаковость признака, измеряемого вискозиметром на частотах 600, 300, 6 и 3 об/мин. Отсюда следует, что необходимо определиться с критерием, с помощью которого можно значимо оценить видимые различия.

Таблица 2. Коэффициент корреляции Пирсона

Table 2. Pearson correlation coefficient

		Раствор биополимера/Biopolymer solution													
		Б-1/В-1		Б-2/В-2		Б-3/В-3		Б-4/В-4		Б-5/В-5		Б-6/В-6		Б-7/В-7	
Б-1 В-1	1:2	0,9900	1:2	0,9994	1:2	0,9990	1:2	0,9996	1:2	0,9989	1:2	0,7419	1:2	0,9986	
	1:3	0,9997	1:3	0,9998	1:3	0,9997	1:3	0,9988	1:3	0,9998	1:3	0,7424	1:3	0,9998	
	2:3	1,0000	2:3	0,9980	2:3	0,9997	2:3	0,9997	2:3	0,9995	2:3	0,9994	2:3	0,9994	
Б-2 В-2	1:1	0,9995	1:2	0,9881	1:2	0,9977	1:2	0,9987	1:2	0,9976	1:2	0,9976	1:2	0,9970	
	2:2	0,9999	1:3	0,9866	1:3	0,9989	1:3	0,9981	1:3	0,9764	1:3	0,9599	1:3	0,9994	
	3:3	0,9887	2:3	0,9980	2:3	0,9998	2:3	0,9995	2:3	0,9767	2:3	0,9599	2:3	0,9995	
Б-3 В-3	1:1	0,9996	1:1	1,0000	1:2	0,9416	1:2	0,9965	1:2	0,9980	1:2	0,9981	1:2	0,9975	
	2:2	1,0000	2:2	0,9999	1:3	0,9992	1:3	0,9584	1:3	0,9996	1:3	0,9989	1:3	0,9996	
	3:3	1,0000	3:3	0,9992	2:3	0,9997	2:3	0,9597	2:3	0,9995	2:3	0,9999	2:3	0,9995	
Б-4 В-4	1:1	0,9997	1:1	0,9994	1:1	0,9995	1:2	0,9987	1:2	0,9990	1:2	0,9990	1:2	0,9987	
	2:2	0,9998	2:2	0,9999	2:2	0,9726	1:3	0,9989	1:3	0,9998	1:3	0,9995	1:3	0,9998	
	3:3	0,9997	3:3	0,9981	3:3	0,9996	2:3	0,9976	2:3	0,9999	2:3	0,9997	2:3	0,9999	
Б-5 В-5	1:1	0,9998	1:1	0,9995	1:1	0,9996	1:1	1,0000	1:2	0,9992	1:2	0,9991	1:2	0,9988	
	2:2	1,0000	2:2	0,9999	2:2	0,9728	2:2	0,9998	1:3	1,0000	1:3	0,9997	1:3	0,9999	
	3:3	0,9455	3:3	0,9995	3:3	0,9999	3:3	0,9996	2:3	0,9994	2:3	0,9993	2:3	0,9994	
Б-6 В-6	1:1	0,9992	1:1	0,9999	1:1	0,9999	1:1	0,9997	1:1	0,9997	1:2	0,9979	1:2	0,9949	
	2:2	0,9999	2:2	0,9998	2:2	0,9727	2:2	0,9998	2:2	1,0000	1:3	0,9992	1:3	0,9994	
	3:3	0,9456	3:3	0,9950	3:3	0,9998	3:3	0,9997	3:3	0,9999	2:3	0,9995	2:3	0,9962	
Б-7 В-7	1:1	0,9984	1:1	0,9950	1:1	0,9955	1:1	0,9973	1:1	0,9974	1:1	0,9944	1:2	0,9929	
	2:2	1,0000	2:2	0,9960	2:2	0,9727	2:2	0,9996	2:2	1,0000	2:2	0,9915	1:3	0,9946	
	3:3	0,9457	3:3	0,9995	3:3	0,9999	3:3	0,9996	3:3	1,0000	3:3	0,9999	2:3	0,9984	

В табл. 2 по диагонали выделены непосредственно растворы, в которых показано сравнение цифрами. Под цифрой 1 подразумевается водный раствор биополимера, под цифрой 2 – водный раствор с добавкой NaCl, под цифрой 3 – водный раствор с добавкой KCl. Под диагональю показаны сравнения растворов одинаковых по составу. Значения критериев над диагональю показывают сравнение растворов разных по составу. Представленная матрица позволяет сравнить разумное количество растворов с разнообразием их по составу. В данном случае состав каждого раствора обозначен цифрами 1, 2, 3.

Заключение

Проведенные лабораторные исследования позволяют объективно оценить возможности и потенциальные преимущества разработки таких методик.

Анализ табл. 2 показывает статистическую одинаковость показаний вискозиметра независимо от торговой марки ксантана, по крайней мере при тех его концентрациях, которые указаны в отмеченном ГОСТ Р 56946-2016. Статистическая неразличимость определена одинаковостью материала порошков, производимого разными фирмами. Кроме того, требование ГОСТ Р 56946-2016 оценивать растворы камедей

средним значением при суммировании показаний вискозиметра на частотах вращения 600, 300, 6 и 3 об/мин некорректно, так как эти показания не соответствуют статистически нормальному распределению, а принадлежат показательному распределению,

т. е. каждое последующее значение измеренной величины не группируется вокруг среднего значения. Для целей оценивания растворов по показаниям вязкости или напряжениям сдвига требуется разработка соответствующего показателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полимерные буровые растворы. Эволюция «Из грязи в князи» / В.П. Овчинников, Н.А. Аксенова, Л.А. Каменский, В.А. Федоровская // Бурение и нефть. – 2014. – № 12. – С. 24–29.
2. Оценка эффективности применения биополимерных буровых реагентов при бурении горизонтальных стволов / Н.А. Четвернева, Г.А. Тептерева, И.Ф. Гайсин, С.Ю. Шавшукова // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2019. – № 2. – С. 40–43.
3. Эгамбердиев Б.Ш., Негматова К.С., Негматов С.С. Новые композиционные полимерные реагенты для буровых растворов, используемых при бурении нефтегазовых скважин // Universum: технические науки. – 2020. – № 10 (79-3). – С. 40–46.
4. Раствор для бурения скважин в условиях ММП: пат. Рос. Федерация, № RU 2723256 МПК СО9К8/08, заявл. 27.08.2019, опубл. 09.06.2020, Бюл. № 16. – 8 с.
5. Akpan E.U., Enyi G.C., Nasr G.G. Enhancing the performance of xanthan gum in water-based mud systems using an environmentally friendly biopolymer // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2020. – V. 10 (04). – P. 1933–1948.
6. Hemphill T., Campos W., Pilehvari A. Yield-power law model more accurately predicts mud rheology // Journal Oil and Gas. – 1993. – V. 91 (34). – P. 45–50.
7. Akpan E.U. Water-based drilling fluids for high-temperature applications and water-sensitive and dispersible shale formations // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – V. 175. – P. 1028–1038.
8. Effect of carbon and nitrogen sources on the production of xanthan gum from *Xanthomonas campestris* isolated from soil / S.M. Kumara, B.A. Khan, K.C. Rohit, B. Purushotham // Journal Arch Appl Sci Res. – 2012. – V. 4 (6). – P. 2507–2512.
9. Akpan E.U., Enyi G.C., Nasr G.G. Enhancing the performance of xanthan gum in waterbased mud systems using an environmentally friendly biopolymer // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2020. – V. 10 (04). – P. 1933–1948.
10. Салихов И.Ф., Конесев Г.В., Попов А.Н. Математическое моделирование состава и свойств промысловых жидкостей на водной основе с применением бурового комплексного реагента БКР–5М // Территория нефтегаз. – 2014. – № 6. – С. 20–26.
11. Okrajni S., Azar J.J. The effects of mud rheology on annular hole cleaning in directional wells // Journal SPE Drill Eng. – 1986. – V. 1 (04). – P. 297–308.
12. Влияние простых солей на реологические свойства полимерных растворов для бурения комплексами ССК в глинистых отложениях / А.Л. Неверов, В.П. Рожков, Л.С. Баталина, А.В. Минеев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов – 2013. – Т. 323. – № 1. – С. 196–200.
13. Real-time measurement of drilling fluid rheologica properties: a review / Naipeng Liu, Di Zhang, Hui Gao, Yule Hu, Longchen Duan // Journal Sensors MDPI. – 2021. – V. 21, 3592. – P. 1–20. URL: <https://doi.org/10.3390/s21113592> (дата обращения: 15.04.2022).
14. ГОСТ Р 56946-2016. Материалы буровых растворов. Технические условия и испытания. – М.: Стандартинформ, 2016. – 105 с.
15. Ллойд Э., Ледерман У., Тюрина Ю.Н. Справочник по прикладной статистике: в 2 т. – М.: Изд-во «Финансы и статистика», 1989. – 510 с.
16. Грей Дж.Р., Дарли Г.С.Г. Состав и свойства буровых агентов (промысловых жидкостей): пер с англ. – М.: Изд-во «Недра», 1985. – 509 с.
17. Справочник химика. Т. 5 / Б.П. Никольский, О.Н. Григоров, М.Е. Позин, Б.А. Порай-Кошиц, В.А. Рабинович, Ф.Ю. Рачинский, П.Г. Романков, Д.А. Фридрихсберг. – Л.: Изд-во «Химия» Ленинградское отделение, 1968. – 968 с.
18. Тюрин Ю.Н., Макаров А.А. Анализ данных на компьютере. – М.: Изд-во «Финансы и статистика», 1995. – 384 с.
19. Крамер Г. Математические методы статистики. – М.: Изд-во «Мир», 1975. – 648 с.
20. Гублер Е.В., Генкин А.А. Применение непараметрических критериев статистики в медико-биологических исследованиях. – Л.: Изд-во «Медицина», 1973. – 142 с.
21. Исследование биополимерных буровых растворов на основе высокоминерализованных пластовых вод Восточной Сибири / Н.А. Буглов, Е.В. Аверкина, А.О. Устюжанин, А.С. Красинская // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 3. – С. 210–218.
22. Transformation of institutions of socio-economic development in the conditions of a long-term viral pandemic / I. Litvinenko, L. Gaisina, L. Semenova, E. Averkina, E. Gabdrakhmanov // AD ALTA: Journal of Interdisciplinary Research. – 2021 – V. 11. – № 2. S21. – P. 220–224.

Поступила 15.06.2022 г.

Информация об авторах

Ламбин А.И., кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазового дела Иркутского национального исследовательского технического университета.

Аверкина Е.В., старший преподаватель кафедры нефтегазового дела Иркутского национального исследовательского технического университета.

Ерыгина А.Н., техник по растворам, служба по растворам ООО «ИНК-СЕРВИС».

Красинская А.С., ведущий инженер по растворам ООО «ИНК-СЕРВИС».

UDC 622.243.24

EVALUATION OF THE VISCOSITY OF AQUEOUS SOLUTIONS OF XANTHAN RESINS

Anatoly I. Lambin¹,
alambin@ex.istu.edu

Elena V. Averkina¹,
averkina.l@yandex.ru

Anastasia N. Erygina²,
erygina_an@irkutskoil.ru

Anastasia S. Krasinskaya²,
krasinskaya_as@irkutskoil.ru

¹ Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russia.

² INK-Service,
24A, Oktyabrskoy revolyutsii street, Irkutsk, 664007, Russia.

The relevance. The widespread use of biopolymers in the composition of drilling fluids makes it possible to upgrade the latter in terms of improving the hydraulics of the circulation system, increasing the outflow capacity of the flushing fluid, solving issues of stability of the walls of an open borehole. Interest in the use of vegetable gums in drilling is increasing.

The main aim of the article is to determine the distinctive properties of aqueous polymer solutions in geological terms. The rheological properties of the drilling mud are an important factor in the productivity of the well deepening process. Thanks to the rheological curve of the drilling mud, we can more accurately estimate the equivalent circulation density and the ability to remove fracture products from the well, optimize hydraulic parameters, etc.

Objects: rheological properties of aqueous solutions of biopolymers, in particular, xanthan gum, which manufacturing companies supply in powder form.

Methods: instrumental methods for determining rheological parameters of aqueous solutions of biopolymers according to GOST 33696 (ISO 10416), estimation and analysis of the dispersion distribution with three measurements at each point of the experiment.

Results. The authors carried out the statistical study of the differences in the shear stress readings of aqueous solutions of the powders under study. Due to the non-compliance of the measured voltage values with the normal distribution, the nonparametric Mann–Whitney comparison criterion was used, the calculations of which for two possible combinations of small samples showed no differences. The susceptibility of rheological parameters of aqueous solutions of xanthan powders to pseudoplastic values of the Oswald de Weil power model is shown.

Key words:

Xanthan gum, biopolymer, rheological properties, viscometry, shear stress, viscosity, comparison criterion.

REFERENCES

- Ovchinnikov V.P., Aksenova N.A., Kamensky L.A., Fedorovskaya V.A. Polymer drilling fluids. Evolution «from rags to riches». *Drilling and Oil*, 2014, no. 12, pp. 24–29. In Rus.
- Chetverneva N.A., Teptereva G.A., Gaisin I.F., Shavshukova S.Yu. Evaluation of the effectiveness of the use of biopolymer drilling reagents when drilling horizontal wells. *Transport and storage of oil products and hydrocarbons*, 2019, no. 2, pp. 40–43. In Rus.
- Egamberdiev B.Sh., Negmatova K.S., Negmatov S.S. New composite polymer reagents for drilling fluids used in drilling oil and gas wells. *Universum: technical sciences*, 2020, no. 10 (79-3), pp. 40–46. In Rus.
- Minakov A.V., Neverov A.L., Zhigarev V.A., Guzei D.V., Mikhienkova E.I., Pryazhnikov M.I. *Rastvor dlya bureniya skvazhin v usloviyakh MMP* [Solution for drilling wells in MMP conditions]. Patent RF, no. 2723256 IPC SO9K8/08, 2020.
- Akpan E.U., Enyi G.C., Nasr G.G. Enhancing the performance of xanthan gum in water-based mud systems using an environmentally friendly biopolymer, Germany. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2020, vol. 10 (04), pp. 1933–1948.
- Hemphill T., Campos W., Pilehvari A. Yield-power law model more accurately predicts mud rheology, Moscow. *Oil and Gas*, 1993, vol. 91 (34), pp. 45–50.
- Akpan E.U. Water-based drilling fluids for high-temperature applications and water-sensitive and dispersible shale formations. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 175, pp. 1028–1038.
- Kumara S.M., Khan B.A., Rohit K.C., Purushotham B. Effect of carbon and nitrogen sources on the production of xanthan gum from *Xanthomonas campestris* isolated from soil. *Journal Arch Appl Sci Res*, 2012, vol. 4 (6), pp. 2507–2512.
- Akpan E.U., Enyi G.C., Nasr G.G. Enhancing the performance of xanthan gum in waterbased mud systems using an environmentally friendly biopolymer. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2020, vol. 10 (04), pp. 1933–1948.
- Salikhov I.F., Konesev G.V., Popov A.N. Mathematical modeling of the composition and properties of water-based flushing fluids using the complex drilling reagent BKR-5M *Territory neftegaz*, 2014, no. 6, pp. 20–26. In Rus.
- Okrajni S., Azar J.J. The effects of mud rheology on annular hole cleaning in directional wells. *SPE Drill Eng*, 1986, no. 1 (04), pp. 297–308.
- Neverov A.L., Rozhkov V.P., Batalina L.S., Mineev A.V. Influence of simple salts on the rheological properties of polymer solutions for drilling with SCC complexes in clay deposits. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2013, vol. 323, no. 1, pp. 196–200. In Rus.
- Naipeng Liu, Zhang Di, Hui Gao, Yule Hu, Longchen Duan. Real-time measurement of drilling fluid rheological properties: a review. *Journal Sensors MDPI*, 2021, vol. 21, 3592, pp. 1–20. Available at: <https://doi.org/10.3390/s21113592> (accessed 15 April 2022).
- GOST R 56946. *Materialy burovyykh rastvorov. Tekhnicheskie usloviya i ispytaniya* [Materials of drilling fluids. Technical conditions and tests]. Moscow, StandardInform Publ., 2016. 105 p.

15. Lloyd E., Lederman W., Tyurin Yu.N. *Spravochnik po prikladnoy statistike. v 2 t.* [Handbook of applied statistics: in 2 vol.]. Moscow, Finance and statistics Publ., 1989. 510 p.
16. Gray J.R., Darley G.S.G. *Sostav i svoystva burovnykh agentov (promyvochnykh zhidkostey)* [Composition and properties of drilling agents (flushing fluids)]. Translation from English. Moscow, Nedra Publ., 1985. 509 p.
17. Nikolsky B.P., Grigorov O.N., Pozin M.E., Porai-Koshits B.A., Rabinovich V.A., Romankov P.G., Friedrichsberg D.A. *Spravochnik khimika* [Chemist's handbook]. Leningrad, Khimiya Publ., Leningrad branch, 1968. Vol. 5. 968 p.
18. Tyurin Yu.N., Makarov A.A. *Analiz dannykh na kompyutere* [Computer data analysis]. Moscow, Finance and Statistics Publ. house, 1995. 384 p.
19. Kramer G. *Matematicheskie metody statistiki* [Mathematical methods of statistics]. Moscow, Mir Publ., 1975. 648 p.
20. Gubler E.V., Genkin A.A. *Primenenie neparametricheskikh kriteriev statistiki v mediko-biologicheskikh issledovaniyakh* [Application of nonparametric criteria for statistics in biomedical research]. Leningrad, Meditsina Publ., 1973. 142 p.
21. Buglov N.A., Averkina E.V., Ustyuzhanin A.O., Krasinskaya A.S. Investigation of biopolymer drilling fluids based on highly mineralized reservoir waters of Eastern Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 3, pp. 210–218. In Rus.
22. Litvinenko I., Gaisina L., Semenova L., Averkina E., Gabdrakhmanov E. Transformation of Institutions of socio-economic development in the conditions of a long-term viral pandemic. *AD ALTA: Journal of Interdisciplinary Research*, 2021, vol. 11, no. 2, S21, pp. 220–224.

Received: 15 June 2022.

Information about the authors

Anatoly I. Lambin, Cand. Sc., associate professor, Irkutsk National Research Technical University.

Elena V. Averkina, senior lecturer, Irkutsk National Research Technical University.

Anastasia N. Erygina, solution technician, INK-Service.

Anastasia S. Krasinskaya, lead engineer of drilling fluids, INK-Service.

УДК 550.42

МИКРОЭЛЕМЕНТЫ В ВОДЕ МАЛЫХ РЕК БАСЕЙНА РЕКИ АНЮЙ (ЗАПАДНЫЙ МАКРОСКЛОН СЕВЕРНОГО СИХОТЭ-АЛИНЯ)

Шестеркина Нина Михайловна¹,
shesterkina@ivep.as.khb.ru

Шестеркин Владимир Павлович¹,
shesterkin@ivep.as.khb.ru

¹ Институт водных и экологических проблем ДВО РАН,
Россия, 680000, г. Хабаровск, ул. Дикопольцева, 56.

Актуальность: изучение содержания растворенных форм микроэлементов в воде горно-таежных рек Нижнего Приамурья, дренирующих водосборы с рудопроявлениями олова и с гарями, появившихся после катастрофических пожаров в 1998 г.

Цель: оценка содержания микроэлементов в воде малых рек бассейна р. Анюй, которые необходимы для объективной оценки экологического состояния поверхностных вод края и проведения эффективных водоохраных мероприятий.

Объекты: горно-таежные водотоки бассейна р. Анюй (западный макросклон северного Сихотэ-Алиня, правобережный приток р. Амур в нижнем течении).

Методы: фильтрация проб воды через мембранные фильтры с диаметром пор 0,45 мкм, подкисление азотной кислотой; определение концентрации микроэлементов в подготовленных пробах методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на ICP-MS Agilent 7500cx в Центре коллективного пользования при ИВЭП ДВО РАН.

Результаты. В период открытого русла в 2011–2016 гг. проведены гидрохимические исследования малых рек в бассейне р. Анюй, крупного правобережного притока р. Амур. В пробах воды горно-таежных рек определялись параметры основного солевого состава, содержание органического вещества. Наиболее детально проведено изучение содержания растворенных форм микроэлементов в воде малых рек в пределах разных ландшафтов: горных – основная масса изученных рек; горных в верхней части и равнинных в нижней части бассейна (р. Манома); заболоченных водосборов (рр. Мухе и Эльман). Полученные материалы позволяют оценить их концентрации, временные колебания и соотношения на различных участках бассейна. Отмечены повышенные концентрации растворенных форм Mn, Fe, Zn, Ba, Cu, Ni, Se в воде малых рек, дренирующих рудопроявление «Мопау». Установлено низкое содержание, сотые доли мкг на литр, Cd, Co, Pb, V в горной части бассейна. Отмечено влияние пирогенной деградации почвенного покрова вследствие лесных пожаров на формирование качества воды горных рек. Показано, что временные колебания содержания микроэлементов в первую очередь определяются гидрологической обстановкой на водосборе. Отмечена роль заболоченных таежных ландшафтов в равнинной части бассейна и увеличение содержания органического вещества в повышении геохимической подвижности Fe, Mn, Cu, Ni, в меньшей степени Co, Al, V, за счет миграции в составе комплексных соединений с растворенным органическим веществом.

Ключевые слова:

Бассейн реки Анюй, северный Сихотэ-Алинь, таежные реки, микроэлементы, пространственная и временная изменчивость.

Введение

Малые реки имеют важное экологическое значение, являясь неотъемлемой частью окружающей природной среды, влияют на водность и химический состав средних рек. Небольшие гидрографические характеристики этих рек и непосредственный контакт с результатами хозяйственной деятельности человека определяют их уязвимость.

Река Анюй – один из крупных правобережных притоков Амура в нижнем течении, берет начало на западных склонах Сихотэ-Алиня. Длина реки 393 км, площадь водосбора 12700 км². Верхняя, большая по площади (65–67 %), часть бассейна имеет горный рельеф. От истока на протяжении 200 км река течет в меридиональном направлении по дну глубокой складки, затем прорывается через горные гряды Сихотэ-Алиня и выходит на Среднеамурскую равнину [1].

Верхняя часть водосбора занимает высокогорье Сихотэ-Алиня. Горы сложены вулканогенной толщей базальтов, их туфов, андезитами и др. породами. Склоны гор преимущественно крутые, сильно расчлененные долинами притоков Анюя, в основном покрыты лесом. До устья р. Гобилли преобладают гор-

ные темнохвойные леса таежной зоны, ниже – темнохвойные и темнохвойно-широколиственные леса.

В бассейне Анюя развиты подзолистые и горно-лесные бурые почвы. В пределах Среднеамурской равнины, западную часть которой река пересекает на участке нижнего течения, широкое распространение имеют листовенничные мари. Почвы равнины дерново-подзолистые и подзолисто-болотные.

Климат муссонный. Годовая сумма осадков составляет в нижнем течении около 700 мм, в горной части водосбора – 1100–1200 мм. Паводки наблюдаются 4–6 раз в году: снегодождевые в мае–июне, дождевые в сентябре–октябре. Продолжительность ледостава 155–160 дней с ноября по май [1]. В системе Анюя насчитывается около 5000 малых рек длиной до 10 км, шесть рек – до 100 км. Наиболее крупный приток – р. Манома длиной 198 км.

Химический состав вод рек северного Сихотэ-Алиня формируется на малоосвоенной территории, определяется преимущественно природными факторами. Основной вид хозяйственной деятельности – лесопользование, планируется разработка рудопроявлений олова «Мопау» и «Таусинское».

Химический состав вод малых рек в бассейне р. Анюй до недавнего времени практически не изучался. После катастрофических лесных пожаров в 1998 г. осуществлялся гидрохимический мониторинг малых рек западного склона Сихотэ-Алиня. По результатам исследований дана характеристика содержания основных ионов, биогенных и органических веществ. Кроме этого, изучалось влияние пожаров на гидрохимический режим малых рек и вынос растворенных веществ с гарей [2].

Целью работы является оценка содержания микроэлементов в воде малых рек бассейна р. Анюй, выявление факторов, определяющих их вариабельность.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования были разнопорядковые реки в бассейне р. Анюй с площадью водосборов от 4,5 до 2450 км² (рис. 1, табл. 1). Наблюдения проводили в 2011–2016 гг. в мае, июле, августе, октябре, ноябре и охватывали основные фазы водного режима: весеннее половодье, летнюю и осеннюю межень, паводки.

Пробы воды отбирали с поверхности, фильтровали через мембранные фильтры с размером пор 0,45 мкм, подкисляли азотной кислотой. Анализ подготовленных проб проводили методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на приборе ICP-MS Agilent 7500сх в Центре коллективного пользования при ДВО РАН.

Результаты и их обсуждение

Воды изученных малых рек по величине минерализации в основном ультрапресные до 40 мг/л. Исключение составляют воды левых притоков р. Гобилли: рр. Таунга и Могуча (до 84,2 мг/л), руч. Забытый, Горелый-2 и Завальный (в среднем до 60 мг/л), дренирующих рудопоявление «Мопау» (табл. 2).

Анализ временных колебаний содержания растворенных веществ показывает, что снижение минерализации для всех водотоков отмечается во время снегодождевых (май, июнь) и дождевых (август) паводков. Повышение отмечается в летнюю межень (июль) при усилении роли грунтового питания и перед ледоставом (ноябрь).

Природно-климатические условия определяют низкое содержание органического вещества (ОВ) и цветность вод от <5 до 20° за исключением равнинных притоков в нижнем течении рр. Манома, Мухэ и Эльман (табл. 2). Содержание взвешенных веществ низкое – <3 мг/л. Величина pH варьирует в широком диапазоне, в среднем кислотность воды сдвинута в щелочную область за исключением рек Мухэ и Эльман, в которых значения pH ближе к нейтральным.

Средние значения концентраций растворенных форм микроэлементов и пределы их колебания приведены в табл. 3. Полученные материалы по микроэлементному составу позволяют оценить их значения, временные колебания и соотношения на разных участках. Поскольку в бассейне р. Анюй отсутствует интенсивная антропогенная нагрузка, а речные воды в основном имеют слабощелочную реакцию, не способствующую миграции многих элементов, содержание металлов в основном невысокое. Временные колебания концентраций в первую очередь определяются гидрологической обстановкой на водосборе. В период открытого русла изменение концентраций элементов в воде рек зависит от соотношения их содержания в дождевых и подземных водах. В период весеннего половодья реки выносят вещества, накопившиеся в снежном покрове за длительный зимний период, в дождевые паводки поступают с поверхности водосбора со слабо закрепленным в почве и растительности материалом.

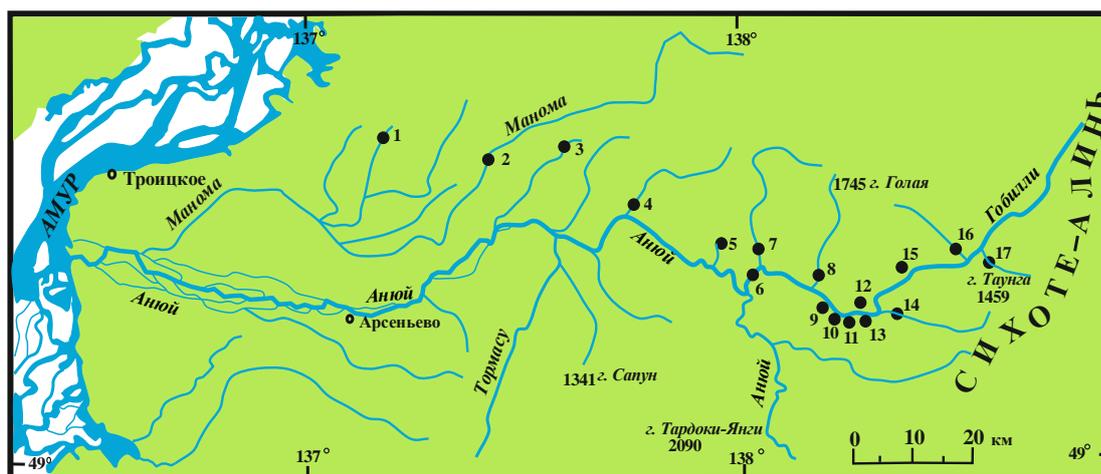


Рис. 1. Карта-схема района исследования. Водотоки: 1 – р. Эльман; 2 – р. Манома; 3 – р. Мухе; 4 – р. Богбасу; 5 – р. Куптурку; 6 – р. Гобилли; 7 – р. Бол. Эртукули; 8 – р. Мал. Эртукули; 9 – руч. Горелый-1; 10 – руч. Горелый-2; 11 – руч. Забытый; 12 – руч. Встречный; 13 – руч. Завальный; 14 – р. Могуча; 15 – руч. Быстрый; 16 – руч. Студеный; 17 – р. Таунга

Fig. 1. Map-scheme of the research area. Watercourses: 1 – Elman River; 2 – Manoma River; 3 – Mukhe River; 4 – Bogbasu River; 5 – Kupturku River; 6 – Gobilli River; 7 – Bolshaya Ertukuli River; 8 – Malaya Ertukuli River; 9 – Stream Gorely-1; 10 – Stream Gorely-2; 11 – Stream Zabyty; 12 – Stream Zavalny; 14 – Mogucha River; 15 – Stream Bystry; 16 – Stream Studeny; 17 – Taunga River

Таблица 1. Характеристика изученных рек, № – номер пункта отбора в соответствии с рис. 1, площадь водосбора (S), длина водотока (L), прочерк – отсутствие данных

Table 1. Characteristics of the studied rivers, No. – number of the sampling point in accordance with Fig. 1, drainage area (S), length of the watercourse (L), dash – no data

№	Водоток/Watercourse	S, км ² /km ²	L, км/km
1	Эльман/Elman	–	10
2	Манома/Manoma	2450	198
3	Мухэ/Mukhe	–	24
4	Богбасу/Bogbasu	–	30
5	Куптурку/Kupturku	31,2	26,6
6	Гобилли/Gobilli	1690	97
7	Большая Эртукули Bolshaya Ertukuli	–	31
8	Малая Эртукули Malaya Ertukuli	–	27
9	Горелый-1/Gorely-1	4,5	4,4
10	Горелый-2/Gorely-2	6,1	4,6
11	Забыйтый/Zabyty	11,8	11,7
12	Завальный/Zavalny	13,8	11,6
13	Могуча/Mogucha	–	18
14	Встречный/Vstrechny	–	10
15	Быстрый/Bystryy	–	8
16	Студеный/Studenyy	–	16
17	Таунга/Taunga	–	18

Поступление соединений железа в водные объекты обусловлено выветриванием горных пород. Высокий кларк металла обуславливает его появление в природных водах, но в малых количествах из-за низкой миграционной способности [3, 4]. Взвешенные и коллоидные формы – основные формы миграции Fe в пресных поверхностных водах, достигающие 95–97 % его валового содержания в воде рек и 65–85 % – водоемов [5]. Несмотря на то, что для рек, в отличие от водоемов, характерны взвеси минерального состава, исследования в Карелии [6], Сибири [7–9] и Приамурье [10–14] свидетельствуют о том, что во многих случаях повышенное содержание растворенных форм Fe в воде рек вызвано образованием комплексов с высокомолекулярными органическими веществами.

Среднее содержание растворенных форм Fe в реках бассейна р. Анюй за небольшим исключением низкое, так же как и в реках бассейна р. Тумнин [15], варьирует в узких пределах (<20–40 мкг/л). Повышенные значения характерны для р. Таунга (80 мкг/л) и обусловлены, вероятно, влиянием рудопроявлений. Временные колебания содержания растворенных форм Fe в реках горной части бассейна выражаются в незначительном повышении концентраций в ноябре при усилении роли грунтового питания. Изменение ландшафтной структуры водосбора в нижнем течении р. Анюй определяет повышение содержания растворенных форм Fe в водотоках равнинной заболоченной части бассейна: рр. Манома, Мухе, Эльман за счет миграции в составе комплексов с органическими соединениями (табл. 3). Максимальная концентрация (320 мкг/л), превышающая среднее содержание в речных водах [16, 17], отмечалась в мае 2016 г. в воде р. Мухэ при низкой мутности, высокой цветности воды (130°) и содержании ОВ (40 мг О/л).

Таблица 2. Характеристика химического состава речных вод бассейна р. Анюй (числитель – среднее значение, знаменатель – пределы изменения; М – минерализация)

Table 2. Characteristics of the chemical composition of river waters of the Anyu river basin (numerator – average value, denominator – limits of change; M – mineralization)

Водоток Watercourse	pH	M, мг/л mg/l	ХПК, мг О/л COD, mg O/l	Цветность, градус Color/degree
Эльман/Elman	6,6 6,0...7,0	25,2 20,4...32,0	33 17–49	86 60–95
Манома/Manoma	7,3	38,0	–	15
Мухэ/Mukhe	6,8 6,7...7,0	24,0 20,1...29,4	28 12–40	93 49–130
Богбасу/Bogbasu	7,4 7,2...7,5	36,4 35,6...37,2	7 <5–14	28 10–45
Куптурку Kupturku	7,2 6,7...7,5	26,1 21,9...29,0	<5 <58	8 <5–20
Гобилли/Gobilli	6,8	53,4	12	5
Большая Эртукули Bolshaya Ertukuli	7,2	32,0	19	9 <5–18
Малая Эртукули Malaya Ertukuli	7,3 7,1...7,8	34,0 28,5...40,7	<5 <5–9	6 <5–14
Горелый-1 Gorely-1	7,3 6,8...8,0	32,4 28,7...36,6	<5 <5–8	<5 <5–15
Горелый-2 Gorely-2	7,45 6,7...8,0	57,4 46,0...67,3	<5 <5–8	<5 <5–7
Забыйтый/Zabyty	7,4 6,5...8,0	56,1 48,8...63,4	4 <5–9	5 <5–10
Завальный Zavalny	7,4 6,7...7,7	59,6 52,0...66,3	<5	<5 <5–10
Могуча/Mogucha	7,75 7,6...7,9	75,7 71,6...79,8	7 <5–10	5
Встречный Vstrechny	7,4 6,6...8,1	35,4 33,0...40,6	<5 <5–9	<5 <5–7
Быстрый/Bystry	7,7	29,0	9	5
Студеный/Studenyy	6,2	30,8	–	<5
Таунга/Taunga	7,6	78,0	9	5

Марганец – один из наиболее распространенных элементов земной коры. Основным источником его поступления в объекты гидросферы являются железомарганцевые руды. Соединения Mn появляются также при разложении высших водных растений и гидробионтов [5]. Миграционная способность Mn значительно меньше, чем у Fe. Основная масса солей марганца в воде рек транспортируется во взвеси. Большое влияние на его миграцию в коллоидной и растворенной формах оказывают органические соединения за счет комплексообразования.

Содержание растворенных форм Mn в воде большинства рек бассейна р. Анюй низкое (средние значения <1 мкг/л), варьирует в небольших пределах от <0,1 до 2,68 мкг/л, в целом ниже, чем для глобального речного стока [17]. Концентрации растворенных форм Mn в бассейне р. Анюй сопоставимы с содержанием в водах р. Тумнин (1,2...2,7 мкг/л) [15]. Временная динамика содержания Mn в реках горной части бассейна Анюй выражается в незначительном повышении со снижением уровней воды в ноябре, как в Амуре в зимний период [18].

Повышенные концентрации Mn (до 8,7 мкг/л среднее значение), как наиболее подвижного металла по отношению к Fe, наблюдались при повышенном содержании последнего в тех же водотоках: р. Таунга в горной области и в реках равнинной заболоченной части бассейна р. Анной (табл. 3). Максимальное содержание – 10,6 и 17,0 мкг/л – отмечалось, как и для Fe, в мае 2016 г. в воде рр. Мухэ и Эльмана при высоких значениях цветности воды 130° и 95° соответственно. Как известно [5], между цветностью воды и концентрацией в ней Mn наблюдается четкая корреляция ($r=0,90$).

Алюминий является продуктом эрозии земной поверхности. В природных водах мигрирует во взвешенной, коллоидной и ионной формах. Влияние антропогенного фактора незначительное [19]. Миграционная способность очень низкая, образование комплексов с растворенным ОВ, главным образом с гуминовыми и фульвокислотами, увеличивает его миграционную подвижность и нахождение в растворенном состоянии.

Для вод изученных рек характерен широкий диапазон колебания как средних значений содержания растворенных форм Al, так пространственных и временных колебаний (табл. 3). В горной части бассейна значительно различались по содержанию Al воды левых и правых притоков р. Гобилли. Содержание Al в воде левых притоков: р. Могуча, руч. Забытый, Завальный, Горный-2, Горный-1 (3,0...6,6 средние значения и 12,2 мкг/л максимальное содержание) значи-

тельно ниже, чем в правых притоках: руч. Встречный, Быстрый, Студеный, р. Мал, Эртукули (10,9...12,0 средние и 53,6 мкг/л максимальное содержание).

Существенные различия концентраций Al в воде левых и правых притоков, возможно, обусловлены различиями в минералогическом составе легкорастворимых пород, а также влиянием лесных пожаров (в бассейне р. Анной в 1998 г. появились гари на площади 187 тыс. га). На водосборах малых горно-таежных водотоков – Завальный, Забытый, Горный-2 и др., покрытых старыми гарями и рубками, пожары обусловили полное выгорание почвенного и растительного покрова до подстилающих пород. Более высоким количеством обугленных растительных остатков отличался водосбор руч. Горный-1, пройденный верховым пожаром. При этом средняя концентрация Al в воде руч. Горный-1 (6,6 мкг/л) была в 2 раза выше, чем в водотоках, водосборы которых выгорели полностью. Среди факторов, влияющих на формирование качества воды горных рек из-за лесных пожаров, следует назвать пирогенную деградацию почвенного покрова.

Выгорание лесной подстилки и маломощных почв, сформированных на делювиальных отложениях, приводит к повышению инфильтрационной способности поверхности склонов, вследствие чего изменяется удельная водоносность территории и режим стока. Исследования свидетельствуют, что гидрохимический эффект пожаров сохраняется длительное время [2].

Таблица 3. Содержание растворенных элементов в воде малых рек западного макросклона северного Сихотэ-Алиня (мкг/л, в скобках количество проб)

Table 3. Content of dissolved elements in the water of small rivers of the western macroscline of the northern Sikhote-Alin, mcg/l, number of samples in parentheses

Элемент Element	Водоток/Watercourse					
	Эльман (4) Elman (4)	Манома (1) Manoma (1)	Мухе (4) Mukhe (4)	Богбасу (2) Bogbasu (2)	Куптурку (10) Kupturku (10)	Гобилли (1) Gobilli (1)
Al	<u>137,7</u> 67,2...224,3	38,4	<u>95,1</u> 67,0...142,6	<u>4,1</u> 2,3...5,8	<u>21,6</u> 4,2...65,8	18,3
Fe	<u>120</u> 80–160	60	<u>172</u> 100–320	<u>15</u> 10–20	<u>18</u> 10–30	60
Mn	<u>8,7</u> 3,2...17,0	3,1	<u>8,6</u> 6,6...10,6	<u>0,47</u> <0,1...0,94	<u>0,39</u> <0,1...0,71	1,29
Ba	<u>4,8</u> 4,3...5,2	8,3	<u>3,3</u> 2,6...4,2	<u>5,1</u> 5,1...5,2	<u>6,4</u> 3,5...15,0	7,7
Zn	<u>13,4</u> 6,6...18,6	24,5	<u>11,0</u> 3,6...15,3	<u>5,6</u> 4,2...7,1	<u>18,8</u> 5,1...28,4	19,1
Cu	<u>5,21</u> 2,41...9,27	1,61	<u>2,92</u> 0,77...5,27	<u>1,13</u> 0,46...1,80	<u>3,43</u> 0,93...6,94	2,29
Cd	<u>0,06</u> <0,01...0,20	<0,01	<0,01	<0,01	<u>0,02</u> <0,01...0,13	0,05
Co	<u>0,08</u> 0,06...0,09	<0,01	<u>0,08</u> 0,07...0,09	<0,01	<u>0,01</u> <0,01...0,07	0,02
Ni	<u>1,03</u> 0,83...1,43	0,65	<u>0,72</u> 0,54...0,87	<u>0,43</u> <0,1...0,86	<u>0,71</u> <0,1...4,39	1,0
Pb	<u>0,42</u> 0,16...0,86	<0,01	<u>0,13</u> 0,07...0,20	<0,01	<u>0,07</u> <0,01...0,33	<0,01
As	<u>0,17</u> 0,14...0,22	0,16	<u>0,14</u> 0,11...0,16	<u>0,54</u> 0,26...0,83	<u>1,13</u> 0,82...1,90	0,53
Cr	<u>0,18</u> <0,01...0,71	0,11	<u>0,15</u> <0,01...0,61	<0,01	<u>0,05</u> <0,01...0,43	<0,01
Mo	<0,01	0,24	<u>0,04</u> <0,01...0,09	<0,01	<u>0,20</u> <0,01...1,25	0,31
Sb	<0,01	–	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Se	<u>0,06</u> <0,01...0,13	<0,01	<u>0,06</u> <0,01...0,13	<u>0,12</u> 0,07...0,16	<u>0,12</u> <0,01...0,42	0,17
V	<u>0,24</u> 0,17...0,38	0,19	<u>0,25</u> 0,17...0,36	<u>0,06</u> 0,03...0,06	<u>0,11</u> 0,03...0,53	0,06

Окончание табл. 3

Table 3

Элемент Element	Водоток/Watercourse					
	Большая Эртукули (2) Bolshaya Ertukuli (2)	Малая Эртукули (10) Malaya Ertukuli (10)	Горелый-1 (10) Gorely-1 (10)	Горелый-2 (10) Gorely-2 (10)	Забывтый (7) Zabyty (7)	
Al	<u>2,3</u> 1,6...3,0	<u>12,0</u> 1,5...53,6	<u>6,6</u> 3,1...12,2	<u>3,3</u> 1,3...8,7	<u>3,0</u> 1,5...7,1	
Fe	<20	<u>20</u> 10–40	<u>19</u> 10–20	<u>30</u> 10–40	<u>30</u> 10–40	
Mn	<u>0,09</u> <0,1...0,18	<u>0,56</u> 0,15...1,48	<u>0,28</u> <0,1...1,04	<u>0,63</u> <0,1...1,45	<u>0,53</u> <0,1...2,01	
Ba	<u>4,8</u> 5,7...3,9	<u>8,8</u> 4,7...12,8	<u>3,2</u> 1,9...4,7	<u>3,9</u> 1,8...14,0	<u>3,6</u> 2,3...5,3	
Zn	<u>2,2</u> 1,9...2,6	<u>24,8</u> 1,6...73,4	<u>11,5</u> 4,3...21,4	<u>18,8</u> 3,7...50,1	<u>18,4</u> 3,0...52,4	
Cu	<u>2,31</u> 1,56–3,06	<u>2,26</u> 0,27...5,1	<u>1,74</u> 0,58...4,78	<u>2,40</u> 0,31...7,1	<u>3,1</u> 1,07...9,2	
Cd	<0,01	<u>0,02</u> <0,01...0,08	<u>0,12</u> 0,01...1,04	<u>0,06</u> 0,01...0,47	<u>0,01</u> 0,01...0,03	
Co	<0,01	<u><0,01</u> <0,01...0,02	< 0,01	<u>0,02</u> 0,01...0,07	<u>0,01</u> 0,01...0,03	
Ni	<u>0,37</u> 0,31...0,43	<u>0,37</u> <0,1...0,90	<u>0,28</u> <0,1...0,56	<u>0,51</u> <0,1...1,23	<u>0,44</u> <0,1...1,07	
Pb	<u>0,02</u> <0,01...0,04	<u>0,12</u> 0,01...0,52	<u>0,03</u> 0,01...0,27	<u>0,07</u> 0,03...0,09	<u>0,06</u> 0,03...0,09	
As	<u>0,42</u> 0,37...0,47	<u>0,28</u> 0,14...0,71	<u>0,16</u> 0,10...0,21	<u>0,38</u> 0,12...2,29	<u>0,18</u> 0,14...0,24	
Cr	< 0,01	<u>0,05</u> <0,01...0,44	<u>0,04</u> <0,01...0,39	<u><0,1</u> <0,01...0,47	<u><0,1</u> <0,01...0,65	
Mo	<u>0,04</u> <0,01...0,08	<u>0,14</u> <0,01...0,44	<u>0,08</u> <0,01...0,25	<u>0,14</u> <0,01...0,35	<u>0,13</u> <0,01...0,25	
Sb	<0,01	<0,01	<0,01	<u>0,04</u> 0,03...0,05	<u>0,04</u> 0,03...0,05	
Se	<0,01	<u>0,08</u> <0,01...0,25	<u>0,07</u> <0,01...0,19	<u>0,23</u> 0,12...0,35	<u>0,18</u> 0,13...0,28	
V	0,04	<u>0,07</u> 0,02...0,32	<u>0,06</u> 0,01...0,09	<u>0,03</u> 0,02...0,06	<u>0,05</u> 0,02...0,15	
Элемент Element	Водоток/Watercourse					
	Завальный (10) Zavalny (10)	Могуча (2) Moguchya (2)	Встречный (10) Vstrechnyy (10)	Быстрый (1) Bystryy (1)	Студеный (1) Studenyy (1)	Таунга (1) Taunga (1)
Al	<u>3,2</u> 0,34...8,5	<u>5,0</u> 1,4...8,6	<u>10,9</u> 1,2...41,6	25,5	22,8	16,8
Fe	<u>30</u> 10–40	<u>45</u> 40–50	<u>26</u> 20–40	30	30	80
Mn	<u>0,62</u> <0,1...1,11	<u>0,74</u> 0,68...0,81	<u>0,81</u> <0,1...2,68	1,10	0,48	8,5
Ba	<u>6,1</u> 4,4...8,9	<u>18,1</u> 17,8...18,4	<u>4,2</u> 2,6...6,2	3,4	2,0	15,7
Zn	<u>14,5</u> 3,5...30,8	<u>21,6</u> 12,6...30,7	<u>16,1</u> 7,7...47,8	34,1	26,2	34,1
Cu	<u>2,40</u> 0,50...11,4	<u>0,93</u> 0,57...1,29	<u>2,60</u> 0,54...5,89	1,18	6,2	24,6
Cd	<u>0,02</u> 0,01...0,05	<u>0,03</u> 0,02...0,04	<u>0,03</u> 0,01...0,09	0,03	0,01	0,07
Co	<u>0,02</u> 0,01...0,03	0,01	<u>0,01</u> 0,01...0,03	<0,01	0,01	0,03
Ni	<u>0,48</u> <0,1...0,81	<u>0,90</u> 0,82...0,97	<u>0,41</u> <0,1...0,62	0,37	0,35	0,96
Pb	<u>0,09</u> 0,03...0,18	< 0,01	<u>0,15</u> <0,01...0,92	<0,01	0,29	<0,01
As	<u>0,20</u> 0,14...0,29	<u>0,17</u> 0,15...0,19	<u>0,19</u> 0,10...0,63	0,41	0,16	0,19
Cr	<u><0,1</u> <0,01...0,45	< 0,01	<u>0,07</u> <0,01...0,53	<0,01	<0,01	<0,01
Mo	<u>0,16</u> <0,01...0,29	<u>0,50</u> 0,28...0,72	<u>0,17</u> <0,01...0,54	0,12	0,06	0,22
Sb	<u>0,02</u> 0,03...0,03	< 0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Se	<u>0,21</u> 0,11...0,43	<u>0,30</u> 0,27...0,32	<u>0,09</u> 0,06...0,17	0,06	0,04	0,22
V	<u>0,05</u> 0,02...0,14	0,04	<u>0,06</u> 0,03...0,09	0,06	0,04	0,05

Наибольшая контрастность концентраций Al в воде левых и правых притоков отмечалась в мае 2011 г.: левые притоки – Завальный (0,34), Горелый-2 (1,29), Горелый-1 (3,3 мкг/л); правые притоки – Встречный (41,6), Мал. Эртукули (53,6 мкг/л). В горных районах поверхностно-склоновый сток формируется в основном в половодье весной, когда происходит вынос в реки микроэлементов, накопившихся в снежном покрове, позднее мобилизованных из почв по мере ее оттаивания.

В реках нижней части бассейна р. Анюй (Гобилли, Куптурку, Манома) содержание Al выше: 18,3 и 21,6 мкг/л средние значения в воде рр. Гобилли и Куптурку соответственно. Максимальная концентрация – 65,8 мкг/л – наблюдалась в воде р. Куптурку в мае 2011 г., как и в правых притоках р. Гобилли. При низких значениях цветности воды и содержания органического вещества в этих водотоках повышение содержания Al в весеннее половодье, очевидно, происходит за счет увеличения доли тонкодисперсного вещества в растворенной фракции и миграции в условно растворенной форме (фильтрат 0,45 мкм).

В водотоках равнинной заболоченной территории, сложенной вулканогенными породами, с нейтральной и слабокислой реакцией воды и высоким (до 49 мг О/л по величине ХПК) содержанием ОВ и цветностью воды до 130° (табл. 2) концентрации были максимальными. В отличие от горных рек содержание Al в воде рр. Эльман и Мухе возрастает от весны к осени при одновременном увеличении содержания ОВ и цветности воды, что свидетельствует о миграции Al в составе комплексных соединений с ОВ. Следует отметить, что высокие концентрации Al характерны для притоков р. Усури в ее нижнем течении [14], а также для горных рек, дренирующих базальты восточного Сихотэ-Алиня [15], Канады [20].

Барий в речные воды поступает преимущественно из природных источников. Высвобождающийся при выветривании он малоподвижен, поскольку легко осаждается в виде сульфатных и карбонатных солей, как крупный катион Ba^{2+} легко сорбируется глинистыми частицами и гидроксидами Fe и Mn. Средние концентрации Ba в воде малых рек в бассейне р. Анюй в основном менее 10 мкг/л, сравнимы со средними значениями для вод Амура (8,0...18,2 мкг/л) [18]. В районе рудопроявления олова «Мопау» содержание Ba в воде рр. Таунга и Могуча несколько выше – до 18 мкг/л. Временные колебания концентраций незначительные. Повышение содержания иногда отмечалось в период весеннего половодья в мае и со снижением уровней воды в ноябре.

Цинк попадает в природные воды при разрушении и растворении горных пород и минералов [5]. Цинк – энергичный водный мигрант. Большая часть цинка мигрирует в составе взвешенных частиц, во взвесах преобладает сорбированная форма. Концентрация растворенных форм Zn в малозагрязненных поверхностных водах суши в большинстве случаев находится в пределах от долей до единиц, редко десятков, микрограммов на литр. Небольшие количества отмечены во взвеси горных рек [5]. В гумидной зоне до-

минируют растворенные формы с высоким процентом незакомплексованных ионов Zn^{2+} [21].

Концентрации Zn в растворенной форме в воде малых рек бассейна р. Анюй варьировали от единиц (1,6 минимальное значение) до десятков (73,4 – максимальное) микрограммов на литр и сопоставимы со средними значениями в воде р. Амур в период открытого русла [18]. Средние концентрации изменялись в пределах 20–30 мкг/л, за исключением рр. Богбасу (5,6) и Бол. Эртукули (2,2 мкг/л). Низкие значения в последних двух водотоках могут быть обусловлены небольшим количеством образцов (n=2).

Широкая амплитуда колебания содержания Zn в большей степени характерна для рек горной части бассейна р. Анюй. Максимальные концентрации отмечались в отдельные годы в мае – до 52,4 мкг/л в воде руч. Забытый, чаще в дождевые паводки летом: в воде руч. Горелый-2 до 50,1, руч. Встречный до 47,8, р. Мал. Эртукули до 73,4 мкг/л. Минимальные значения были перед ледоставом в ноябре (табл. 3). Росту содержания Zn в условиях повышенной водности могло способствовать повышение содержания тонкодисперсного вещества в растворенной фракции за счет миграции в условно растворенной форме (фильтрат 0,45 мкм).

В водотоках равнинной заболоченной области концентрации Zn (11,0...13,4 средние и 15,3...18,6 мкг/л максимальные значения) в воде рр. Мухе, Эльмана ниже по сравнению с речными водами горных районов. Очевидно, в речных водах бассейна р. Анюй Zn мигрирует преимущественно в ионной форме и в форме его минеральных комплексов. Повышенные содержания, как и в горных реках, отмечались в весеннее половодье в мае и дождевые паводки, минимальные – в ноябре (табл. 3).

Разрушение горных пород – основной источник появления меди в природных водах. Наибольшее распространение характерно для соединений Cu^{2+} , имеющих высокую растворимость. Медь образует прочные комплексы со многими органическими веществами, причем их устойчивость намного выше, чем с другими металлами со степенью окисления +2. Полученные на основе расчетных методов результаты свидетельствуют, что при образовании в воде комплексов Cu с неорганическими и органическими лигандами преобладают комплексы с органическими соединениями, среди которых доминируют фульватные (87–98 %), неорганические комплексы Cu появляются лишь при pH>9,0 в небольшом количестве (до 40 %) [22].

Среднее содержание растворенных форм Cu в воде рек бассейна р. Анюй изменялось в основном в пределах 1–3 мкг/л. Максимальное значение (24,6 мкг/л) отмечалось в воде р. Таунга в районе рудопроявления «Мопау». Геологические особенности горных районов бассейна р. Анюй могли обусловить дополнительное поступление Cu в речные воды.

Повышение содержания и максимальные концентрации во всех водотоках отмечались в год с обильным выпадением атмосферных осадков (2013 г.) и последующую весну, в мае 2014 г. Слабощелочная pH

речных вод, возможно, способствует образованию неорганических комплексов Cu.

Повышенное содержание Cu характерно для рек равнинной заболоченной части бассейна. В воде р. Эльман средняя концентрация Cu составила 5,21, максимальная – 9,27 мкг/л. Слабоокислая (6,0) и нейтральная (7,0) среда воды этих водотоков, наряду с высоким содержанием ОВ, увеличивают геохимическую подвижность тяжелых металлов за счет образования комплексов с ОВ, в основном фульватных.

Кадмий – рассеянный элемент, в основном содержится в большом числе минералов, прежде всего в сульфидах Zn, Cu, Fe и др., после выщелачивания которых Cd появляется в природных водах. Миграция растворенных форм Cd осуществляется в основном в виде органоминеральных и минеральных комплексов, взвешенных – в виде сорбированных соединений.

Растворенный Cd в воде малых рек бассейна р. Анной составлял сотые мкг/л. Повышенные концентрации отмечались лишь в воде руч. Горелый-2 (до 0,47 мкг/л) и руч. Горелый-1 в августе и ноябре 2012 г. (до 1,04 мкг/л), т. е. были эпизодическими.

Никель относится к числу малораспространенных элементов, в природных водах появляется в микроскопических количествах в результате выветривания горных пород. В поверхностных водах соединения Ni могут находиться в растворенном, взвешенном и коллоидном состояниях. Наиболее распространены соединения Ni в степени окисления +2, соединения Ni³⁺ образуются обычно в щелочной среде. Растворенные формы соединений Ni представляют комплексные ионы. В присутствии органических лигандов доминирует комплексообразование Ni с ними, причем наиболее существенный вклад вносят фульватные комплексы [23]. Несмотря на определенную роль в миграции Ni в виде растворенных форм, большая его часть переносится речными водами во взвеси.

Содержание растворенных форм Ni в воде рек бассейна р. Анной находится на уровне десятых долей микрограммов на литр. Повышенные до 1 мкг/л концентрации отмечались в реках, дренирующих рудопроявление «Мопан» и в воде рек равнинной заболоченной части бассейна. Повышенное содержание Ni по поперечному профилю р. Амур у Хабаровска преобладает в левобережной части с повышенным содержанием ОВ и высокой цветностью воды [18]. Для временных колебаний концентраций растворенного Ni характерно снижение иногда до значений <0,1 мкг/л в весеннее половодье в мае и повышение (максимальное значение 4,39 мкг/л в воде р. Куптурку) в условиях низкой водности в октябре–ноябре.

Кобальт в природных водах встречается реже, чем Ni, что можно объяснить меньшей его миграционной способностью и низким содержанием в горных породах [21]. Будучи слабым водным мигрантом, Co легко переходит в осадки, сорбируется гидроокисями марганца, глинами и другими высокодисперсными минералами. В растворенной форме Co мигрирует в основном с комплексными соединениями, в том числе с ОВ природных вод. Соотношение форм определяется составом, температурой и величиной рН водной среды.

Содержание растворенных форм Co в воде рек бассейна р. Анной низкое – в горных реках концентрации часто находятся ниже предела обнаружения или составляют сотые доли микрограммов на литр. Незначительное повышение содержания отмечалось в воде рек заболоченной части бассейна (табл. 3) за счет миграции в составе комплексов с ОВ.

Свинец – малораспространенный элемент, встречается в сульфидных рудах, растворение которых является одним из источников его появления в речных водах. Для Pb, как и для Al, Fe и Mn, характерно преобладание миграции во взвеси. В растворенной форме находится в виде минеральных и органоминеральных комплексов.

В воде рек бассейна Анной содержание растворенных форм Pb составляет сотые доли микрограмм на литр. В нижней части бассейна его концентрация в дождевые паводки повышалась до десятых долей микрограммов на литр, очевидно, из-за усиления роли тонкодисперсного вещества в растворенной фракции за счет миграции в условно растворенной форме (фильтрат 0,45 мкм).

Основной источник поступления Cr в речную сеть – выщелачивание горных пород, меньше из почв при разложении ОВ. Снижение содержания происходит за счет потребления водными организмами. В речных водах мигрирует в растворенной и взвешенной формах, причем переносится преимущественно во взвеси, сорбируясь на глинах и гидроокиси Fe [23]. В незагрязненных реках содержание растворенного Cr обычно колеблется от десятых долей до нескольких мкг/л. В бассейне р. Анной содержание растворенных форм Cr изменялось в небольших пределах, в основном было ниже предела обнаружения. Повышенные до 0,43–0,71 мкг/л концентрации отмечались во всех водотоках во время интенсивных дождей в конце июля 2014 г., что могло быть связано с увеличением количества тонкодисперсного вещества в растворенной фракции за счет миграции в условно растворенной форме (фильтрат 0,45 мкм).

Мышьяк – рассеянный элемент, в речную сеть поступает при выщелачивании горных пород в районах рудопроявлений и месторождений полиметаллов. Мигрирует в речных водах в растворенной и взвешенной формах. В растворенной форме соединения As встречаются в степени окисления As³⁺ и As⁵⁺, главным образом в виде анионов.

Атмосферные осадки являются первым звеном в круговороте и накоплении As в поверхностных водах. По данным [24] содержание As в дождевых водах юга Дальнего Востока составляло 0,13...1,7 мкг/л, ниже было в снеговых водах (0,03...1,8 мкг/л).

Невысокие концентрации As (0,16...0,38 мкг/л средние значения) с узким интервалом колебания характерны для вод малых рек горной части бассейна р. Анной. Незначительное повышение содержания As иногда отмечалось в мае. Низкие концентрации As (0,11...0,22 мкг/л) наблюдались в воде рек заболоченных водосборов. В более крупных притоках (Куптурку, Гобилли и Богбасу) содержание As было выше – в пределах 1 мкг/л.

Мо содержится в небольших количествах, основным источником появления в воде рек является выщелачивание горных пород, содержащих Мо. Снижение содержания может быть обусловлено сорбцией на взвеси, выпадением в осадок трудно растворимых соединений и потреблением организмами.

В речных водах бассейна р. Анной концентрации растворенных форм Мо составляют десятые доли микрограммов на литр (средние значения). Интервал колебания – от значений ниже предела обнаружения в малых реках горной части бассейна до 1,25 мкг/л (максимальное значение) в воде р. Куптурку. Незначительное повышение содержания Мо отмечалось в горных реках в условиях низких уровней воды в ноябре, в реках нижней части бассейна концентрации Мо иногда возрастали весной в мае.

Сурьма поступает в водотоки за счет выщелачивания минералов Sb, находится в растворенной и взвешенной формах. Характерные для речных вод окислительно-восстановительные условия обуславливают существование как Sb^{3+} , так и Sb^{5+} . В воде рек бассейна р. Анной концентрации растворенных форм Sb находятся ниже предела обнаружения кроме руч. Горелый-2, Забытый и Завальный с пирогенной деградацией почв на водосборах после пожаров. В воде этих водотоков концентрации составляли сотые доли микрограммов на литр (табл. 3).

Ванадий – рассеянный элемент, в свободном виде в природе не встречается, максимальным содержанием характеризуются магматические породы. В поверхностных водах в окислительных условиях мигрирует в форме V^{5+} , образуя устойчивые анионные комплексы. Большое значение в миграции V принадлежит растворенным комплексным соединениям с ОВ, в основном с гумусовыми кислотами. Для речных вод бассейна р. Анной характерны низкие, сотые доли микрограммов на литр, концентрации соединений V. Повышение средних значений концентраций V до десятых долей микрограммов в литре наблюдалось в воде рек нижней заболоченной части бассейна. До трети растворенного V [13] переносится в виде тонкодисперсного вещества, возможно, связанного с коллоидными окислами Fe, как было отмечено в воде карельских рек с высоким содержанием железа [6].

Селен – рассеянный элемент, встречается в малых количествах, в магматических породах содержание редко превышает 0,05 мг/кг, в осадочных породах связан с глинистой фракцией [25]. В воде рек концентрации Se варьируют от десятых долей до нескольких микрограммов в литре, в окислительных условиях он находится в виде селенита или селената, формула которых определяется значением pH и наличием солей некоторых металлов, таких как железо. Селениты, образующиеся при окислительных процессах, стабильны, могут мигрировать до тех пор, пока не будут

адсорбированы минеральными или органическими частицами [25].

Содержание Se в воде малых рек Маномы, Бол. Эртукули и др. в среднем изменялось от предела обнаружения до 0,23 мкг/л в р. Могуча. В районе рудопроявления «Мопау» содержание Se в воде рек было выше – 0,18...0,30 (средние значения), 0,43 мкг/дм³ – максимальная концентрация. Меньше (0,12...0,17 мкг/л) содержалось Se в рр. Куптурку, Гобилли и Богбасу. Максимальные концентрации отмечались в большей степени в весеннее половодье в мае. В остальных водотоках концентрации Se были низкие – сотые доли микрограммов на литр, в отдельных реках ниже предела обнаружения (табл. 3).

Заключение

Природные и климатические условия района исследования обуславливают в основном невысокие уровни концентраций растворенных форм микроэлементов.

Повышенные содержания Fe, Mn, Ba, Zn, Cu, Ni, Se характерны для малых рек района рудопроявления олова «Мопау». Низкие концентрации растворенных форм металлов, сотые доли микрограммов на литр, наблюдались для Cd, Co, Pb, V (в горной части бассейна), в реках равнинной части бассейна содержание этих металлов было выше, очевидно, за счет усиления роли тонкодисперсного вещества в растворенной фракции. Десятые доли микрограммов на литр составляли концентрации Ni, As, Mo. Концентрации Sb и Cr в реках в бассейне р. Анной чаще были ниже предела обнаружения.

Широкая амплитуда колебания характерна для содержания Al и Zn. Временная изменчивость и пространственная неоднородность распределения содержания Al и Zn, очевидно, определялись значительной ролью тонкодисперсного вещества в растворенной фракции за счет миграции в условно растворенной форме, а также составом пород водосборной площади и степенью выветренности алюмосиликатных минералов. Отмечается влияние пирогенной деградации почвенного покрова в результате пожаров на сток отдельных микроэлементов Al, Zn, в отдельных случаях Cd.

Изменение ландшафтной структуры водосбора р. Анной и усиление роли заболоченных таежных ландшафтов в равнинной части бассейна обуславливают увеличение содержания ОВ, которые повышают геохимическую подвижность Fe, Mn, Cu, Ni, в меньшей степени Al, Co, V за счет миграции в составе комплексных соединений.

Учитывая, что химический состав вод малых рек в бассейне р. Анной формируется на малоосвоенной территории, полученные значения концентраций микроэлементов являются характеристикой природного геохимического регионального фона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ресурсы поверхностных вод СССР. – Л.: Гидрометеоздат, 1970. – Т. 18. – Вып. 2. – 592 с.
2. Шестеркин В.П., Шестеркина Н.М. Многолетняя динамика химического состава вод таежных рек на гаях северного Си-

- хотэ-Алиня // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – 2017. – Т. 28. – № 2. – С. 56–70. DOI: 10.21513/0207-2564-2017-2-56-70
3. Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А. Микроэлементы в поверхностных водах суши и особенности их водной миграции // Доклады академии наук. – 2005. – Т. 405. – № 3. – С. 395–400.

4. Hydrochemistry of Fe and Mn in small boreal streams: the role of seasonality, landscape type and scale / L. Björkvald, I. Buffam, H. Laudon, C.M. Mörth // *Geochim. Cosmochim. Acta.* – 2008. – V. 72. – P. 2789–2804.
5. Никаноров А.М. Гидрохимия. – Ростов-на-Дону: «НОК», 2008. – 462 с.
6. Pokrovsky O.S., Schott J. Iron colloids/organic matter associated transport of major and trace elements in small boreal rivers and their estuaries (NW Russia) / *Chemical Geology.* – 2002. – V. 190. – № 1–4. – P. 141–179.
7. Trace element transport in western Siberian across a permafrost gradient / O.S. Pokrovsky, R.M. Manasypov, S.V. Loiko, I.A. Krickov, S.G. Kopysov, L.G. Kolesnichenko, S.V. Volobuev, S.N. Kirpotin // *Biogeosciences.* – 2016. – V. 13. – P. 1877–1900. DOI: 10.5194/bg-13-1877-2016
8. Major and trace elements in suspended matter of western Siberian rivers: first assessment across permafrost zones and landscape parameters of watersheds / I.V. Krickov, A.G. Lim, R.M. Manasypov, S.V. Loiko, S.N. Vorobyev, O.S. Pokrovsky, V.P. Shevchenko, O.M. Dara, V.V. Gordeev // *Geochim. Cosmochim. Acta.* – 2020. – V. 269. – P. 429–450. DOI: 10.1016/j.gca.2019.11.005
9. Aquatic environment and anthropogenic factor effects on distribution of trace elements in surface waters of European Russia and western Siberia / T.I. Moiseenko, M.I. Dinu, N.A. Gashkina, T.A. Kremleva // *Environmental Research Letters.* – 2019. – V. 14. – № 6. – 065010.
10. Biogeochemical processes of iron and related elements in terrestrial ecosystem of Amur river / H. Shibata, M. Yoh, B. Ohji, Y. Guo, F. Shi, T. Cai, X. Xu, D. Wang, B. Yan, V.V. Shamov // *Rep. Amur Okhotsk Proj.* – 2007. – № 4. – P. 75–93.
11. Concentration and species of dissolved iron in waters in Sanjiang plain, China / B. Yan, B. Zhang, M. Yon, X. Pan // *Rep. Amur Okhotsk Proj.* – 2010. – № 6. – P. 183–194.
12. Seasonal variations of dissolved iron concentration in active layer and rivers in permafrost areas, Russian Far East / Yu. Tashiro, M. Yoh, T. Shiraiwa, T. Onishi, V. Shesterkin, V. Kim // *Water (Switzerland).* – 2020. – V. 12. – 2579. DOI: 10.3390/w12092579
13. Chudaeva V.A., Shesterkin V.P., Chudaev O.V. Trace elements in surface water in Amur River Basin // *Water Resources.* – 2011. – V. 38. – № 5. – P. 650–661.
14. Гидрохимический сток речных вод юга Хабаровского края в период летнего паводка / Г.Ю. Павлова, Е.А. Вах, П.Я. Тищенко, В.И. Петухов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* – 2020. – Т. 331. – № 3. – С. 61–71. DOI: 10.18799/24131830/2020/3/2532
15. Шестеркин В.П. Гидрохимия рек природного заказника «Тумнинский» // *Водное хозяйство России.* – 2018. – № 3. – С. 4–15.
16. Гордеев В.В. Геохимия системы река–море. – М.: ИП Матушкина И.И., 2012. – 452 с.
17. Gaillardet J., Viers J., Dupre B. Trace elements in rivers waters // *Treasure on Geochemistry.* – Amsterdam: Elsevier Pergamon, 2004. – V. 5. – P. 225–272.
18. Space and time variations of the concentrations dissolved forms of microelements in Amur river water / N.M. Shesterkina, V.P. Shesterkin, V.S. Talovskaya, T.D. Ri // *Water Resources.* – 2020. – V. 47. – № 4. – P. 629–640. DOI: 10.1134/S0097807820020177
19. Гордеев В.В. Реки Российской Арктики: потоки осадочного материала с континента в океан // *Новые идеи в океанологии. Геология.* – М.: Наука, 2004. – Т. 2. – С. 113–167.
20. Trace metal geochemistry of remote rivers in the Canadian Arctic Archipelago / M. Colombo, K.A. Brown, K.J. Orians, J. de Vera, B.A. Bergquist // *Chemical Geology.* – 2019. – V. 525. – P. 479–491. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2019.08.006
21. Посохов Е.В. Общая гидрогеохимия. – Л.: Недра. 1975. – 207 с.
22. Гончарова Т.О., Колосов И.В., Каплин В.Т. О формах нахождения металлов в поверхностных водах // *Гидрохимические материалы.* – 1980. – Т. 77. – С. 16–26.
23. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. – М.: Изд-во «Мир», 1989. – 439 с.
24. Chudaeva V.A., Yurchenko S.G., Chudaev O.V. Chemical composition of precipitation in the southern part of the Russian Far East // *Water Resources.* – 2008. – V. 35. – № 1. – P. 58–70. DOI: 10.1007/s11268-008-1007-9
25. Линник П.Н., Набиванец Б. И. Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 270 с.

Поступила 17.06.2022 г.

Информация об авторах

Шестеркина Н.М., научный сотрудник лаборатории лаборатории гидроэкологии и биогеохимии Института водных и экологических проблем ДВО РАН.

Шестеркин В.П., кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, исполняющий обязанности заведующего лабораторией гидроэкологии и биогеохимии Института водных и экологических проблем ДВО РАН.

UDC 550.42

TRACE ELEMENTS IN THE WATER OF SMALL RIVERS OF THE ANYU RIVER BASIN (WESTERN MACRO-SLOPE OF THE NORTHERN SIKHOTE-ALIN)

Nina M. Shesterkina¹,
shesterkina@ivep.as.khb.ru

Vladimir P. Shesterkin¹,
shesterkin@ivep.as.khb.ru

¹ Institute of Water and Environmental Problems, Far East Branch, Russian Academy of Sciences,
56, Dikopoltsev street, Khabarovsk, 680000, Russia.

The relevance of the study lies in the need to assess the content of trace elements in the water of mountain-taiga rivers of the Amur region draining catchments with burnt areas after the catastrophic fires of 1998 and tin ore occurrences.

Objective: to assess the content of trace elements in the water of small rivers of the Anyu River basin, to identify the factors determining their variability.

Objects: mountain-taiga watercourses in the Anyu River basin (right-bank tributary of the Lower Amur River).

Methods: filtration of water samples through membrane filters with a pore diameter of 0,45 μm by acidifying with nitric acid; determination of trace elements by inductively coupled plasma mass spectrometry at the ICP-MS Agilent 7500cx in the Center collective use at the IWEPP RAS.

Results. The content of dissolved forms of trace elements in the water of taiga rivers of the Anyu River basin in 2011–2016 is characterized. The materials obtained allow us to estimate their values, temporal fluctuations and ratios in different sections of the basin. Increased concentrations of dissolved forms of Mn, Fe, Zn, Ba, Cu, Ni, Se associated with the geochemical features of the territory were found. It is shown that temporal fluctuations in the content are primarily determined by the hydrological situation in the watershed. The role of water-logged taiga landscapes in the plain part of the basin and the increase in the content of organic matter on increasing the geochemical mobility of Fe, Mn, Cu, Ni, to a lesser extent Co, Al, V due to migration as complex compounds with dissolved organic matter is noted.

Key words:

Anyu river basin, northern Sikhote-Alin, taiga rivers, trace elements, spatial and temporal variability.

REFERENCES

1. *Resursy poverhnostnykh vod SSSR* [Surface water resources of the USSR]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1970. Vol. 18, Iss. 2, 592 p.
2. Shesterkin V.P., Shesterkina N.M. Multi-year dynamics of the water chemical composition of the taiga rivers in the burned-out forest of the northern Sikhote Alin. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, 2017, vol. 28, no. 2, pp. 56–70. In Rus.
3. Moiseenko T.I., Gashkina N.A. Elements in the surface water and properties of its water migration. *Doklady akademii nauk*, 2005, vol. 405, no. 3, pp. 395–400. In Rus.
4. Björkvald L., Buffam I., Laudon H., Mörth C.M. Hydrochemistry of Fe and Mn in small boreal streams: the role of seasonality, landscape type and scale. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2008, vol. 72, pp. 2789–2804.
5. Nikanorov A.M. *Gidrokimiya* [Hydrochemistry]. Rostov-on-Don, NOK Publ., 2008. 462 p.
6. Pokrovsky O.S., Schott J. Iron colloids/organic matter associated transport of major and trace elements in small boreal rivers and their estuaries (NW Russia). *Chemical Geology*, 2002, vol. 190, no. 1–4, pp. 141–179.
7. Pokrovsky O.S., Manasypov R.M., Loiko S.V., Krickov I.A., Kopysov S.G., Kolesnichenko L.G., Volobyyev S.V., Kirpotin S.N. Trace element transport in western Siberian across a permafrost gradient. *Biogeosciences*, 2016, vol. 13, pp. 1877–1900.
8. Krickov I.V., Lim A.G., Manasypov R.M., Loiko S.V., Vorobyev S.N., Pokrovsky O.S., Shevchenko V.P., Dara O.M., Gordeev V.V. Major and trace elements in suspended matter of western Siberian rivers: first assessment across permafrost zones and landscape parameters of watersheds. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2020, vol. 269, pp. 429–450.
9. Moiseenko T.I., Dinu M.I., Gashkina N.A., Kremleva T.A. Aquatic environment and anthropogenic factor effects on distribution of trace elements in surface waters of European Russia and western Siberia. *Environmental Research Letters*, 2019, vol. 14, no. 6, 065010.
10. Shibata H., Yoh M., Ohji B., Guo Y., Shi F., Cai T., Xu X., Wang D., Yan B., Shamov V.V. Biogeochemical processes of iron and related elements in terrestrial ecosystem of Amur river. *Rep. Amur Okhotsk Pro.*, 2007, no. 4, pp. 75–93.
11. Yan B., Zhang B., Yon M., Pan X. Concentration and species of dissolved iron in waters in Sanjiang plain, China. *Rep. Amur Okhotsk Proj.*, 2010, no. 6, pp. 183–194.
12. Tashiro Yu., Yoh M., Shiraiwa T., Onishi T., Shesterkin V., Kim V. Seasonal variations of dissolved iron concentration in active layer and rivers in permafrost areas, Russian Far East. *Water (Switzerland)*, 2020, vol. 12, 2579.
13. Chudaeva V.A., Shesterkin V.P., Chudaev O.V. Trace elements in surface water in Amur River Basin. *Water Resources*, 2011, vol. 38, no. 5, pp. 650–661.
14. Pavlova G.Yu., Vah E.A., Tishchenko P.Ya., Petuhov V.I. Hydrochemical discharge of river waters of southern Khabarovsk region in the period of summer high water. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 3, pp. 61–71. In Rus.
15. Shesterkin V.P. Hydrochemistry of the «Tuminskiy» nature reserve river. *Water sector of Russia: problems, technologies, management*, 2018, no. 3, pp. 4–15. Rus.
16. Gordeev V.V. *Geokhimiya sistemy reka-more* [Geochemistry of the river-sea system]. Moscow, Matushkina Publ., 2012. 452 p.
17. Gaillardet J., Viers J., Dupre B. *Trace elements in rivers waters. Treasure on Geochemistry*. Amsterdam, Elsevier Pergamon, 2004. Vol. 5, pp. 225–272.
18. Shesterkina N.M., Shesterkin V.P., Talovskaya V.S., Ri T.D. Space and time variations of the concentrations dissolved forms of microelements in Amur river water. *Water Resources*, 2020, vol. 47, no. 4, pp. 629–640.
19. Gordeev V.V. Reki Rossiyskoy Arktiki: potoki osadochnogo materiala s kontinenta v okean [Rivers of the Russian Arctic: flows of sedimentary material from the continent to the ocean]. *Novye idei v okeanologii. Geologiya* [New ideas in oceanology. Geology]. Moscow, Nauka Publ., 2004. Vol. 2, pp. 113–167.

20. Colombo M., Brown K.A., Orians K.J., De Vera J., Bergquist B.A. Trace metal geochemistry of remote rivers in the Canadian Arctic Archipelago. *Chemical Geology*, 2019, vol. 525, pp. 479–491.
21. Posokhov E.V. *Obshchaya gidrogeokhimiya* [General hydrogeochemistry]. Leningrad, Nedra Publ., 1975. 207 p.
22. Goncharova T.O., Kolosov I.V., Kaplin V.T. O formakh nakhozhdeniya metallov v poverkhnostnykh vodakh [On the forms of finding metals in surface waters]. *Gidrokhimicheskie materialy*, 1980, vol. 77, pp. 16–26.
23. Kabata-Pendias A., Pendias H. *Mikroelementy v pochvakh i rasteniyakh* [Trace elements in soils and plants]. Moscow, Peace Publ., 1989. 439 p.
24. Chudaeva V.A., Yurchenko S.G., Chudaev O.V. Chemical composition of precipitation in the southern part of the Russian Far East. *Water Resources*, 2008, vol. 35, no. 1, pp. 58–70.
25. Linnik P.N., Nabivanets B.I. *Formy migratsii metallov v presnykh poverkhnostnykh vodakh* [Forms of metal migration in fresh surface waters]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1986. 270 p.

Received: 17 June 2022.

Information about the authors

Nina M. Shesterkina, researcher, Institute of Water and Environmental Problems, Far East Branch, Russian Academy of Sciences.

Vladimir P. Shesterkin, Cand. Sc., leading researcher, acting head of the Laboratory of Hydroecology and Biogeochemistry, Institute for Water and Environmental Problems of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences.

УДК 004.852, 004.67

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПРОМЫШЛЕННЫМ ПРЕДПРИЯТИЕМ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Моргоева Анжелика Джабраиловна¹,
m.angelika-m@yandex.ru

Моргоев Ирбек Джабраилович¹,
m.irbek@yandex.ru

Клюев Роман Владимирович²,
kluev-roman@rambler.ru

Гаврина Оксана Александровна¹,
Gavrina-Oksana@yandex.ru

¹ Северо-Кавказский горно-металлургический институт (Государственный технологический университет),
Россия, 362011, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44.

² Московский политехнический университет,
Россия, 107023, г. Москва, ул. Б. Семеновская, 38.

Актуальность исследования заключается в необходимости развития энергосберегающих подходов за счет применения средств интеллектуального анализа данных для повышения эффективности процесса принятия управленческих решений и, как следствие, более оптимального использования энергетических ресурсов. В частности, прогнозирование потребления электрической энергии промышленного объекта упростит процесс принятия управленческих решений и будет способствовать минимизации затрат электроэнергии на производство единицы продукции. Наличие точного прогноза позволит задействовать резервные мощности в часы пиковой нагрузки на электроэнергетический комплекс. На практике для реализации прогнозирования не всегда подходят существующие методы расчета нагрузки на электросеть, поэтому исследование носит междисциплинарный характер, сочетая в себе важную практическую значимость и выработку новых рекомендаций в части применения алгоритмов машинного обучения.

Целью исследования является анализ научных работ, содержащих предложения по повышению точности определения энергетических нагрузок с помощью интеллектуального анализа данных, а также разработка модели машинного обучения, позволяющей создавать достоверный прогноз потребления электроэнергии для промышленного предприятия.

Объекты: промышленное предприятие, которое характеризуется сложностью определения энергетических характеристик технологического оборудования.

Методы: аналитический метод, методы математической статистики, методы машинного обучения, комплексного обобщения научных достижений и практического опыта применения средств обработки данных в задачах прогнозирования нагрузки на электросеть.

Результаты. Проведен обзор литературных источников, освещающих вопросы применения интеллектуального анализа данных в управлении энергопотреблением, и представлены основные результаты прогнозирования суммарных объемов потребления электроэнергии по данным промышленного объекта. Рассмотрены методы интеллектуального анализа данных, применяемые для решения задач энергосбережения для различных объектов. Построена модель машинного обучения на основе алгоритма градиентного бустинга библиотеки CatBoost, позволяющая получить прогноз потребления электроэнергии по месяцам с уровнем надежности 92 %. Результаты проведенного исследования актуальны для принятия решений на тактическом и стратегическом уровнях управления предприятием для среднесрочного (помесячного) и долгосрочного (от года до нескольких лет) прогнозирования электрических нагрузок соответственно.

Ключевые слова:

Ресурсосберегающие технологии, энергосбережение, прогнозирование, интеллектуальный анализ данных, машинное обучение, градиентный бустинг.

Введение

Оптимальное управление ресурсами является важной задачей менеджмента предприятия. В понятие термина «ресурсосберегающие технологии» заложено обеспечение минимально возможных затрат ресурсов на производство единицы продукции при сохранении заданного уровня качества. В данной работе рассматривается электроэнергия как важный ресурс, необходимый для функционирования не только промышленных предприятий, но и для большинства других объектов гражданского назначения.

Одним из последствий роста глобального использования вычислительной и бытовой техники является увеличение потребления электрической энергии, что влечет за собой ряд экологических проблем. Отдельно стоит отметить, что вопросы энергосбережения актуальны и с точки зрения экономических выгод, получаемых при рациональном управлении энергетическими ресурсами. При комплексном рассмотрении причин возрастания электрических нагрузок в контексте вычислительной техники и средств обработки данных можно заметить следующие особенности.

С одной стороны, развитие и применение методов интеллектуального анализа данных, в частности для задачи прогнозирования электрических нагрузок, способствует уменьшению и рационализации использования ресурсов. Однако, с другой стороны, для выполнения процедур машинного обучения требуются значительные вычислительные ресурсы и, следовательно, увеличение потребления электрической энергии.

В данной работе приведены результаты исследований по поиску возможных путей сокращения электрических нагрузок. В частности, приведены примеры эффективных решений в части сокращения расходов на электроэнергию с помощью применения интеллектуальной обработки данных, и проведено прогнозирование электрических нагрузок с целью минимизации затрат на электроэнергию за счет наличия точного прогноза и дальнейшего учета прогнозных данных при планировании расходов на электроэнергию.

Обзор литературы

Исследованиям и разработке энергосберегающих технологий посвящены научные работы в России и за рубежом [1–14].

Поэтому первым этапом исследования стал аналитический обзор литературных источников по теме интеллектуального анализа данных, применяемого для решения задач энергосбережения в различных сферах деятельности. Рассмотрим некоторые работы более подробно.

В [15] учеными из Токио представлен подход, позволяющий оптимально управлять энергопотреблением здания (на примере гостиницы). Метод представляет собой комбинацию методов машинного обучения и метаэвристики, и его разработчики утверждают, что применение этого подхода позволило сократить операционные расходы на потребление электроэнергии более чем на 10 %.

Согласно [15] метод машинного обучения на основе глубоких нейронных сетей использовался для прогнозирования оптимальной работы интегрированных систем градирен, а метод метаэвристики – для оптимизации работы других компонентов энергетического комплекса. Исследователи поясняют, что создание гибридного метода позволяет учитывать нелинейность данных электропотребления для некоторых видов оборудования.

Ученые в [15] дифференцируют методы оптимизации энергосистемы на две основные группы. Первая группа связана с использованием мощных решений, таких как смешанно-целочисленное линейное программирование. В другую группу исследователи отнесли метаэвристические методы и модели машинного обучения, применяемые для учета нелинейности данных. Ученые концентрируют внимание на второй группе методов, так как линейные модели позволяют моделировать лишь ограниченные случаи, основаны на сравнении сценариев и сопряжены со значительными затратами времени и вычислительных ресурсов.

В результате исследования, описанного в [15], с помощью метаэвристики были определены оптимальные графики работы каждого энергопотребляющего устройства на 24 часа. Чтобы снизить вычислительные нагрузки, в метаэвристику была интегрирована регрессионная модель. Как утверждают авторы, в работе были применены модели линейного множественного регрессионного анализа, модель случайного леса и глубокая нейронная сеть (Deep Neural Network – DNN). Параметры модели случайного леса были установлены на 100 деревьев поиска, для DNN были заданы три скрытых слоя (количество узлов: 100, 100, 500). В связи с тем, что в [15] предполагалось оптимизировать потребление электроэнергии, кондиционирования и горячего водоснабжения одновременно, учеными была поставлена и решена задача сложной нелинейно оптимизации. При этом с помощью методов машинного обучения и метаэвристик были получены оптимальные графики работы устройств, что позволило сократить суточные эксплуатационные расходы. Однако, как утверждают разработчики, данный гибридный метод еще не до конца изучен, и необходимо дальнейшее его тестирование на других объектах.

Российскими учеными из Новосибирского государственного технического университета (НГТУ) совместно с компанией, занимающейся цифровизацией энергетики, было проведено прогнозирование энергопотребления крупных энергоемких промышленных предприятий [16]. Исследователи ставили задачу – автоматизировать работу экспертов, занимающихся составлением почасового прогноза потребления электрической энергии на сутки. Использованные методы: за основу была взята модель рекуррентных нейронных сетей с долгосрочной памятью (Long Short-Term Memory Recurrent Neural Networks), разработанная в НГТУ. Рассматривались следующие предприятия: нефтедобывающая и нефтеперерабатывающая компания, мебельный завод, завод по производству стали и труб, компания по добыче и обработке драгоценных камней, горно-обогатительный комбинат, металлургический завод. Исходными данными были: фактическое потребление электроэнергии, данные ремонта и метеорологические данные из открытых источников. Стоит отметить, что полученные с помощью моделей машинного обучения прогнозы сравнивались не только с фактическими данными потребления электроэнергии, но и с прогнозными значениями экспертов. Экономическая эффективность рассчитывалась от снижения ошибки на 1 %. Исследователи констатируют, что в целом в результате экспериментов получена незначительная разница между точностью прогнозов экспертов и нейронной сети. Исключение составила компания по добыче и обработке драгоценных камней, где снижение ошибки, полученное в результате использования модели машинного обучения, составило от 1 до 2,7 %.

В работе [17] представлены результаты применения машинного обучения для прогнозирования потребления энергии охлаждения в офисных зданиях с учетом поведения людей. Исследователи отмечают,

что прогнозирование энергопотребления в зданиях играет ключевую роль в принятии решений по энергоэффективности. С развитием аналитики данных в последние годы был разработан ряд моделей прогнозирования энергопотребления зданий на основе машинного обучения, однако существующие модели прогнозирования недостаточно учитывают поведение людей, находящихся в зданиях. Чтобы устранить этот пробел, в [17] представлен подход машинного обучения для прогнозирования энергопотребления здания с учетом поведения людей. При разработке модели были протестированы и сопоставлены четыре алгоритма машинного обучения с точки зрения точности прогнозирования и вычислительной эффективности: деревья классификации и регрессии (Classification and Regression Trees – CART), деревья ансамблевого бэггинга (Ensemble Bagging Trees – EBT), искусственные нейронные сети (Artificial Neural Networks – ANN) и глубокие нейронные сети (DNN). Результаты моделирования продемонстрировали большое влияние переменных, рассмотренных в исследовании, на целевой результат – потребление электроэнергии [17]. Деятельность работников офисного здания повлияла на потребление энергии более чем в 7 раз. Столь высокая производительность показывает потенциал предлагаемого подхода. Ученые полагают, что такой подход может способствовать лучшему пониманию влияния поведения людей на потребление электроэнергии в здании и определить возможности для поведенческих мер по энергосбережению.

Работа [18] посвящена прогнозированию энергопотребления и оценке влияющих факторов с использованием подхода машинного обучения на полномасштабных очистных сооружениях. Поскольку очистные сточных вод является энергоемким процессом и вносит основной вклад в затраты на очистные сооружения, анализ и прогнозирование энергопотребления имеют важное значение при проектировании и эксплуатации очистных сооружений. В [18] было проведено исследование влияния на суточное потребление электроэнергии очистными сооружениями следующих факторов: сточных вод, гидравлических и климатических параметров. Данные энергопотребления были взяты из архива комплекса очистных сооружений, расположенного в Мельбурне, за шесть лет (2014–2019 гг.). Учеными были применены методы инженерии данных для объединения функций из разных ресурсов. С этой целью были использованы четыре различных алгоритма выбора функций (Feature Selection – FS), чтобы выявить отношения между этими переменными и выбрать наиболее релевантные переменные для обучения моделей машинного обучения (Machine Learning – ML). Далее были применены искусственные нейронные сети (ANN). Два алгоритма деревьев решений – Gradient Boosting Machine (GBM) и Random Forest (RF) – были изучены для прогнозирования потребления электроэнергии с оценкой доверительного интервала 95 %. Результаты исследованных в [18] алгоритмов показали, что общий азот, химическая потребность в кислороде имеют наибольшее влияние на потребление энергии

очистными сооружениями. Более того, у GBM был лучший прогноз производительности среди всех других алгоритмов регрессии, а доверительный интервал, равный 95 %, показал разумную полосу ошибок прогноза.

Немецкие ученые решили другую актуальную задачу, заключающуюся в разработке метода анализа кривых электроэнергетической нагрузки для обнаружения аномалий. В [19] исследователи утверждают, что точное понимание кривых энергетической нагрузки является ключом к эффективному управлению энергосистемами предприятия и основой для нескольких энергетических приложений (например, прогнозов, обнаружения аномалий). Также ученые отмечают, что анализ кривой нагрузки является темой исследования, имеющей практическое значение во многих областях. Кроме того, исследователи акцентируют внимание на отсутствии методов для оценки различных временных переходов между энергетическими состояниями при анализе кривых нагрузок. В [19] представлена новая методология, сочетающая методы одномерной кластеризации без учителя и методы, основанные на многомерном прогнозировании, основанном на использовании искусственной нейронной сети. Для обнаружения аномалий в управлении энергоэффективностью эти методы применены и проверены на реальных заводских данных. Кроме того, ученые утверждают, что несмотря на то, что демонстрация методологии сосредоточена на анализе кривых электрической нагрузки, представленный подход может быть перенесен на другие формы энергии (например, сжатый воздух, производственный газ и т. д.).

Проанализировав современные исследования в области применения интеллектуального анализа данных для получения энергосберегающих решений, был сделан вывод, подтверждающий актуальность подобных разработок. Стоит заметить, что в большинстве из предлагаемых в литературе методов использованы комбинации различных алгоритмов машинного обучения и эвристических подходов. С учетом того, что исходные данные к исследованию являются данными об электропотреблении промышленного предприятия, которое характеризуется сложностью определения энергетических характеристик технологического оборудования, было принято решение провести прикладное исследование.

Прогнозирование потребления электрической энергии

На начальном этапе исследования был проведен сбор информации о предприятии и исходных данных по его электропотреблению. С учетом соглашения о неразглашении (non-disclosure agreement – NDA) наименование предприятия обезличено. Его краткая характеристика следующая: небольшое промышленное предприятие, технологическое оборудование которого энергоемкое и устаревшее, выпуск продукции неравномерный в течение года. Учет потребления электроэнергии ведется дифференцировано для потребления на технические нужды и освещение. Предприятие имеет 14 подразделений, в которых 2 не

имеют расходов на технические нужды (административные корпуса).

В качестве исходных данных были взяты: фактические данные помесичного потребления электроэнергии за период с 2015 по 2021 гг., метеорологические данные из открытых источников информации.

Исследование было выполнено на языке программирования Python (v. 3.10.0) в среде программирования Jupyter Notebook. Были использованы библиотеки Numpy и Pandas (для вычислений и манипуляций с

данными), Matplotlib и Seaborn (для визуализации данных), Scikit-learn, XGBoost и CatBoost (для предобработки данных и загрузки экземпляров моделей регрессии).

На первом этапе исследования был проведен анализ исходного набора данных (дата-сета). На рис. 1 приведены графики потребления электроэнергии по годам по суммарному потреблению электроэнергии, потреблению на технические нужды и на освещение соответственно.

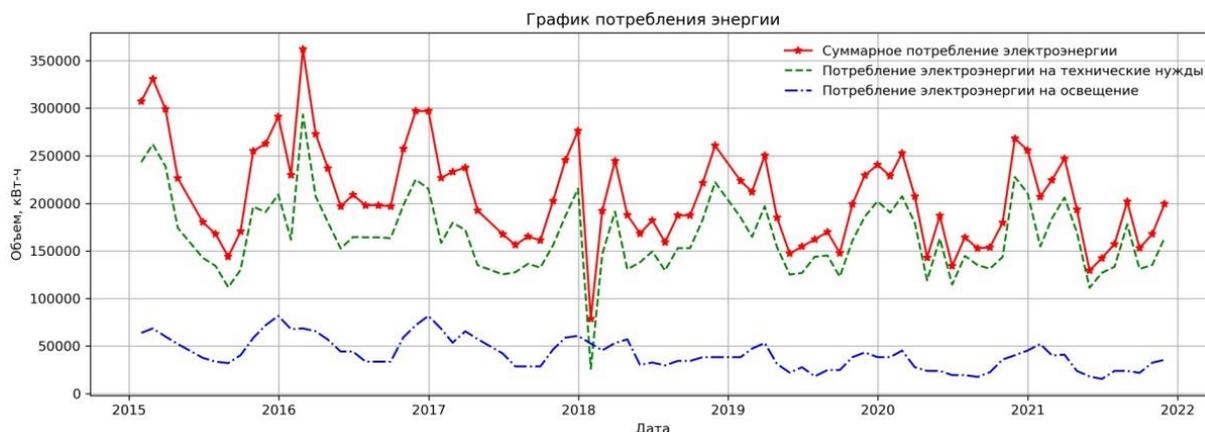


Рис. 1. График потребления электроэнергии предприятием за 2015–2021 гг.

Fig. 1. Schedule of electricity consumption by the enterprise for 2015–2021

Для более детального исследования характера как суммарного потребления электроэнергии, так и на технические нужды и освещение за рассматриваемый период, были построены графики, изображенные на

рис. 2–4, отражающие для большей наглядности помимо фактических значений потребления еще и кривые средних значений расхода электроэнергии за весь период.

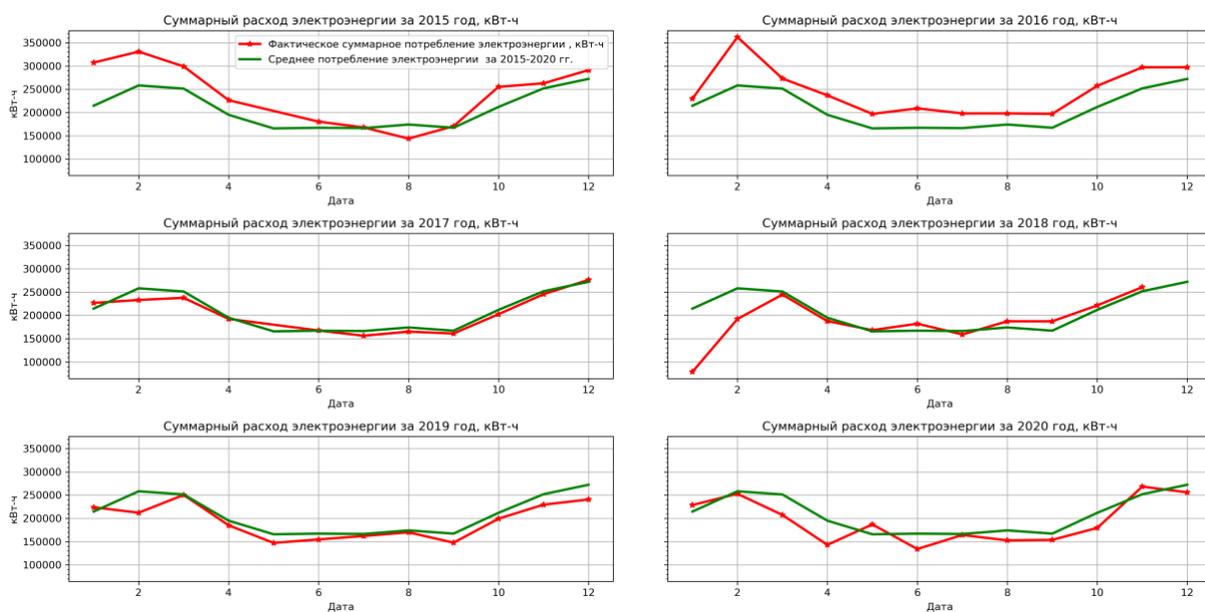


Рис. 2. Графики суммарного потребления электроэнергии по годам

Fig. 2. Schedules of total electricity consumption by years

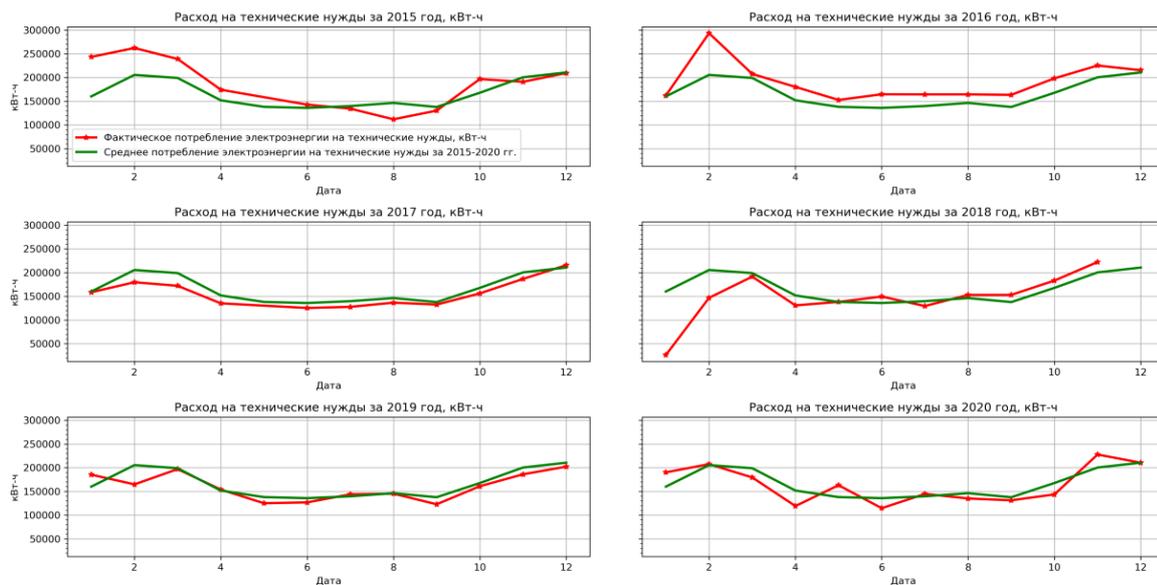


Рис. 3. Графики потребления электроэнергии на технические нужды по годам

Fig. 3. Schedules of electricity consumption for technical needs by years

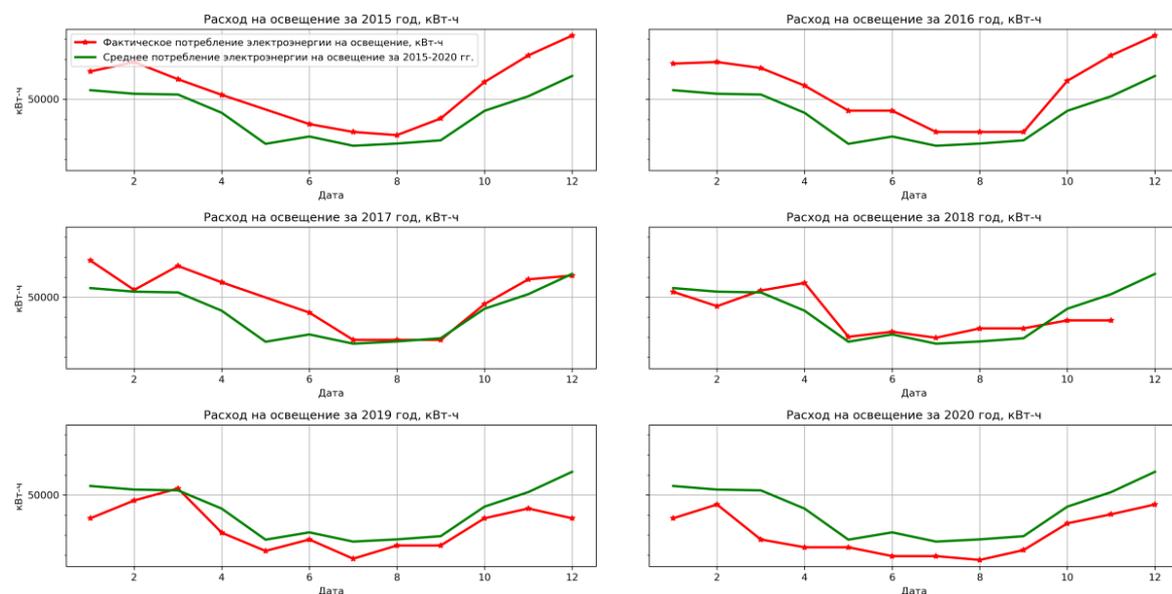


Рис. 4. Графики потребления электроэнергии на освещение по годам

Fig. 4. Schedules of electricity consumption for lighting by years

Следующим этапом стала предобработка данных, определение признаков и целевой переменной.

Временные данные были разбиты на такие признаки, как: месяц, год, количество дней в месяце, день недели. Так как прогнозирование проводилось по месяцам, для каждого месяца были добавлены признаки фактического расхода электроэнергии за последние четыре года, а также за предшествующие этому месяцу 4 месяца. Кроме того, дата-сет был дополнен погодными данными: температура окружающей среды, влажность, температура точки росы, скорость ветра. Для каждого структурного подразделения промышленного объекта был рассчитан фактор, характеризующий удельный вес потребления электроэнергии соответствующим объектом как отношение потребляемой им мощности к суммарному потреблению пред-

приятия за месяц. В табл. 1 приведены описания признаков и соответствующие им обозначения. Целевой переменной выбран показатель суммарного потребления электроэнергии. На рис. 5 представлены диаграммы, отражающие удельные веса потребления электроэнергии каждого подразделения. Как можно заметить по диаграммам, наибольший вклад в суммарное потребление и потребление электроэнергии на технические нужды вносит подразделение W_D_1, являющееся главным технологическим участком. Стоит отметить, что в диаграмме весов потребления на технические нужды нет участка W_D_12, но этот участок является главным потребителем электроэнергии на освещение. Это объяснимо тем, что данное подразделение представляет собой административный корпус.

Таблица 1. Описание признаков

Table 1. Features description

Название признака Feature name	Обозначение Designation
Целевая переменная (y)/Target variable (y)	SUM_consumption
Месяц/Month	month
Год/Year	year
День недели/Day of week	day-of-week
Количество дней в месяце Amount of days in a month	days_in_month
Фактическое потребление электроэнергии 1–4 года назад Real electricity consumption 1–4 years ago	1_year_ago 2_years_ago 3_years_ago 4_years_ago
Фактическое потребление электроэнергии 1–4 месяца назад Real electricity consumption 1–4 months ago	1_month_ago 2_months_ago 3_months_ago 4_months_ago
Удельный вес первого–четырнадцатого подразделения в суммарное потребление электроэнергии Specific weight of the first–fourteenth division in the total electricity consumption	W_D_1...W_D_14
Температура окружающей среды (среднее значение за месяц) Ambient temperature (monthly average)	T
Скорость ветра (среднее значение за месяц) Wind speed (monthly average)	Ff
Влажность (среднее значение за месяц) Humidity (monthly average)	U
Температура точки росы (среднее значение за месяц) Dew point temperature (monthly average)	Td

Для определения значимости признаков была построена тепловая карта – матрица корреляции, рассчитанная по (1), где x и y – попарно перебираемые признаки (рис. 6). В результате анализа матрицы корреляции было принято решение оставить все признаки в модели.

$$r_{xy} = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\sigma(x) \cdot \sigma(y)}, \quad (1)$$

Далее дата-сет был разбит на тренировочную и тестовую выборки в отношении 80:20. Для построения моделей были использованы алгоритмы машинного обучения, представленные в табл. 2. Это модели линейной регрессии (LinearRegression, Lasso, Ridge), k -ближайших соседей (KNeighborsRegressor), дерева решений (DecisionTreeRegressor), случайного леса (RandomForestRegressor), линейной регрессии опорных векторов (LinearSVR), многослойного перцептрона (MLPRegressor), экстремального градиентного бустинга (XGBoost) и градиентного бустинга, основанная на деревьях решений, (CatBoost). Подбор параметров моделей происходил с помощью инструмента перекрестной проверки GridSearchCV. Метриками качества были выбраны средняя абсолютная ошибка прогноза в процентах (mean absolute percentage error – MAPE), рассчитываемая по (2) и показывающая в процентном соотношении уровень ошибок, допускаемых алгоритмом, и коэффициент детерминации (R^2 score), вычисляемый по (3) и характеризующий точность алгоритма регрессии.

$$MAPE(y, \hat{y}) = \frac{1}{n_{samples}} \sum_{i=0}^{n_{samples}-1} \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

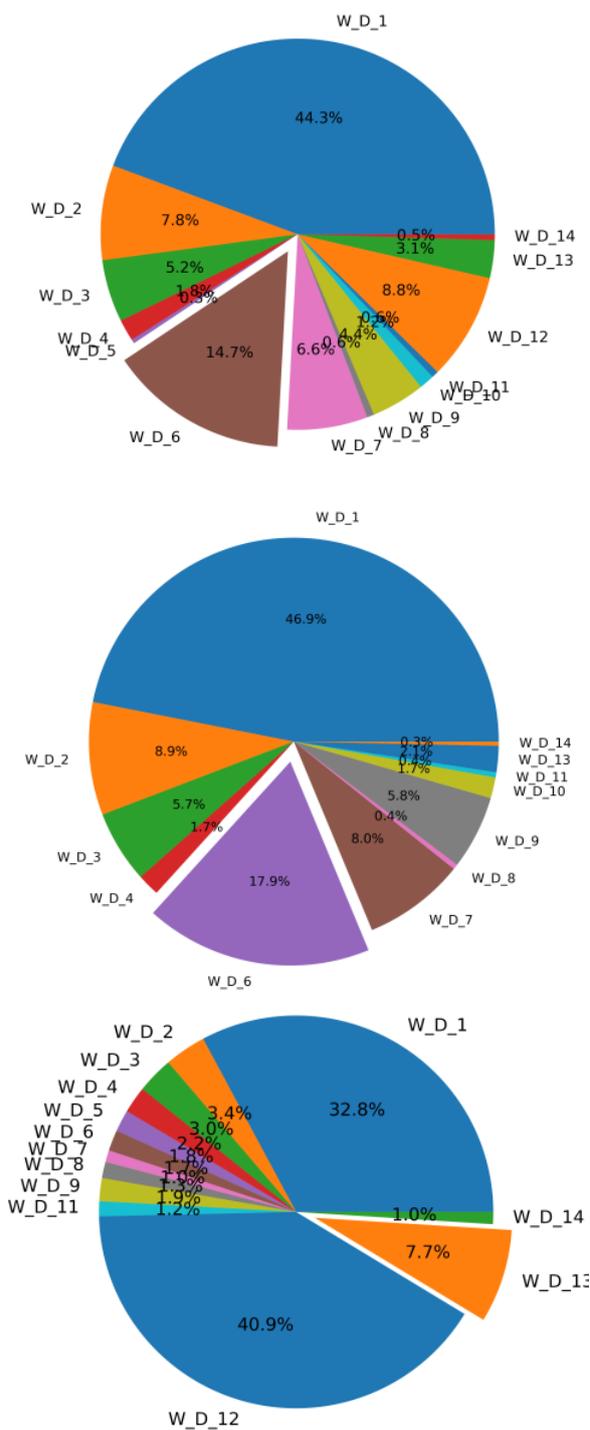


Рис. 5. Диаграммы удельных весов подразделений для суммарного потребления электроэнергии, на технические нужды и освещение

Fig. 5. Diagrams of unit specific weights for total electricity consumption, for technical needs and lighting

$$R^2(y, \hat{y}) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}. \quad (3)$$

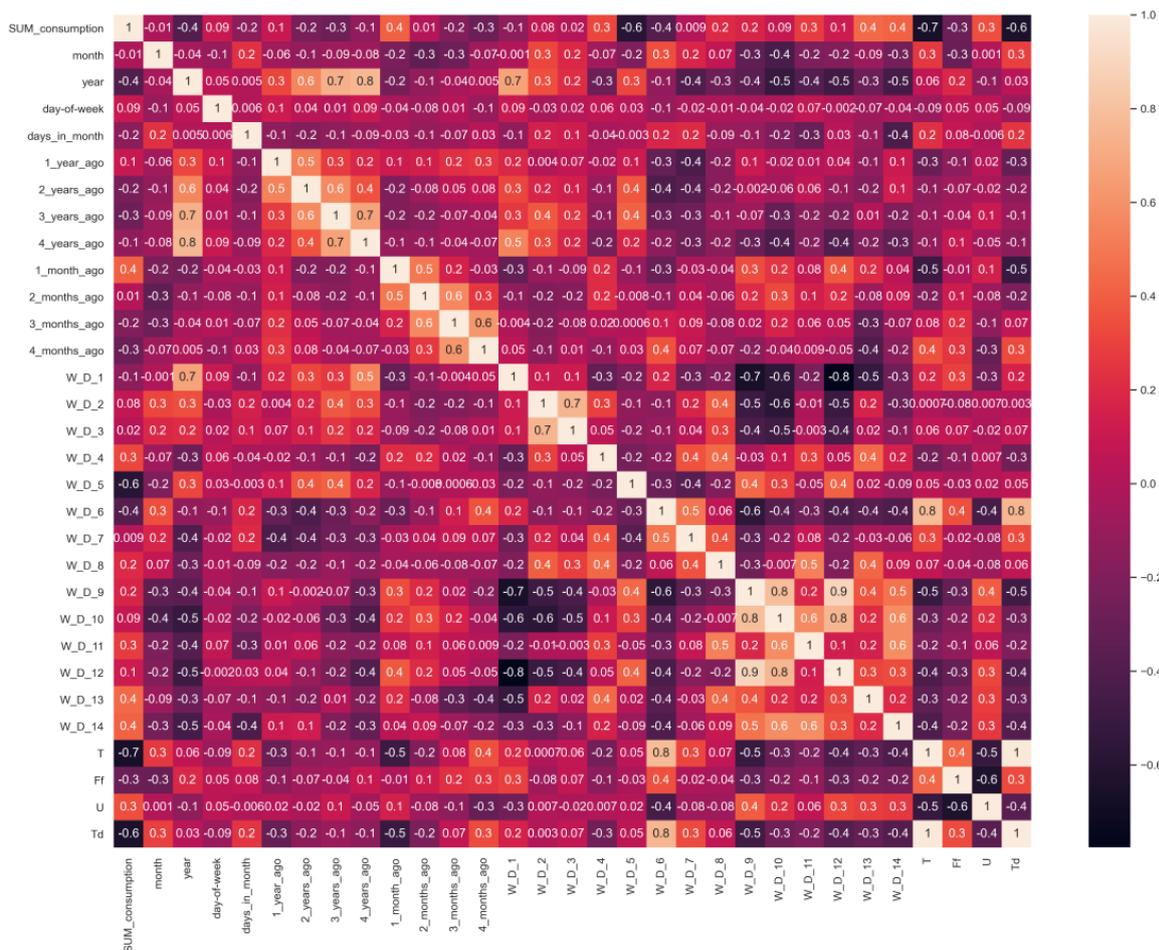


Рис. 6. Матрица корреляции признаков и целевой переменной
 Fig. 6. Correlation matrix of features and target variable

Таблица 2. Результаты метрик качества моделей
 Table 2. Results of model quality metrics

Модель Model	Метрики качества прогноза/Forecast quality metrics					
	Прогнозирование по суммарным нагрузкам Forecasting by total loads		Прогнозирование по потреблению на технические нужды Forecasting of consumption for technical needs		Прогнозирование по потреблению на освещение Forecasting of lighting consumption	
	MAPE	R ² score	MAPE	R ² score	MAPE	R ² score
Линейная регрессия Linear Regression	16,09	0,3	89,98	-2,48	20,35	0,19
Лассо регрессия Lasso Regression	16,55	0,23	90,94	-2,55	20,27	0,19
Ридж регрессия Ridge Regression	12,23	0,39	67,47	-0,81	19,95	0,33
К-ближайших соседей KNeighborsRegressor	11,85	0,39	45,33	0,11	13,9	0,73
Дерево решений DecisionTreeRegressor	9,89	0,69	38,53	0,38	9,25	0,56
Случайный лес Random Forest Regressor	13,11	0,46	46,86	0,11	8,22	0,83
Линейная регрессия опорных векторов LinearSVR	18,51	-0,36	65,33	-0,73	39,19	-0,45
Многослойный перцептрон MLPRegressor	12,71	0,37	100	-10,79	27,1	-0,58
Экстремальный градиентный бустинг XGBRegressor	9,97	0,68	34,98	0,43	7,82	0,75
Градиентный бустинг CatBoostRegressor	7,95	0,77	39,86	0,33	6,98	0,94

Было проведено прогнозирование по нескольким сценариям: отдельно по фактическому потреблению на технические нужды, отдельно по фактическому потреблению на освещение и прогнозирование по суммарным данным потребления электроэнергии. Как следует из табл. 2, в случае прогнозирования по данным электропотребления на технические нужды наилучший результат показала модель, основанная на алгоритме регрессии экстремального градиентного бустинга XGBoost, ошибка прогноза составила 34,98 %. При прогнозировании расхода электроэнергии на освещение наиболее точный прогноз дала модель, базирующаяся на алгоритме градиентного бустинга CatBoost, ошибка прогноза которой составила 6,98 % при доле объясненной дисперсии 0,94, что является очень точным результатом прогноза. Стоит отметить, что моделирование по данным потребления электроэнергии на освещение является более точным, чем по данным потребления электроэнергии на технические нужды, что объясняется меньшим разбросом исходных данных относительно среднего значения.

В случае же прогнозирования по суммарным данным наилучший результат показала модель, основанная на алгоритме градиентного бустинга CatBoost

[20]. Ошибка прогноза данной модели составила 7,95 %, что на 1,94 меньше по сравнению с моделью дерева решений Decision Tree Regressor и на 2,02 меньше, чем ошибка прогноза модели экстремального градиентного бустинга XGBoost. Таким образом, модель, основанная на алгоритме CatBoost, дает прогноз с достоверностью 92,05 % при доле объяснения признаками целевого результата в 0,77, что позволяет классифицировать построенную в результате исследования модель машинного обучения как довольно точную. Графики спрогнозированных моделью CatBoost значений и фактических данных приведены на рис. 7. CatBoost является библиотекой с открытым исходным кодом, использующей «небрежные» деревья для построения сбалансированного дерева решений, что способствует более эффективному обучению. Особенностью данного алгоритма является простота при работе с категориальными переменными. Разработчик данной библиотеки – компания Яндекс. Стоит отметить, что в классе алгоритмов градиентного бустинга библиотека CatBoost с момента появления заняла лидирующие позиции и является достойным конкурентом библиотеки экстремального градиентного бустинга XGBoost, что и подтверждает наше исследование.

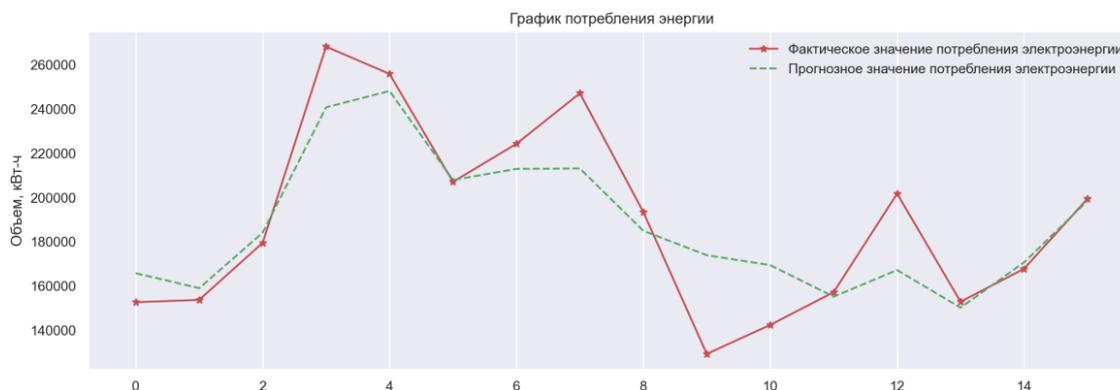


Рис. 7. График фактических и прогнозных значений целевой переменной

Fig. 7. Schedule of real and forecast values of the target variable

Кроме того, был проведен эксперимент сравнения результатов прогноза по данным суммарного потребления электроэнергии и суммы результатов прогнозов по частям (технические нужды и освещение). Однако сумма результатов прогнозов по частям значительно отличалась от проверочного набора данных, что подтверждает необходимость проведения прогноза по данным суммарного потребления электроэнергии.

Заключение

В результате проведенного исследования была получена модель машинного обучения, основанная на алгоритме градиентного бустинга библиотеки CatBoost. Точность прогноза потребления электрической энергии по данной модели составила более 92 %, что позволило классифицировать прогнозные значения как достоверные и считать полученную модель адекватной экспериментальным данным. Кроме того, были сделаны следующие выводы.

Во-первых, задача является актуальной как для научного сообщества с точки зрения исследования применяемых методов прогнозирования, так и для предприятий с точки зрения экономических выгод от внедрения энергосберегающих систем.

Во-вторых, несмотря на то, что электроэнергия является одним из ключевых ресурсов для производства и в сфере услуг, прогнозирование потребности для каждой из областей использования электроэнергии довольно специфично, требует учета множества факторов и их интеллектуального анализа.

В-третьих, для точного прогнозирования необходимы данные о технологическом оборудовании, его мощности, также необходим учет более детальных данных о всех потребителях электроэнергии рассматриваемого объекта, объемах выпускаемой продукции и других данных, влияющих на потребление электроэнергии.

В-четвертых, интеллектуальная обработка данных полностью не заменяет работу экспертов в оценке прогнозирования электропотребления, что связано с учетом экспертами дополнительных факторов, в том числе случайных, и сложностью интерпретации результатов, полученных с помощью моделей машин-

ного обучения. Поэтому необходим комплексный подход к процессу расчета потребления электрической энергии и проведение новых исследований с целью поиска наиболее точных результатов прогнозирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Статистический анализ повреждений в карьерной сети горно-металлургического комбината / Р.В. Клюев, И.И. Босиков, О.А. Гаврина, К.С. Крысанов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2021. – № 1. – С. 168–178.
2. Луковенко А.С. Повышение надежности и качества электроснабжения потребителей тяговых подстанций переменного тока: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Красноярск, 2016. – 21 с.
3. Прогнозирование удельного потребления электроэнергии обогатительной фабрики / Р.В. Клюев, О.А. Гаврина, В.Н. Хетагуров, С.Г. Зассеев, Б.З. Умиров // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 11-1. – С. 135–145.
4. Анализ потерь электроэнергии в системе электроснабжения обогатительной фабрики / Р.В. Клюев, В.И. Голик, И.И. Босиков, О.А. Гаврина // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 10. – С. 7–16.
5. Energy saving in metro ventilation system based on multi-factor analysis and air characteristics of piston vent / Deqiang He, Xiaoliang Teng, Yanjun Chen, Bin Liu, Heliang Wang, Xianwang Li, Rui Ma // Applied Energy. – 2022. – V. 307. – 118295.
6. Комплексный анализ применения эффективных технологий для повышения устойчивого развития природно-технической системы / Р.В. Клюев, И.И. Босиков, А.В. Майер, О.А. Гаврина // Устойчивое развитие горных территорий. – 2020. – № 2. – С. 283–290.
7. Da-sheng Lee, Yan-Tang Chen, Shih-Lung Chao Universal workflow of artificial intelligence for energy saving // Energy Reports. – 2022. – V. 8. – P. 1602–1633.
8. Energy-saving potential prediction models for large-scale building: a state-of-the-art review / Xiu'e Yang, Shuli Liu, Yuliang Zou, Wenjie Ji, Qunli Zhang, Abdullahi Ahmed, Xiaojing Han, Yongliang Shen, Shaoliang Zhang // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2022. – V. 156. – 111992.
9. Energy saving technologies and mass-thermal network optimization for decarbonized iron and steel industry: A review / R.Q. Wang, L. Jiang, Y.D. Wang, A.P. Roskilly // Journal of Cleaner Production. – 2020. – V. 274. – 122997.
10. Tiancheng Shang, Peihong Liu, Junxiang Guo How to allocate energy-saving benefit for guaranteed savings EPC projects? A case of China // Energy. – 2020. – V. 191. – 116499.
11. Energy-saving effect of integrated cooling unit with rotary booster and compressor for data center / Yu Liu, Guoyuan Ma, Lianzheng Xue, Feng Zhou, Lei Wang // International Journal of Refrigeration. – 2020. – V. 119. – P. 366–375.
12. Multi-dimensional analysis of air-conditioning energy use for energy-saving management in university teaching buildings / Xinyue Li, Shuqin Chen, Hongliang Li, Yunxiao Lou, Jiahe Li // Building and Environment. – 2020. – V. 185. – 107246.
13. Estimation of energy consumption in machine learning / E. Garcia-Martin, C. Faviola Rodrigues, G. Riley, H. Grahn // Journal of Parallel and Distributed Computing. – 2019. – V. 134. – P. 75–88.
14. Ghoddsi H., Creamer G.G., Rafizadeh N. Machine learning in energy economics and finance: a review // Energy Economics. – 2019. – V. 81. – P. 709–727.
15. Shintaro Ikeda, Tatsuo Nagai. A novel optimization method combining metaheuristics and machine learning for daily optimal operations in building energy and storage systems // Applied Energy. – 2021. – V. 289. – 116716.
16. Прогнозирование и планирование потребления электроэнергии с помощью machine learning (эксперимент). URL: <https://habr.com/ru/post/577732/> (дата обращения 10.01.2022).
17. Amasyalia K., El-Gohary N. Machine learning for occupant-behavior-sensitive cooling energy consumption prediction in office buildings // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2021. – V. 142. – 110714.
18. Prediction of energy consumption and evaluation of affecting factors in a full-scale WWTP using a machine learning approach / Faramarz Bagherzadeh, Amirreza Shojaei Nouri, Mohamad-Javad Mehrani, Suresh Thennadil // Process Safety and Environmental Protection. – 2021. – V. 154. – P. 458–466.
19. Machine learning based analysis of factory energy load curves with focus on transition times for anomaly detection / D. Flick, C. Keck, Ch. Herrmann, S. Thiede // Procedia CIRP. – 2020. – V. 93. – P. 461–466.
20. CatBoost Regressor. URL: https://catboost.ai/en/docs/concepts/python-reference_catboostregressor (дата обращения 11.01.2022).

Поступила 17.06.2022 г.

Информация об авторах

Моргоева А.Д., аспирант Северо-Кавказского горно-металлургического института (Государственного технологического университета).

Моргоев И.Д., аспирант Северо-Кавказского горно-металлургического института (Государственного технологического университета).

Клюев Р.В., доктор технических наук, профессор кафедры техники низких температур им. П.Л. Капицы Московского политехнического университета.

Гаврина О.А., кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий Северо-Кавказского горно-металлургического института (государственного технологического университета).

UDC 004.852, 004.67

FORECASTING OF ELECTRIC ENERGY CONSUMPTION BY AN INDUSTRIAL ENTERPRISE USING MACHINE LEARNING METHODS

Anzhelika D. Morgoeva¹,
m.angelika-m@yandex.ru

Irbek D. Morgoev¹,
m.irbek@yandex.ru

Roman V. Klyuev²,
kluev-roman@rambler.ru

Oksana A. Gavrina¹,
Gavrina-Oksana@yandex.ru

¹ North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University),
44, Nikolaev street, Vladikavkaz, 362011, Russia.

² Moscow Polytechnic University,
38, B. Semenovskaya street, Moscow, 107023, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to develop energy-saving approaches through the use of data mining tools to improve the efficiency of the management decision-making process and, as a result, more optimal use of energy resources. In particular, forecasting the consumption of electric energy of an industrial facility will simplify the process of making managerial decisions and will help minimize the cost of electricity for the production of a unit of production. The availability of an accurate forecast will enable the use of reserve capacities during peak load hours for the electric power complex. In practice, the existing methods of calculating the load on the power grid are not always suitable for forecasting, so the study is interdisciplinary in nature, combining important practical significance and the development of new recommendations regarding the use of machine learning algorithms.

The main aim of the research is to analyze scientific papers containing proposals to improve the accuracy of determining energy loads using data mining, as well as to develop a machine learning model that allows you to create a reliable forecast of electricity consumption for an industrial enterprise.

Objects of the research is an industrial enterprise that is characterized by the complexity of determining the energy characteristics of technological equipment.

Methods: analytical method, methods of mathematical statistics, methods of machine learning, complex generalization of scientific achievements and practical experience in the use of data processing tools in the tasks of predicting the load on the power grid.

Results. A review of literature sources covering the application of data mining in energy consumption management is carried out, and the main results of forecasting total electricity consumption according to industrial facility data are presented. The methods of data mining used to solve energy saving problems for various objects are considered. A machine learning model is built based on the gradient boosting algorithm of the CatBoost library, which allows obtaining a forecast of electricity consumption by months with a reliability level of 92 %. The results of the study are relevant for decision-making at the tactical and strategic levels of enterprise management for medium-term (monthly) and long-term (from a year to several years) forecasting of electrical loads, respectively.

Key words:

Resource-saving technologies, energy saving, forecasting, data mining, machine learning, gradient boosting.

REFERENCES

- Klyuev R.V., Bosikov I.I., Gavrina O.A., Krysanov K.S. Statistical analysis of damages in the opening network of the mining and metallurgical combine. *Bulletin of the Tula State University. Earthsciences*, 2021, vol. 1, pp. 168–178. In Rus.
- Lykovenko A.S. *Povyshenie nadezhnosti i kachestva elektrosnabzheniya potrebiteley tyagovykh podstantsiy peremennogo toka*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Improving the reliability and quality of power supply to consumers of traction substations of alternating current. Cand. Diss. Abstract]. Krasnoyarsk, 2016. 21 p.
- Klyuev R.V., Gavrina O.A., Khetagurov V.N., Zaseev S.G., Umirov B.Z. Prediction of specific electric energy consumption at processing plant. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2020, vol. 11, no. 1, pp. 135–145. In Rus.
- Klyuev R.V., Golik V.I., Bosikov I.I., Gavrina O.A. Analysis of electric power loss in the power supply system of the concentrating factory. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 10, pp. 7–16. In Rus.
- Deqiang He, Xiaoliang Teng, Yanjun Chen, Bin Liu, Heliang Wang, Xianwang Li, Rui Ma. Energy saving in metro ventilation system based on multi-factor analysis and air characteristics of piston vent. *Applied Energy*, 2022, vol. 307, pp. 118295.
- Klyuev R.V., Bosikov I.I., Mayer A.V., Gavrina O.A. Comprehensive analysis of the effective technologies application to increase sustainable development of the natural-technical system. *Sustainable Development of Mountain Territories*, 2020, no. 2, pp. 283–290. In Rus.
- Da-sheng Lee, Yan-Tang Chen, Shih-Lung Chao. Universal workflow of artificial intelligence for energy saving. *Energy Reports*, 2022, vol. 8, pp. 1602–1633.
- Xiu'e Yang, Shuli Liu, Yuliang Zou, Wenjie Ji, Qunli Zhang, Abdullahi Ahmed, Xiaojing Han, Yongliang Shen, Shaoliang Zhang. Energy-saving potential prediction models for large-scale building: A state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, vol. 156, pp. 111992.
- Wang R.Q., Jiang L., Wang Y.D., Roskilly A.P. Energy saving technologies and mass-thermal network optimization for decarbonized iron and steel industry: a review. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 274, pp. 122997.
- Tiancheng Shang, Peihong Liu, Junxiong Guo. How to allocate energy-saving benefit for guaranteed savings EPC projects? A case of China. *Energy*, 2020, vol. 191, pp. 116499.

11. Yu Liu, Guoyuan Ma, Lianzheng Xue, Feng Zhou, Lei Wang. Energy-saving effect of integrated cooling unit with rotary booster and compressor for data center. *International Journal of Refrigeration*, 2020, vol. 119, pp. 366–375.
12. Xinyue Li, Shuqin Chen, Hongliang Li, Yunxiao Lou, Jiahe Li. Multi-dimensional analysis of air-conditioning energy use for energy-saving management in university teaching buildings. *Building and Environment*, 2020, vol. 185, pp. 107246.
13. Garcia-Martín E., Faviola Rodrigues C., Riley G., Grahn H. Estimation of energy consumption in machine learning. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2019, vol. 134, pp. 75–88.
14. Ghodduzi H., Creamer G.G., Rafizadeh N. Machine learning in energy economics and finance: a review. *Energy Economics*, 2019, vol. 81, pp. 709–727.
15. Shintaro Ikeda, Tatsuo Nagai. A novel optimization method combining metaheuristics and machine learning for daily optimal operations in building energy and storage systems. *Applied Energy*, 2021, vol. 289, pp. 116716.
16. *Prognozirovanie i planirovanie potrebleniya elektricheskoy energii s pomoshchyu machine learning (experiment)* [Forecasting and planning of electricity consumption using machine learning (experiment)]. Available at: <https://habr.com/ru/post/577732/> (accessed 9 January 2022).
17. Amasyalia K., El-Gohary N. Machine learning for occupant-behavior-sensitive cooling energy consumption prediction in office buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, vol. 142, pp. 110714.
18. Faramarz Bagherzadeh, Amirreza Shojaei Nouri, Mohamad-Javad Mehrani, Suresh Thennadil. Prediction of energy consumption and evaluation of affecting factors in a full-scale WWTP using a machine learning approach. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, vol. 154, pp. 458–466.
19. Flick D., Keck C., Herrmann Ch., Thiede S. Machine learning based analysis of factory energy load curves with focus on transition times for anomaly detection. *Procedia CIRP*, 2020, vol. 93, pp. 461–466.
20. *CatBoost Regressor*. Available at: https://catboost.ai/en/docs/concepts/python-reference_catboostregressor (accessed 11 January 2022).

Received: 17 June 2022.

Information about the authors

Anzhelika D. Morgoeva, postgraduate student, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University).

Irbek D. Morgoev, postgraduate student, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University).

Roman V. Klyuev, Dr. Sc., professor, Moscow Polytechnic University.

Oksana A. Gavrina, Cand. Sc., assistant professor, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University).

УДК 614.77:631.416.8:632.122.1

ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ И МЫШЬЯК В ПОЧВАХ РАЙОНА РАЗМЕЩЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ И АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ (НА ПРИМЕРЕ БЕЛОЯРСКОЙ АЭС)

Панов Алексей Валерьевич¹,
riar@mail.ru

Сидорова Елена Валентиновна¹,
sidelena@yandex.ru

Трапезников Александр Викторович²,
vera_zar@mail.ru

Корнеев Юрий Николаевич¹,
riar@mail.ru

Коржавин Александр Васильевич²,
BFS_zar@mail.ru

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии,
Россия, 249032, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км.

² Институт экологии растений и животных Уральского отделения РАН,
Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202.

Актуальность. Загрязнение экосистем тяжелыми металлами и мышьяком является значимым антропогенным фактором, негативно влияющим на человека и биоту. В Свердловской области, где ведется добыча и переработка минерального сырья, отмечены высокие уровни выбросов в атмосферу поллютантов от стационарных источников, включая тяжелые металлы. Регион также характеризуется многокомпонентным загрязнением территорий техногенными радионуклидами. С 1964 г. в Свердловской области эксплуатируется Белоярская АЭС. Длительная работа промышленных предприятий и радиационно-опасных объектов увеличивает техногенную нагрузку на экосистемы Урала.

Цель: оценка содержания тяжелых металлов и мышьяка в почвах наземных экосистем района размещения промышленных предприятий и Белоярской АЭС на основе экологического мониторинга.

Объекты. В 2013 и 2019 гг. исследованы почвы природных (луговых) и аграрных (пашня, лугопастбищные угодья) экосистем 30-км зоны влияния Белоярской АЭС. В почвенном покрове изучено содержание 17 элементов, относящихся к I (Pb, Zn, Cd, As, Hg), II (Mo, Cu, Ni, Co, Cr, Sb), III (Sr, Mn, V, W, Ba) классам опасности, а также железо.

Методы. Оценку валового содержания тяжелых металлов и мышьяка в почве проводили в испытательной лаборатории агроэкологии ФГБНУ ВНИИРАЭ (аттестат аккредитации RA.RU.513078). Для подготовки почвенных проб к измерениям использовали методы «холодного пара» и «мокрого» озоления с помощью микроволновой системы MARS-5 (CEM, США). Элементы в образцах определяли атомно-абсорбционным и плазменно-эмиссионным методами анализа. Для измерений использовали аксиальный атомно-эмиссионный (оптический) спектрометр с атомизацией проб в индуктивно-связанной плазме (ИСП-ОЭС) Liberty II (Varian, Австралия-США) и спектрометр КВАНТ. Зета-1 с приставкой ГРГ-3.

Результаты. Показано, что за 2013–2019 гг. соотношение элементов в почвенном покрове наземных экосистем района расположения Белоярской АЭС было достаточно стабильным. По снижению валового содержания в почве тяжелые металлы и мышьяк в 2019 г. располагались в ряд: Fe (среднее – 16700 мг/кг) > Mn (879) > Ba (134) > Zn (51) > Ni (35) > Cr (32) > V (30) > Sr (28) > Cu (21) > Pb (12,4) > Co (11,9) > W (6,7) > Sb (2,4) > As (1,7) > Mo (1,5) > Cd (0,2) > Hg (0,01 мг/кг). По общему накоплению элементов в почве наземные экосистемы находятся в соотношении: пашня (18,7 г/кг почвы) > луга (14,9 г/кг) > целина (12,6 г/кг). В основном такая разница обусловлена отличиями по содержанию в почве железа, вклад которого в региональный фон составляет 90...95 %. Слабая корреляция между содержанием в почве элементов и расстоянием от Белоярской АЭС (–0,44...0,29 в 2013 г. и –0,29...0,38 в 2019 г.) показала отсутствие значимых выбросов токсикантов в окружающую среду от атомной станции как вследствие ее многолетней работы, так и после начала эксплуатации реактора БН-800. Среди поллютантов I класса опасности, накопленных в почве, доминирует цинк (вклад 76...78 %), на втором месте идет свинец (18...21 %). Во II классе опасности основными почвенными загрязнителями являются никель (45...34 %) и хром (28...30 %). В III классе опасности преобладают марганец (68...81 %) и барий (14...27 %). Показано, что в 25...63 % почвенных проб в районе Белоярской АЭС валовое содержание никеля не отвечает ориентировочно допустимым концентрациям, установленным в СанПиН 1.2.3685–21. Также на всех контрольных участках луговых экосистем превышена предельно-допустимая концентрация по содержанию сурьмы. В 2019 г. в 4...25 % проб почв пашни и лугов отмечено несоответствие предельно-допустимой концентрации по марганцу и в 4...11 % проб почв пашни превышены ориентировочно допустимые концентрации по мышьяку. Уровни накопления в почве ряда тяжелых металлов превышают также региональный фон Свердловской области: по никелю в 25...63 % почвенных образцов природных и аграрных экосистем, по марганцу в 10...50 % проб почв пашни и лугов. Наибольшее количество элементов (в среднем 42 %) аккумуляровано в 0–5 см слое почвы. Максимальное накопление в верхнем почвенном горизонте отмечено у кадмия (62 %), мышьяка (49 %) и свинца (48 %), а минимальное у сурьмы (29 %) и марганца (28 %). По общему запасу токсикантов в 0–5 см слое почвы они располагаются в ряд: Cd > As > Pb > Zn > Cu > Mo > Hg > Sr > Ni > Cr > V > W > Co > Ba > Sb > Mn. В более глубоких горизонтах (5–10, 10–15 и 15–20 см) элементы распределены достаточно равномерно. По сравнению с другими техногенно загрязненными регионами России, результаты мониторинга содержания тяжелых металлов и мышьяка в почве района Белоярской АЭС показывают стабильную экологическую обстановку. При планировании дальнейших мониторинговых исследований необходимо обратить внимание на поведение в почве мышьяка, никеля, сурьмы, марганца, кадмия и свинца. Повышенное содержание данных токсикантов в почве может привести к их накоплению в сельскохозяйственной и природной пищевой продукции.

Ключевые слова:

Наземные экосистемы, почвенный покров, антропогенное воздействие, поллютанты, техногенное загрязнение, мониторинг, гигиеническая оценка, экологическая безопасность.

Введение

Загрязнение тяжелыми металлами и мышьяком экосистем является значимым антропогенным фактором, негативно влияющим на человека и биоту [1–3]. Особенно велик вклад поллютантов в осложнение экологической обстановки на урбанизированных и промышленно развитых территориях, где ведется добыча руд [4–8]. В России большое количество месторождений железа, меди, никеля и других металлов находится в Уральском федеральном округе. Урал с его мощным горно-металлургическим комплексом является крупнейшим в стране регионом по переработке минерального сырья. Здесь добывают колчеданные руды, содержащие до 30 элементов, включая тяжелые металлы, отнесенные к I, II и III классам опасности. При этом ряд наиболее токсичных поллютантов (ртуть, цинк, мышьяк и др.) обладают высокой летучестью, легко распространяясь с пылью в приземной атмосфере [9]. Поэтому промышленная разработка рудных месторождений приводит к рассеиванию и миграции тяжелых металлов и мышьяка в природных и аграрных экосистемах, накоплению их в живых организмах и пищевой продукции, вызывая в высоких концентрациях токсические эффекты у растений, животных и человека [10–12].

Свердловская область Уральского федерального округа входит в пять наиболее неблагоприятных по экологической ситуации регионов России. Так, в 2020 г. максимальные выбросы в атмосферу загрязняющих веществ от стационарных источников зафиксированы в населенных пунктах: Рефтинский (229,7 тыс. т), Нижний Тагил (122,0 тыс. т), Качканарский (82,3 тыс. т), Серовский (39,1 тыс. т), Пелым (29,3 тыс. т), Екатеринбург (22,1 тыс. т). Сложная экологическая обстановка отмечена и в расположенной рядом Челябинской области, в городах Магнитогорск (годовой выброс 185,6 тыс. т) и Челябинск (121,4 тыс. т). За последние десять лет в выделенных областях зафиксировано увеличение поступления в окружающую среду, в составе выбросов, марганца, кадмия и свинца [13].

На экологию Уральского региона оказывает определенное влияние и радиационный фактор. Он включает в себя многокомпонентное загрязнение территорий техногенными радионуклидами вследствие испытаний ядерного оружия на полигоне «Новая земля»; многолетних сбросов и выбросов, а также ряда аварий на ПО «Маяк» при производстве и переработке ядерных материалов; проведения ядерных взрывов в мирных целях; добычи урановой руды; работы Белоярской АЭС [9].

Белоярская атомная станция расположена в 42 км от г. Екатеринбург и является старейшей АЭС с разными типами энергоблоков. Первые два реактора на тепловых нейтронах (АМБ-100 и АМБ-200) остановлены более 30 лет назад и сейчас находятся на стадии вывода из эксплуатации. Реакторы на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем БН-600 и БН-800 эксплуатируются в настоящее время [9, 14, 15]. Кроме Екатеринбурга, ближайшими круп-

ными источниками загрязнения окружающей среды в районе размещения Белоярской АЭС являются промышленные предприятия поселка Рефтинский, который расположен в северо-восточном направлении от атомной станции на расстоянии 35 км. Остальные критичные по объемам выбросов населенные пункты удалены от АЭС более чем на 100 км. Учитывая, что в Рефтинском фиксируются максимальные уровни выбросов, предприятия данного населенного пункта можно рассматривать как приоритетный источник загрязнения тяжелыми металлами и мышьяком района атомной станции. Выбросы промышленных предприятий Уральского региона и Белоярской АЭС через воздушный бассейн поступают на почвенный покров наземных экосистем. Таким образом, природные экосистемы и агроценозы, с их большой открытой площадью, являются естественными планшетами, аккумулирующими в почве поллютанты выбросов.

Для оценки экологической обстановки в зоне влияния Белоярской АЭС, как наиболее крупного радиационно-опасного и значимого промышленного объекта в Свердловской области, в 2013 г. была создана сеть экологического мониторинга природных наземных [14] и аграрных [15] экосистем. Проанализировано многолетнее влияние атомной станции на радиационную обстановку в 30-км зоне вокруг нее. Однако, учитывая важность поступления в организм человека с местными сельскохозяйственными и природными пищевыми продуктами не только радионуклидов, но и других токсикантов, целью данной работы являлась оценка содержания тяжелых металлов и мышьяка в почве наземных экосистем района размещения Белоярской АЭС, а также анализ влияния радиационно-опасного объекта на экологическую обстановку региона. В число основных задач исследования входило:

- определение уровней загрязнения тяжелыми металлами и мышьяком почвенного покрова природных (луговых) и аграрных (пашня, целина) экосистем в 30-км зоне вокруг Белоярской АЭС;
- выявление закономерностей накопления поллютантов в почвах наземных экосистем района размещения Белоярской атомной станции;
- установление приоритетных загрязнителей, а также риска (вероятности) превышения содержания тяжелых металлов и мышьяка в почве района Белоярской АЭС по отношению к требованиям санитарно-гигиенических нормативов (СанПиН 1.2.3685–21) и региональному техногенному фону Свердловской области;
- анализ влияния выбросов Белоярской АЭС на поступление токсикантов в почву наземных экосистем в районе размещения радиационно-опасного объекта.

Материалы и методика исследования

Вся территория 30-км зоны влияния Белоярской АЭС (исключая водоем-охладитель) представляет собой слабохолмистую равнину и характеризуется разнообразием наземных экосистем. Природные экосистемы расположены в большей степени в западном,

северном и восточном направлениях от атомной станции. Они представлены преимущественно смешанными березово-сосновыми лесами, занимающими около 85 % территории, а также злаково-разнотравными лугами [14]. Площадь агроэкосистем в 13-км зоне наблюдения Белоярской АЭС составляет лишь 5,3 %. В 15–30-км зоне влияния атомной станции площадь агроценозов существенно увеличивается. В структуре сельскохозяйственных угодий пашня занимает 88 % от общей площади, целинные участки (сенокосы и пастбища) составляют 12 %. Пашня расположена преимущественно в южном и юго-восточном направлениях от АЭС. Целинные участки распределены равномерно по всем направлениям, кроме северного, на расстоянии 10–30 км от атомной станции [15].

На основе созданной сети экологического мониторинга наземных экосистем в районе расположения Белоярской АЭС в почвенном покрове изучали содержание 17 элементов, относящихся к I (Pb, Zn, Cd, As, Hg), II (Mo, Cu, Ni, Co, Cr, Sb), III (Sr, Mn, V, W, Ba) классам опасности и железо. На различном расстоянии и направлениях от атомной станции исследованы 4 контрольных участка природных (луговых) и 31 участок аграрных (пашня, целина) экосистем. При мониторинге особое внимание уделялось агроценозам как наиболее критичному пути поступления поллютантов в организм человека по пищевым цепям. Подробная карта-схема точек пробоотбора представлена в [15]. Образцы почвы отбирали в 2013 г. на этапе завершения строительства реактора БН-800 и в 2019 г. через три года после начала промышленной эксплуатации нового энергоблока. Это дало возможность оценить сформировавшийся техногенный фон в районе Белоярской АЭС за период ее многолетней работы (эксплуатация реакторов АМБ-100, АМБ-200 и БН-600), а также изменение экологической ситуации в регионе атомной станции после запуска БН-800.

Отбор почвенных проб, их подготовку к анализу на содержание тяжелых металлов и мышьяка и измерения проводили в испытательной лаборатории агроэкологии ФГБНУ ВНИИРАЭ (аттестат аккредитации RA.RU.513078) по аттестованным методикам в соответствии с [16–19]. В природных экосистемах и на целинных участках агроэкосистем отбирали верхний слой почвы глубиной 0–5 см, на пашне – пахотный горизонт глубиной 0–20 см. На двух целинных участках пробы почвы дополнительно отбирали послойно (на глубину 0–2, 2–5, 5–10, 10–15 и 15–20 см) для оценки вертикального распределения элементов в почвенном профиле. На каждом контрольном участке брали смешанную пробу почвы массой не менее 1,0 кг, состоящую из 10–15 индивидуальных почвенных образцов после их тщательного перемешивания. Пробы почв высушивали в течение 3–5 часов, удаляли камни и органические остатки. Далее почву просеивали через сито 2 мм. Для подготовки почвенных проб к измерениям использовали методы «холодного пара», а также «мокрого» озоления с помощью микроволновой системы MARS-5 (СЕМ, США). Валовое

содержание тяжелых металлов и мышьяка в почвенных образцах определяли атомно-абсорбционным и плазменно-эмиссионным методами анализа. Измерения проводили на аксиальном атомно-эмиссионном (оптическом) спектрометре с атомизацией проб в индуктивно-связанной плазме (ИСП–ОЭС) Liberty II (Varian, Австралия–США) и спектрометре КВАНТ. Зета-1 с приставкой ГРГ-3. Используемые средства измерений и методическое обеспечение позволяли достоверно определять содержание тяжелых металлов и мышьяка в почве на уровне регионального фона. Оценку экологической безопасности почв проводили сопоставляя результаты измерений валового содержания в них поллютантов с нормативами СанПиН 1.2.3685–21 [20] и с региональным фоном по данным мониторинга Росгидромета в Свердловской области [21].

Результаты исследования и обсуждение

Почвенный покров наземных экосистем в районе размещения Белоярской АЭС формируют преимущественно дерново-подзолистые почвы с локальными включениями темно-серых лесных. В западном и южном направлениях от атомной станции отмечены выщелоченные черноземы. Гранулометрический состав почв варьирует от легкого до среднего и определяется как супесями, так и суглинками. Кислотность пахотных почв характеризуется слабокислой реакцией или близкой к нейтральной [15].

Валовое содержание 17 анализируемых элементов в почвенных образцах района размещения Белоярской АЭС варьирует в диапазоне шести порядков величин, в среднем от 16,5 тыс. мг/кг (Fe) до 0,015 мг/кг (Hg) почвы (табл. 1). Максимальное накопление тяжелых металлов в почве характерно для железа, марганца и бария, а минимальное – для ртути и кадмия. Последние два тяжелых металла являются наиболее токсичными и относятся к I классу опасности. За исследуемый период (2013–2019 г.) соотношение большинства элементов в почвенном покрове наземных экосистем было достаточно стабильным. Так, в 2013 г. по снижению среднего содержания в почве тяжелые металлы и мышьяк располагались в следующий ряд: Fe (среднее – 16286 мг/кг) > Mn(663) > Ba(327) > Zn(43) > Ni(42) > V(28) > Cr(26) > Sr(24) > Cu(11) > Pb(9,1) > Co(7,4) > As(2,1) > W(1,64) > Sb(1,55) > Mo(1,2) > Cd(0,3) > Hg(0,02 мг/кг).

В 2019 г. соотношение элементов изменилось только для пары ванадия и хрома, а также вольфрама, сурьмы и мышьяка, приняв вид: Fe (среднее – 16700 мг/кг) > Mn(879) > Ba(134) > Zn(51) > Ni(35) > Cr(32) > V(30) > Sr(28) > Cu(21) > Pb(12,4) > Co(11,9) > W(6,7) > Sb(2,4) > As(1,7) > Mo(1,5) > Cd(0,2) > Hg(0,01 мг/кг).

Из представленных данных видно, что за шесть лет произошло незначительное увеличение содержания в почвенном покрове исследуемой территории большинства элементов (марганца, цинка, хрома, стронция, меди, свинца, кобальта сурьмы, молибдена), которое составило 1,2...1,9 раз. Максимальное повышение отмечено у вольфрама – до 4-х раз. При этом

валовое содержание в почве данного элемента не велико. За аналогичный период несколько снизилось накопление в почвенном покрове бария, никеля, мышьяка и ртути (до 1,2...2,4 раза). Выделенные зако-

номерности коррелируют с данными по увеличению за последние 10 лет объемов выбросов в атмосферу марганца и свинца и по снижению выбросов никеля и мышьяка, согласно [13].

Таблица 1. Среднее валовое содержание тяжелых металлов и мышьяка в почве наземных экосистем в районе размещения Белоярской АЭС в 2013 и 2019 гг., мг/кг

Table 1. Average gross content of heavy metals and arsenic in the soil of terrestrial ecosystems in the vicinity of the Beloyarsk NPP in 2013 and 2019, mg/kg

Элемент Element	Пашня/Arable land		Целина/Virgin land		Луг/Meadow	
	2013	2019	2013	2019	2013	2019
	n=27	n=25	n=4	n=3	n=4	n=4
I класс опасности/I hazard class						
Pb	7,62±1,66	11,8±3,11	8,26±2,49	12,9±4,27	20,1±8,4	15,8±5,3
Zn	37,6±12,1	49,2±12,6	35,1±3,42	26,8±0,64	86,5±12,7	73,9±35,3
Cd	0,23±0,06	0,21±0,12	0,093±0,075	0,138±0,004	0,71±0,29	0,61±0,28
As	2,11±1,11	1,72±0,57	2,04±0,78	1,96±0,54	2,37±0,11	1,78±0,36
Hg	0,017±0,006	0,013±0,005	0,016±0,002	0,008±0,004	0,053±0,028	0,011±0,003
II класс опасности/II hazard class						
Mo	1,31±0,38	1,28±0,56	0,88±0,24	2,36±1,17	0,94±0,26	2,21±1,61
Cu	9,71±2,66	21,8±5,14	11,02±2,45	13,2±3,36	16,7±10,6	17,6±4,4
Ni	43,8±11,8	36,9±9,48	35,4±7,48	27,4±1,82	34,8±13,7	25,6±17,1
Co	7,58±1,36	12,9±3,65	6,91±0,82	7,92±3,46	7,11±1,64	5,96±0,98
Cr	27,6±7,69	35,1±10,8	23,8±5,67	24,0±2,26	19,6±6,1	19,7±6,5
Sb	0,86±0,42	2,04±1,02	0,69±0,07	0,76±0,08	6,77±1,19	6,51±2,96
III класс опасности/III hazard class						
Sr	25,1±7,19	29,3±8,91	17,2±3,31	16,1±2,41	22,8±11,7	24,5±14,2
Mn	638±205	857±262	499±217	628±142	998±367	1137±422
V	29,3±5,87	32,3±7,96	27,3±5,39	24,2±3,29	17,9±1,9	15,5±3,9
W	1,59±0,71	7,21±1,52	1,37±0,46	4,31±0,22	2,21±0,38	3,88±1,62
Ba	351±181	128±71	247±104	159±13,5	244±55	169±119
Вне классов опасности/Out of hazard classes						
Fe	17176±4114	17742±3968	14340±2488	8974±1635	12448±4036	14315±10242

По общему накоплению тяжелых металлов и мышьяка в почве района размещения Белоярской АЭС исследуемые наземные экосистемы можно расположить в ряд: пашня (18,7 г/кг почвы) > луга (14,9 г/кг) > целина (12,6 г/кг). В основном разница по суммарному содержанию элементов в наземных экосистемах обусловлена различиями по накоплению в почве железа, вклад которого в техногенный фон составляет 90...95 %. В почвенном покрове пашни отмечается также повышенное содержание ряда других металлов: Ni, Co, Cr, Sr, V, W и Ba. С одной стороны, это можно объяснить большим количеством точек пробоотбора на пашне и, соответственно, более представительными данными, характеризующими регион исследования. Другой возможной причиной таких различий может являться ежегодное применение на пашне минеральных удобрений и дополнительное поступление в почву ряда тяжелых металлов, содержащихся в составе агроメリорантов [22–24]. Также за весь период наблюдений на участках природных экосистем отмечено преобладающее (до 4,6...9,2 раз), по сравнению с агроценозами, содержание в почве сурьмы. Помимо техногенного воздействия, более высокое накопление в почве данного элемента, как и других, может быть обусловлено их природным происхождением в материнских породах.

Поскольку контрольные участки на лугах и целине расположены ближе к Белоярской АЭС, чем точки пробоотбора на пашне, где отмечены более высокие концентрации ряда поллютантов, можно предположить, что выбросы тяжелых металлов в окружающую среду от атомной станции незначительны. Для более точной

оценки возможного влияния работы Белоярской АЭС на поступление токсикантов в наземные экосистемы была проанализирована корреляция между содержанием тяжелых металлов и мышьяка в почве контрольных участков и расстоянием точек пробоотбора от радиационно-опасных объектов. Среди всех изученных элементов коэффициенты корреляции варьировали в диапазоне – 0,44...0,29 в 2013 г. и в пределах –0,29...0,38 в 2019 г. Учитывая низкие значения коэффициентов прямой и обратной корреляции, нельзя говорить о достоверном влиянии Белоярской АЭС на ухудшение экологической обстановки за счет выбросов тяжелых металлов как вследствие многолетней работы атомной станции, так и после начала эксплуатации нового реактора БН-800.

Рассматривая вклад токсичных элементов, относенных к трем классам опасности, в загрязнение почвенного покрова района размещения Белоярской АЭС, отметим, что среди поллютантов I класса доминирующая роль принадлежит цинку. Его доля среди наиболее опасных токсикантов стабильно составляет 76...78 % (рис. 1). На втором месте идет свинец (18...21 %). Вклад мышьяка в группе токсикантов I класса опасности не превышает 2...3 %, а кадмия и ртути составляет менее 1 %.

Среди металлов II класса опасности доминирует никель, хотя за шесть лет его вклад в состав элементов данной группы снизился с 45 до 34 %, в основном за счет увеличения роли меди на 5 %. Вклад хрома (28...30 %) и кобальта (8...10 %) в загрязнение достаточно стабильны, а роль молибдена и сурьмы минимальны (1...4 %).

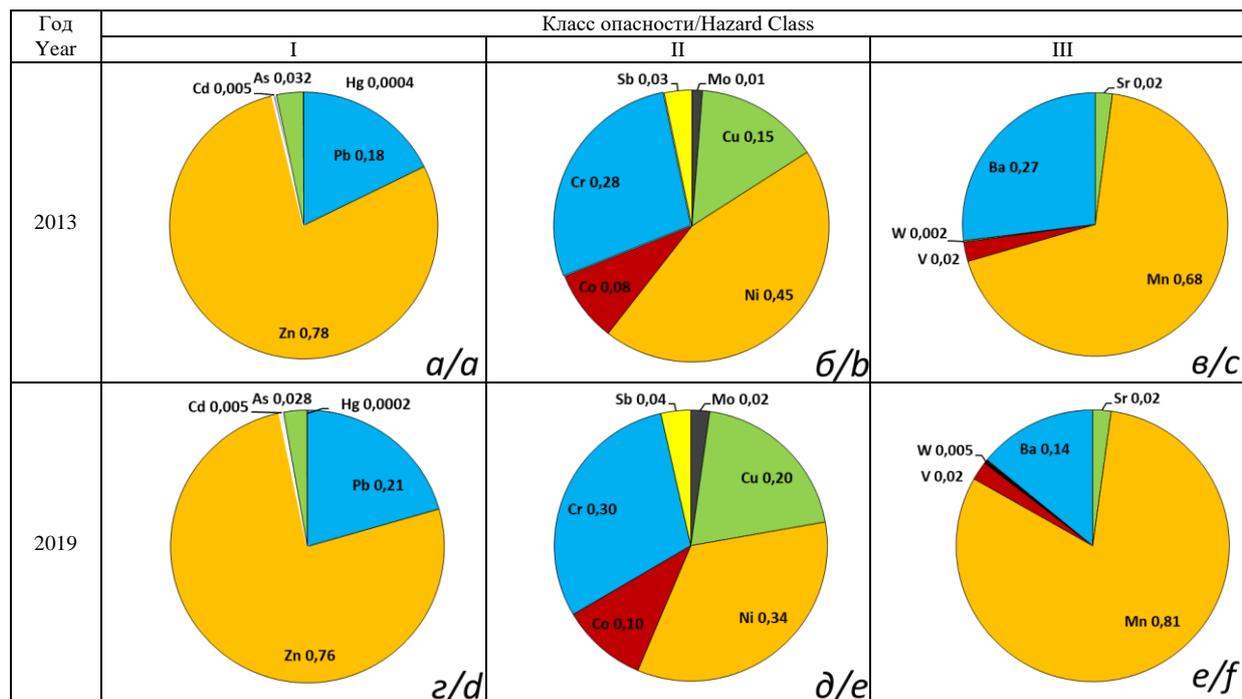


Рис. 1. Соотношение элементов I (а, з), II (б, д) и III (в, е) классов опасности в почве наземных экосистем района расположения Белоярской АЭС в 2013 и 2019 гг.

Fig. 1. Ratio of the elements of I (a, d), II (b, e) and III (c, f) hazard classes in the soil of terrestrial ecosystems in the vicinity of the Beloyarsk NPP in 2013 and 2019

В III классе опасности основным токсикантом является марганец, причем его вклад в компонентный состав загрязнения тяжелыми металлами данной группы за последние годы вырос на 13 %. При этом роль бария, который расположен на втором месте в данном классе, на столько же снизилась. Вклад остальных элементов III класса опасности (ванадия, стронция и вольфрама) минимален и не превышает в сумме 5 %.

Для оценки экологической безопасности почв наземных экосистем в районе расположения Белоярской АЭС были определены риски (вероятности) превышения действующих санитарно-гигиенических нормативов (СанПиН 1.2.3685–21) по содержанию поллютантов в почвенном покрове и показателей регионального фона [20, 21]. При достаточно высоком уровне выбросов загрязняющих веществ в ряде промышленных центров Свердловской области в районе расположения Белоярской АЭС валовое содержание большей части тяжелых металлов в почве наземных экосистем отвечает установленным требованиям СанПиН 1.2.3685–21. Из десяти нормируемых в почве токсикантов наиболее сложная ситуация складывается с содержанием в почве никеля. Несмотря на снижение в последние годы выбросов в атмосферу данного элемента, от 25 до 63 % проб почвы в районе Белоярской АЭС все еще содержат никель, превышающий ориентировочно допустимую концентрацию (ОДК) элемента для наземных экосистем региона с учетом их почвенных характеристик (табл. 2). В то же время стоит отметить, что это превышение составляет максимум 1,5 раза от уровня ОДК.

На контрольных участках луговых экосистем за весь период наблюдений была превышена до 2-х раз предельно-допустимая концентрация (ПДК) по содержанию сурьмы во всех почвенных образцах. В 2019 г. в 4...25 % проб почв пашни и лугов отмечено незначительное (до 30 %) превышение ПДК по содержанию в почве марганца, что объясняется увеличением выбросов в атмосферу этого элемента за последние 10 лет. В 4...11 % проб почв пашни превышены ОДК по мышьяку (до 1,3 раза), что, по всей видимости, обусловлено применением на сельскохозяйственных угодьях минеральных удобрений. В целом представленные результаты показывают достаточно стабильную экологическую обстановку по содержанию поллютантов в почве района расположения Белоярской АЭС. Однако при планировании дальнейших мониторинговых исследований в регионе необходимо обратить внимание на поведение в почве мышьяка, никеля, сурьмы, марганца, кадмия и свинца. Повышенное содержание данных токсикантов в почвенном покрове может привести к их накоплению в сельскохозяйственной и природной пищевой продукции и, соответственно, в рационе питания населения.

Уровни накопления в почве наземных экосистем района расположения Белоярской АЭС никеля и марганца превышают в ряде случаев не только нормативы СанПиН 1.2.3685–21, но региональный техногенный фон, характерный для Свердловской области [21]. По никелю такое несоответствие отмечено в 25...63 % почвенных образцов всех типов наземных экосистем (табл. 3). По марганцу превышение регионального фона зафиксировано в 10...50 % проб почв пашни и лугов. Стоит отметить, что отличия от регионального

фона отмечаются в некоторых почвенных пробах и по другим тяжелым металлам. Это подтверждает определенное влияние выбросов токсикантов от промыш-

ленных предприятий района размещения Белоярской АЭС на формирование экологической обстановки региона исследования.

Таблица 2. Доля проб почв в районе размещения Белоярской АЭС в 2013 и 2019 гг. с превышением нормативов СанПиН 1.2.3685–21 по содержанию токсикантов, отн. ед.

Table 2. Share of soil samples in the vicinity of the Beloyarsk NPP in 2013 and 2019 in excess of SanPiN 1.2.3685–21 standards for the content of toxicants

Элемент Element	ПДК(ОДК), мг/кг Permissible level, mg/kg [20]			Пашня/Arable land		Целина/Virgin land		Луг/Meadow	
	I*	II**	III***	2013	2019	2013	2019	2013	2019
I класс опасности/I hazard class									
Pb	(32,0)	(65,0)	(130,0)	0	0	0	0	0	0
Zn	(55,0)	(110,0)	(220,0)	0	0	0	0	0	0
Cd	(0,5)	(1,0)	(2,0)	0	0	0	0	0	0
As	(2,0)	(5,0)	(10,0)	0,11	0,04	0	0	0	0
Hg		2,1		0	0	0	0	0	0
II класс опасности/II hazard class									
Cu	(33,0)	(66,0)	(132,0)	0	0	0	0	0	0
Ni	(20,0)	(40,0)	(80,0)	0,63	0,33	0,25	0,25	0,5	0,25
Sb		4,5		0	0	0	0	1	1
III класс опасности/III hazard class									
Mn		1500,0		0	0,04	0	0	0	0,25
V		150,0		0	0	0	0	0	0

I* – песчаные и супесчаные/sandy and sandy loam; II** – кислые (суглинистые и глинистые), pH KCl < 5,5/acidic (loam and clay), pH KCl < 5,5; III*** – близкие к нейтральным, нейтральные (суглинистые и глинистые), pH KCl > 5,5/close to neutral, neutral (loam and clay), pH KCl > 5,5.

Таблица 3. Доля проб почв в районе размещения Белоярской АЭС в 2013 и 2019 гг. с превышением содержания тяжелых металлов по отношению к региональному фону

Table 3. Share of soil samples in the vicinity of the Beloyarsk NPP in 2013 and 2019 with excess content of heavy metals in relation to the regional background

Элемент Element	Фон, мг/кг Background, mg/kg [21]	Пашня/Arable land		Целина/Virgin land		Луг/Meadow	
		2013	2019	2013	2019	2013	2019
Pb	27	0	0	0	0	0,25	0
Zn	94	0	0	0	0	0,25	0,5
Cd	1,1	0	0	0	0	0	0
Hg	0,05	0	0	0	0	0,5	0
Cu	71	0	0	0	0	0	0
Ni	41	0,63	0,29	0,25	0	0,5	0,25
Co	20	0	0,08	0	0	0	0
Cr	42	0	0,13	0	0	0	0
Mn	926	0,11	0,21	0	0	0,5	0,5
Fe	23657	0,04	0,04	0	0	0	0,25

На примере двух целинных участков, используемых в качестве пастбищ, дана оценка распределения токсикантов I, II и III классов опасности в почвенном профиле на глубину до 20 см, а также шестилетняя динамика вертикальной миграции элементов (рис. 2). Наибольшее количество тяжелых металлов и мышьяка аккумулировано в 0–5 см слое почвы, которое составляет в среднем 42 % об общего запаса токсикантов на глубине до 20 см. Максимальное накопление в верхнем почвенном горизонте отмечено у кадмия (62 %), мышьяка (49 %) и свинца (48 %), а минимальное – у сурьмы и марганца (29 и 28 %, соответственно). По общему запасу элементов в верхнем (0–5 см) слое почвы их можно расположить в ряд: Cd>As>Pb>Zn>Cu>Mo>Hg>Sr>Ni>Cr>V>W>Co>Ba>Sb>Mn. В трех более глубоких горизонтах тяжелые металлы и мышьяк распределены достаточно равномерно. При этом за шесть лет среднее соотношение элементов в слоях почвы 0–5, 5–10, 10–15 и 15–20 см изменилось с 43, 21, 19, 17 % на 40, 20, 20, 20 %, соответственно. Это говорит о медленной вертикальной

миграции токсикантов из верхнего горизонта в более глубокие слои почвы. Также снижение во времени запаса элементов в 0–5 см слое почвы подтверждает отсутствие в последние годы значимого дополнительного поступления тяжелых металлов и мышьяка от выбросов промышленных предприятий Свердловской области, а существующая техногенная нагрузка на наземные экосистемы сформировалась за длительный (десять лет) период их работы. Исключением из выделенной закономерности являются лишь молибден и вольфрам, у которых произошло увеличение за рассматриваемый период валового содержания в верхнем слое почвы с 36 до 50 % и с 32 до 44 %, соответственно.

Сравнительный анализ содержания тяжелых металлов и мышьяка в почве района расположения Белоярской АЭС с данными, полученными в других регионах России, показывает, что по ряду элементов они близки и являются типичными, по другим существенно различаются. Так, в урбанизированных ландшафтах промышленных и сельскохозяйственных

центров Приморского края (города Владивосток и Уссурийск) отмечено схожее валовое содержание в почве кобальта (15 мг/кг) и никеля (29 мг/кг) [8]. В то же время накопление в почвенном покрове ванадия

(89...94 мг/кг), хрома (92...94 мг/кг), меди (81 мг/кг) и цинка (155...260 мг/кг) в 3–4 раза выше, по сравнению с элементами исследуемого района Свердловской области.

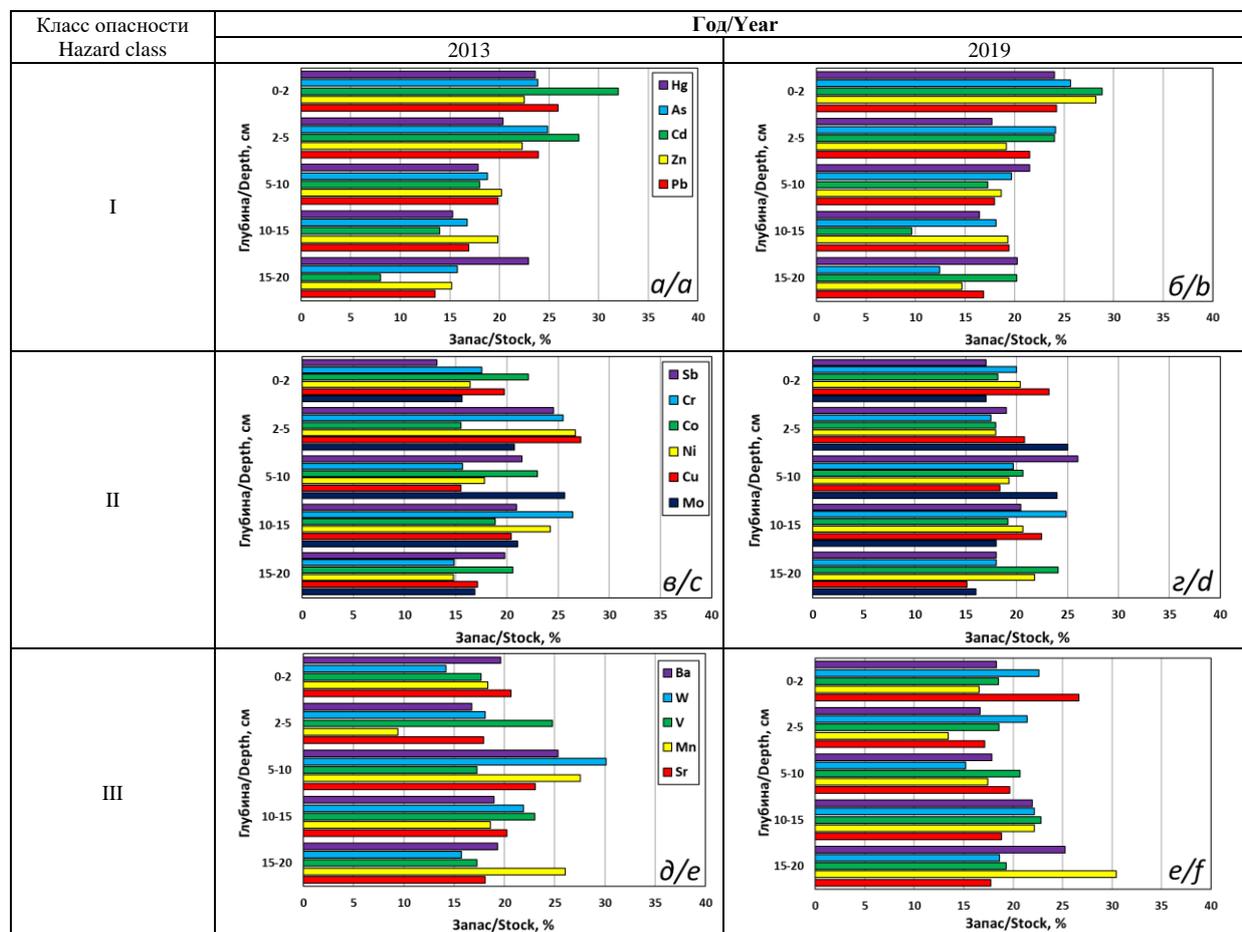


Рис. 2. Занас элементов I (а, б), II (в, г) и III (д, е) классов опасности в 20-см почвенном профиле природных экосистем в районе Белоярской АЭС в 2013 и 2019 гг., %

Fig. 2. Stock of elements of I (a, b), II (c, d) and III (e, f) hazard classes in the 20-cm soil profile of the natural ecosystems in the vicinity of the Beloyarsk NPP in 2013 and 2019, %

В почвах Республики Коми (Усинский и Печорский районы), расположенной рядом с Уральским федеральным округом, содержание тяжелых металлов характеризуется широкой вариабельностью, которая определяется гранулометрическим составом почв и геохимическими особенностями ландшафтов. По большинству изученных элементов в почвенном покрове Республики Коми их содержание коррелирует с результатами мониторинга района размещения Белоярской АЭС. Такими тяжелыми металлами являются свинец (содержание в почве 2,8...25,2 мг/кг), цинк (9,0...54,0 мг/кг), кадмий (0,08...0,8 мг/кг) и марганец (5,7...1400) [25]. Однако показатели накопления в почве меди (1,7...11,7 мг/кг) и никеля (1,9...19,1 мг/кг) почти в 2 раза ниже, чем в почвах исследуемого района Свердловской области, а ртути (0,07...0,26 мг/кг) более чем в пять раз выше.

Экологический мониторинг почв Восточного Забайкалья [26] показал, что накопление в них основных токсических элементов I и II классов опасности

хорошо согласуется с аналогичными показателями для почв района расположения Белоярской АЭС. Так, валовое содержание свинца в почвах Забайкалья варьирует в пределах 1,1...36,0 мг/кг, кадмия в диапазоне 0,03...0,31 мг/кг, цинка в пределах 12,7...71,5 мг/кг. Только накопление меди (0,13...16,6 мг/кг) несколько выше, чем в регионе исследования Свердловской области.

Все представленные в работе данные демонстрируют схожесть проблем техногенного загрязнения наземных экосистем в промышленно развитых регионах России. Тяжелые металлы и мышьяк являются одними из наиболее значимых поллютантов, которые выбрасывают предприятия горно-металлургического комплекса. При этом элементы I, II и III классов опасности, поступающие в окружающую среду, характеризуются выраженным токсическим и мутагенным действием [3, 7, 11]. Также важно отметить, что вклад выбросов атомных станций в формирование дополнительной техногенной нагрузки, свя-

занной с загрязнением тяжелыми металлами, по сравнению с промышленными предприятиями ничтожно мал.

Заключение

Представленные в работе результаты мониторинга могут служить информационной базой для многофакторной эколого-токсикологической оценки качества почв в районе размещения Белоярской АЭС [27, 28]. В совокупности с полученными ранее данными радиэкологического мониторинга природных и аграр-

ных экосистем [14, 15] они дают возможность провести комплексный анализ радиационно-химического риска для здоровья населения, проживающего в зоне влияния Белоярской атомной станции. Таким образом, мониторинг содержания тяжелых металлов и мышьяка в почвенном покрове должен являться составной частью оценки экологической обстановки в регионе размещения промышленных предприятий и радиационно-опасных объектов для принятия обоснованных решений по ее оздоровлению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Risk assessment of metal contamination in soil and groundwater in asia: a review of recent trends as well as existing environmental laws and regulations / T. Teh, N.A.R. Norulaini, M. Shahadat, Y. Wong, A.K. Mohd Omar // *Pedosphere*. – 2016. – V. 26 (4). – P. 431–450.
2. Risk assessment and interpretation of heavy metal contaminated soils on an urban brownfield site in New York metropolitan area / Y. Qian, F. Gallagher, Y. Deng, M. Wu, H. Feng // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2017. – V. 24. – P. 23549–23558.
3. Brevik E.C., Sauer T.J. The past, present, and future of soils and human health studies // *Soil*. – 2015. – V. 1. – P. 35–46.
4. Ettl V. Soil contamination near non-ferrous metal smelters: a review // *Applied Geochemistry*. – 2016. – V. 64. – P. 56–74.
5. Trace metal contamination in urban soils of China / X.S. Luo, S. Yu, Y.G. Zhu, X.D. Li // *Science of the Total Environment*. – 2012. – V. 421–422. – P. 17–30.
6. Donga R., Jiab Z., Lia S. Risk assessment and sources identification of soil heavy metals in a typical county of Chongqing Municipality, Southwest China // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2018. – V. 3. – P. 275–281.
7. Concentration, spatial distribution, contamination degree and human health risk assessment of heavy metals in urban soils across China between 2003 and 2019 – a systematic review / S. Tong, H. Li, L. Wang, M. Tudi, L. Yang // *International Journal Environmental Research and Public Health*. – 2020. – V. 17. – P. 3099.
8. Жарикова Е.А. Тяжелые металлы в городских почвах: оценка содержания и экологического риска // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 1. – С. 164–173.
9. Особенности радиационной обстановки на Урале / В.И. Уткин, М.Я. Чеботина, А.В. Евстигнеев, Н.М. Любашевский. – Екатеринбург: УрО РАН, 2004. – 150 с.
10. Методология экологического мониторинга аграрных предприятий в зоне Урала / И.А. Шкуратова, И.М. Донник, А.В. Трапезников, А.Г. Исаева, Н.А. Верещак, А.С. Кривоногова, А.А. Баранова // *Аграрный вестник Урала*. – 2012. – № 2 (94). – С. 60–62.
11. Панов А.В., Переволоцкая Т.В. Методология оценки рисков для агроэкосистем в условиях техногенного загрязнения // *Сельскохозяйственная биология*. – 2020. – Т. 55. – № 3. – С. 468–480.
12. Bioavailability of heavy metals in soils: definitions and practical implementation – a critical review / R.Y. Kim, J.K. Yoon, T.S. Kim, J.E. Yang, G. Owens, K.R. Kim // *Environmental Geochemistry and Health*. – 2015. – V. 37. – P. 1041–1061.
13. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году. Государственный доклад. – М.: Минприроды России; МГУ им. М.В. Ломоносова, 2021. – 864 с.
14. Assessment of the influence of BN-800 operation on the radioecological situation in the vicinity of Beloyarsk NPP / A.V. Panov, V.K. Kuznetsov, N.N. Isamov, I.V. Geshel, A.V. Trapeznikov, A.V. Korzhavin // *Atomic Energy*. – 2021. – V. 129 (5). – P. 297–304.
15. Радиационно-экологический мониторинг агроэкосистем в районе Белоярской АЭС / А.В. Панов, А.В. Трапезников, В.К. Кузнецов, А.В. Коржавин, Н.Н. Исамов, И.В. Гешель // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 3. – С. 146–157.
16. РД 52.18.718–2008. Организация и порядок проведения наблюдений за загрязнением почв токсикантами промышленного происхождения. – Обнинск: ГУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2008. – 72 с.
17. ГОСТ 17.4.4.02.2017. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. – М.: Стандартинформ, 2018. – 21 с.
18. ПНД Ф 16.1.2.3:3.10–98. Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений содержания ртути в твердых объектах методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии (метод «холодного пара»). – М.: Госкомэкология России, 1998. – 11 с.
19. ПНД Ф 16.1.2.3:3.11–98. Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. – М.: Госкомэкология России, 2005. – 28 с.
20. СанПиН 1.2.3685–21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. – М.: Роспотребнадзор, 2021. – 987 с.
21. Ежегодник. Загрязнение почв Российской Федерации токсикантами промышленного происхождения в 2020 году. – Обнинск: ФГБУ «НПО «Тайфун», 2021. – 128 с.
22. Chen M., Graedel T.E. The potential for mining trace elements from phosphate rock // *Journal of Cleaner Production*. – 2015. – V. 91. – P. 337–346.
23. Trace element composition of selected fertilizers used in Chile: phosphorus fertilizers as a source of long-term soil contamination / M. Molina, F. Aburto, R. Calder, M. Cazanga, M. Escudey // *Soil and Sediment Contamination*. – 2009. – V. 18. – P. 497–511.
24. Senesi M., Polemio M. Trace element addition to soil by application of NPK fertilizers // *Fertilizer Research*. – 1981. – V. 2. – P. 289–302.
25. Безносиков В.А., Лодыгин Е.Д. Геохимическая оценка экологического состояния почв // *Гигиена и санитария*. – 2018. – Т. 97. – № 7. – С. 623–628.
26. Мониторинг содержания мышьяка, свинца, кадмия, цинка и меди в компонентах окружающей среды населенного пункта Шерловая Гора (Восточное Забайкалье) / Е.С. Эпова, М.А. Солонухина, О.В. Еремин, Л.А. Михайлова, О.Г. Алексеева, Н.М. Бурлака, С.Э. Лапа // *Гигиена и санитария*. – 2020. – Т. 99. – № 2. – С. 210–216.
27. Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination. A review / J.B. Kowalska, R. Mazurek, M. Gasiorek, T. Zaleski // *Environmental Geochemistry and Health*. – 2018. – V. 40. – P. 2395–2420.
28. Environmental quality and sources of heavy metals in the topsoil based on multivariate statistical analyses: a case study in Laiwu City, Shandong Province, China / L. Yu, J. Cheng, J. Zhan, A. Jiang // *Natural Hazards*. – 2016. – V. 81. – P. 1435–1445.

Поступила 07.03.2022 г.

Информация об авторах

Панов А.В., доктор биологических наук, профессор РАН, главный научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии.

Трапезников А.В., доктор биологических наук, заведующий отделом континентальной радиоэкологии Института экологии растений и животных Уральского отделения РАН.

Коржавин А.В., кандидат ветеринарных наук, старший научный сотрудник отдела континентальной радиоэкологии Института экологии растений и животных Уральского отделения РАН.

Сидорова Е.В., научный сотрудник испытательной лаборатории Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии.

Корнеев Ю.Н., научный сотрудник испытательной лаборатории Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии.

UDC 614.77:631.416.8:632.122.1

HEAVY METALS AND ARSENIC IN SOILS IN THE VICINITY OF INDUSTRIAL ENTERPRISES AND NUCLEAR POWER PLANT (BY THE EXAMPLE OF THE BELOYARSK NPP)

Alexey V. Panov¹,
riar@mail.ru

Elena V. Sidorova¹,
sidelena@yandex.ru

Alexander V. Trapeznikov²,
vera_zar@mail.ru

Yuri N. Korneev¹,
riar@mail.ru

Alexander V. Korzhavin²,
BFS_zar@mail.ru

¹ Russian Institute of Radiology and Agroecology,
109 km, Kiev highway, Obninsk, 249032, Russia.

² Institute of Plant and Animal Ecology, Russian Academy of Science, Ural branch,
202, 8 Marta street, Yekaterinburg, 620144, Russia.

The relevance. Pollution of ecosystems with heavy metals and arsenic is a significant anthropogenic factor that adversely affects humans and biota. In the Sverdlovsk region, where mining and processing of mineral raw materials is carried out, high levels of pollutant emissions from stationary sources, including heavy metals, are noted. The region is also characterized by multicomponent contamination of territories with artificial radionuclides. Since 1964, the Beloyarsk NPP has been in operation in the Sverdlovsk region. The long-term operation of industrial enterprises and radiation hazardous facilities increases the technogenic load on the ecosystems of the Urals.

The main aim of the research is to assess the content of heavy metals and arsenic in the soils of terrestrial ecosystems in the vicinity of industrial enterprises and the Beloyarsk NPP based on environmental monitoring.

Objects. In 2013 and 2019 the soils of natural (meadow) and agricultural (arable land, grassland) ecosystems of the 30-km zone of influence of the Beloyarsk NPP were studied. The content of 17 elements related to I (Pb, Zn, Cd, As, Hg), II (Mo, Cu, Ni, Co, Cr, Sb), III (Sr, Mn, V, W, Ba) hazard classes was studied in the soil cover, as well as iron.

Methods. The assessment of the total content of heavy metals and arsenic in the soil was carried out in the testing laboratory of agroecology of the RIRAE (accreditation certificate RA.RU.513078). To prepare soil samples for measurements, we used the methods of «cold vapor» and «wet ashing» with a MARS-5 microwave system (CEM, USA). The elements in the samples were determined by atomic absorption and plasma emission methods of analysis. For measurements, we used an axial atomic emission (optical) spectrometer with sample atomization in inductively coupled plasma (ICP–OES) Liberty II (Varian, Australia–USA) and a KVANT spectrometer Zeta-1 with the GRG-3.

Results. It is shown that for 2013–2019 the ratio of elements in the soil cover of terrestrial ecosystems in the vicinity of the Beloyarsk NPP was quite stable. According to the decrease in the total content in the soil, heavy metals and arsenic in 2019 were arranged in the following order: Fe (average – 16700 mg/kg) > Mn (879) > Ba (134) > Zn (51) > Ni (35) ≥ Cr (32) ≥ V (30) ≥ Sr (28) > Cu (21) > Pb (12,4) ≥ Co (11,9) > W (6,7) > Sb (2,4) > As (1,7) ≥ Mo (1,5) > Cd (0,2) > Hg (0,01 mg/kg). According to the total accumulation of elements in the soil, terrestrial ecosystems are in the ratio: arable land (18,7 g/kg of soil) > meadows (14,9 g/kg) > virgin land (12,6 g/kg). Such a distinction is due to differences in the content of iron in the soil, the contribution of which to the regional background is 90...95 %. A weak correlation between the content of elements in the soil and the distance from the Beloyarsk NPP (–0,44...0,29 in 2013 and –0,29...0,38 in 2019) showed the absence of significant emissions of toxicants into the environment from the nuclear power plant both as a result of its many years of work, and after the start of operation of the BN-800 reactor. Among the I hazard class pollutants accumulated in the soil, zinc dominates (contribution 76...78 %), lead is in second place (18...21 %). In II hazard class, the main soil pollutants are nickel (45...34 %) and chromium (28...30 %). In III hazard class is dominated by manganese (68...81 %) and barium (14...27 %). It is shown that in 25...63 % of soil samples in the vicinity of the Beloyarsk NPP, the gross nickel content does not correspond to the approximate permissible concentrations established in SanPiN 1.2.3685–21. In addition, in all control plots of meadow ecosystems, the maximum permissible concentration for the content of antimony was exceeded. In 2019, in 4...25 % of soil samples of arable land and meadows, a discrepancy was noted with maximum permissible concentration for manganese, and in 4...11 % of soil samples of arable land, the maximum permissible concentration for arsenic was exceeded. The levels of accumulation in the soil of a number of heavy metals also exceed the regional background of the Sverdlovsk region: for nickel in 25...63 % of soil samples of natural and agricultural ecosystems, for manganese in 10...50 % of soil samples of arable land and meadows. The greatest amount of elements (average 42 %) is accumulated in the 0–5 cm soil layer. The maximum accumulation in the upper soil horizon was noted for cadmium (62 %), arsenic (49 %), and lead (48 %), and the minimum for antimony (29 %) and manganese (28 %). According to the total stock of toxicants in the 0–5 cm soil layer, they are arranged in a row: Cd > As > Pb > Zn > Cu > Mo > Hg > Sr > Ni > Cr > V > W > Co > Ba > Sb > Mn. In deeper horizons (5–10, 10–15 and 15–20 cm) of soil the elements are distributed evenly. Compared to other technogenically-polluted regions of Russia, the results of monitoring the content of heavy metals and arsenic in the soil of the Beloyarsk NPP area show a stable ecological situation. When planning further monitoring studies, it is necessary to pay attention to the behavior of arsenic, nickel, antimony, manganese, cadmium and lead in the soil. The increased content of these toxicants in the soil can lead to their accumulation in agricultural and natural food products.

Key words:

Terrestrial ecosystems, soil cover, anthropogenic impact, pollutants, technogenic contamination, environmental monitoring, hygienic assessment, environmental safety.

REFERENCES

- Teh T., Norulaini N.A.R., Shahadat M., Wong Y., Mohd Omar A.K. Risk assessment of metal contamination in soil and groundwater in asia: a review of recent trends as well as existing environmental laws and regulations. *Pedosphere*, 2016, vol. 26, no. 4, pp. 431–450.
- Qian Y., Gallagher F., Deng Y., Wu M., Feng H. Risk assessment and interpretation of heavy metal contaminated soils on an urban brownfield site in New York metropolitan area. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, vol. 24, pp. 23549–23558.
- Brevik E.C., Sauer T.J. The past, present, and future of soils and human health studies. *Soil*, 2015, no. 1, pp. 35–46.
- Ettler V. Soil contamination near non-ferrous metal smelters: a review. *Applied Geochemistry*, 2016, vol. 64, pp. 56–74.
- Luo X.S., Yu S., Zhu Y.G., Li X.D. Trace metal contamination in urban soils of China. *Science of the Total Environment*, 2012, vol. 421–422, pp. 17–30.
- Donga R., Jiab Z., Lia S. Risk assessment and sources identification of soil heavy metals in a typical county of Chongqing Municipality, Southwest China. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018, vol. 3, pp. 275–281.
- Tong S., Li H., Wang L., Tudi M., Yang L. Concentration, spatial distribution, contamination degree and human health risk assessment of heavy metals in urban soils across China between 2003 and 2019 – a systematic review. *International Journal Environmental Research and Public Health*, 2020, vol. 17, pp. 3099.
- Zharikova E.A. Assessment of heavy metals content and environmental risk in urban soils. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 1, pp. 164–173. In Rus.
- Utkin V.I., Chebotina M.Ya., Evstigneev A.V., Lyubashevsky N.M. *Osobennosti radiatsionnoy obstanovki na Urale* [Features of the radiation situation in the Urals]. Ekaterinburg, Ural Branch of the RAS Publ., 2004. 150 p.
- Shkuratova I.A., Donnik I.M., Trapeznikov A.V., Isaeva A.G., Verechak N.A., Krivonogova A.S., Baranova A.A. Metodologiya ekologicheskogo monitoringa agrarnykh predpriyatiy v zone Urala [Methodology of monitoring of agrarian enterprises in the Ural]. *Agrarian Bulletin of the Urals*, 2012, vol. 2, no. 94, pp. 60–62.
- Panov A.V., Perevolotskaya T.V. Risk assessment methodology for agroecosystems in the conditions of technogenic pollution. *Agricultural Biology*, 2020, vol. 55, no. 3, pp. 468–480. In Rus.
- Kim R.Y., Yoon J.K., Kim T.S., Yang J.E., Owens G., Kim K.R. Bioavailability of heavy metals in soils: definitions and practical implementation – a critical review. *Environmental Geochemistry and Health*, 2015, vol. 37, pp. 1041–1061.
- sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy Rossiyskoy Federatsii v 2020 godu. Gosudarstvenny doklad* [On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2020. State report]. Moscow, Ministry of Natural Resources of Russia; Moscow State University M.V. Lomonosov Publ., 2021. 864 p.
- Panov A.V., Kuznetsov V.K., Isamov N.N., Geshe I.V., Trapeznikov A.V., Korzhavin A.V. Assessment of the influence of BN-800 operation on the radioecological situation in the vicinity of Beloyarsk NPP. *Atomic Energy*, 2021, vol. 129 (5), pp. 297–304.
- Panov A.V., Trapeznikov A.V., Kuznetsov V.K., Korzhavin A.V., Isamov N.N., Geshe I.V. Radioecological monitoring of agroecosystems in the vicinity of Beloyarsk NPP. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 3, pp. 146–157. In Rus.
- RD 52.18.718–2008. Organizatsiya i poryadok provedeniya nablyudeniy za zagryazneniem pochv toksikantami promyshlennogo proiskhozhdeniya* [RD 52.18.718–2008. Organization and procedure for monitoring soil pollution by toxicants of industrial origin]. Obninsk, SO «VNIIGMI-MTsD» Publ., 2008. 72 p.
- GOST 17.4.4.02.2017. Pochvy. Metody otbora i podgotovki prob dlya khimicheskogo, bakteriologicheskogo, gelmintologicheskogo analiza* [SS 17.4.4.02.2017 Soils. Methods of sample selection and preparation for chemical bacterial and helminthological analysis]. Moscow, Standardinform Publ., 2018. 21 p.
- PND F 16.1.2.3:3.10–98. Kolichestvenny khimicheskiy analiz pochv. Metodika vypolneniya izmereniy soderzhaniya rtuti v tverdykh obektakh metodom atomno-absorbtsionnoy spektrofotometrii (metod «kholodnogo para»)* [PND F 16.1.2.3:3.10–98. Quantitative chemical analysis of soils. Method for performing measurements of mercury content in solid objects by atomic absorption spectrophotometry (cold vapor method)]. Moscow, State Ecology Committee of Russia Publ., 1998. 11 p.
- PND F 16.1.2.3:3.11–98. Kolichestvenny khimicheskiy analiz pochv. Metodika vypolneniya izmereniy soderzhaniya metallov v tverdykh obektakh metodom spektrometrii s induktivno-svjazannoy plazmoy* [PND F 16.1.2.3:3.11–98. Quantitative chemical analysis of soils. Method for Measuring Metal Content in Solid Objects by Inductively Coupled Plasma Spectrometry]. Moscow, State Ecology Committee of Russia Publ., 2005. 28 p.
- SanPiN 1.2.3685–21. Gigenicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya* [Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans]. Moscow, Rospotrebnadzor Publ., 2021. 987 p.
- Ezhгодnik. Zagryaznenie pochv Rossiyskoy Federatsii toksikantami promyshlennogo proiskhozhdeniya v 2020 godu* [Yearbook. Soil pollution of the Russian Federation by toxicants of industrial origin in 2020]. Obninsk, FSBI «NPO Typhoon» Publ., 2021. 128 p.
- Chen M., Graedel T.E. The potential for mining trace elements from phosphate rock. *Journal of Cleaner Production*, 2015, vol. 91, pp. 337–346.
- Molina M., Aburto F., Calder R., Cazanga M., Escudey M. Trace element composition of selected fertilizers used in Chile: phosphorus fertilizers as a source of long-term soil contamination. *Soil and Sediment Contamination*, 2009, vol. 18, pp. 497–511.
- Senesi M., Polemio M. Trace element addition to soil by application of NPK fertilizers. *Fertilizer Research*, 1981, vol. 2, pp. 289–302.
- Beznosikov V.A., Lodygin E.D. Geochemical assessment of ecological state of soils. *Hygiene and Sanitation, Russian journal*, 2018, vol. 97, no. 7, pp. 623–628. In Rus.
- Epova E.S., Soloduhina M.A., Eremin O.V., Mihaylova L.A., Alekseeva O.G., Burlaka L.M., Lapa S.E. Monitoring of arsenic, lead, cadmium, zinc, and copper in the environmental components of the Sherlovaya Gora village (Eastern Transbaikalia). *Hygiene and Sanitation, Russian journal*, 2020, vol. 99, no. 2, pp. 210–216. In Rus.
- Kowalska J.B., Mazurek R., Gasiorek M., Zaleski T. Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination. A review. *Environmental Geochemistry and Health*, 2018, vol. 40, pp. 2395–2420.
- Yu L., Cheng J., Zhan J., Jiang A. Environmental quality and sources of heavy metals in the topsoil based on multivariate statistical analyses: a case study in Laiwu City, Shandong Province, China. *Natural Hazards*, 2016, vol. 81, pp. 1435–1445.

Received: 07 March 2022.

Information about the authors

- Alexey V. Panov**, Dr. Sc., RAS professor, chief researcher, Russian Institute of Radiology and Agroecology.
Alexander V. Trapeznikov, Dr. Sc., head of department, Institute of Plant and Animal Ecology, Russian Academy of Science.
Alexander V. Korzhavin, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Plant and Animal Ecology, Russian Academy of Science.
Elena V. Sidorova, research worker, Russian Institute of Radiology and Agroecology.
Yuri N. Korneev, research worker, Russian Institute of Radiology and Agroecology.

УДК 574.2:550.47

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СОЛЕВЫХ ОБРАЗОВАНИЙ ПИТЬЕВЫХ ВОД ЮЖНОГО КАЗАХСТАНА

Шарипова Ботагоз Ураловна¹,
oralovna82@mail.ru

Какабаев Ануарбек Аязбаевич¹,
anuarka@mail.ru

Барановская Наталья Владимировна²,
nata@tpu.ru

Арынова Шынар Жаныбековна³,
shinar_uzh@mail.ru

Корогод Наталья Петровна⁴,
natalya_korogod@mail.ru

¹ Кокшетауский университет им. Ш. Уалиханова,
Республика Казахстан, 020000, г. Кокшетау, ул. Абая, 76.

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

³ НАО «Торайгыров университет»,
Республика Казахстан, 140000, г. Павлодар, ул. Ломова, 64.

⁴ Павлодарский педагогический университет,
Республика Казахстан, 140002, г. Павлодар, ул. Мира, 60.

Актуальность работы. В связи с неблагоприятной экологической обстановкой на территории Южного Казахстана существует необходимость получения данных о природных и природно-антропогенных геохимических процессах, протекающих в условиях урбанизации и развития промышленности, в том числе урановых разработок. Для оценки изменения эколого-геохимического состояния территории использовали элементный состав солевых образований питьевых вод, так как данный компонент экосистемы зарекомендовал себя как достоверный индикатор загрязнения окружающей среды.

Цель: изучить особенности элементного состава солевых отложений питьевых вод на территории Южного Казахстана.

Методы: инструментальный нейтронно-активационный анализ.

Результаты. Были проанализированы химические элементы в солевых образованиях питьевых вод Южного Казахстана (Кызылординская и Туркестанская области). Выделена ведущая группа элементов в накопи питьевых вод изученной территории – Na, Ca, Fe (структурообразующие), Zn, Sr, Ba (изоморфное замещение в структуре карбоната кальция). Наблюдается неоднородное распределение почти всех изучаемых элементов, за исключением Ca. Региональной спецификой Южного Казахстана является повышенное содержание в антропогенных карбонатах Zn, U, Sr, Ag. Повышенное содержание U и TR приурочено к районам ураново-редкоземельных месторождений пластово-инфильтрационного типа мел-палеогенового возраста Шу-Сарысуйской и Сырдарьинской провинций. Выявлены специфические элементы в солевых образованиях питьевых вод для Туркестанской области (Cs, Eu, U, Ca, Sc, Sr, Ba, Au, Co, Ag, Sb, La, Tb, Hf, Ta) и Кызылординской области (Zn, Sb, Yb, Ta, Na, Th, Fe, As, Cr, Sm, Hf, Co, Lu, Ce, Br, Ca, Rb, Ag, Tb, Au).

Ключевые слова:

Химические элементы, солевые отложения, техногенез, Южный Казахстан, питьевые воды, урановые месторождения.

Введение

Водообеспечение различных отраслей экономики и населения чистой качественной питьевой водой является одним из приоритетных задач Республики Казахстан [1].

Особенно важным является водообеспеченность и рациональное потребление водных ресурсов в районе бассейна реки Сырдарья, расположенной на территориях четырех государств, в том числе протекающей через Туркестанскую и Кызылординскую области.

Водные ресурсы изучаемой территории находятся в основном в пределах Арало-Сырдарьинского водохо-

зяйственного бассейна, незначительные ее части входят в Нура-Сарысуйский и Шу-Таласский бассейны.

Ресурсы Арало-Сырдарьинского бассейна складываются из стока реки Сырдарья и ее основных крупных притоков – Арыс, Келес, Бадам, Боролдай, Бугунь, а также рек, стекающих с Каратауских гор. Свое начало Сырдарья берет в Центральном Тянь-Шане при слиянии рек Нарын и Карадарья. Длина реки в пределах Казахстана составляет около 2200 км, площадь водосборного бассейна – 230 тыс. км². Питание реки в основном снеговое. Химический состав вод сульфатный натриевый, сульфатный кальциевый, минерализация от 0,8 до 1,4 г/л.

Для водопользования различных отраслей народного хозяйства и орошения полей от русла реки выведены ирригационные каналы [2, 3]. Вследствие интенсивного использования Сырдарьи происходит загрязнение ее вод, повышение минерализации (в составе солей преобладают $MgSO_4$, $Ca(HCO_3)_2$, $NaCl$, $CaSO_4$), а также низкий приход воды в Малый Арал [4–7].

Подземные воды сосредоточены в четвертичных аллювиальных образованиях речных долин, аллювиально-пролювиальных отложениях предгорных равнин и межгорных впадин, в палеоген-неогеновых и меловых отложениях артезианских бассейнов, в палеозойских породах горных систем. Разведанные запасы подземных вод составляют $7,2 \text{ км}^3/\text{год}$ [8]. Водовмещающие породы характеризуются изменчивостью литологического состава. Основными водовмещающими породами являются тонко- и мелкозернистые желтовато-серые и светло-серые пески, супеси с маломощными прослоями глин и суглинков.

Из-за широкого проявления эндогенных и экзогенных геологических процессов и различного литологического состава осадочных отложений подземные воды имеют различную степень минерализации – от пресных вод до соленых. Химический состав слабо солоноватых и пресных грунтовых вод сульфатно-гидрокарбонатный магниево-натриевый, солоноватых и соленых хлоридный или сульфатно-хлоридный кальциево-натриевый и хлоридный натриевый. Содержание микрокомпонентов в воде разнообразно и зависит от типа месторождения подземных вод [9].

Важным направлением развития региона является сельское хозяйство и разработка урановых месторождений. В качестве основных источников водоснабжения в регионе выступают поверхностные и подземные воды.

Контаминация вод, поступающих из подземных и поверхностных источников, выявлена на урбанизированных и аграрных территориях, а также территориях, прилегающих к промышленным предприятиям [10–13]. Доказано, что сельскохозяйственная деятельность приводит к загрязнению мышьяком поверхностных и подземных вод, что в дальнейшем может привести к хроническим заболеваниям у населения [14–17]. Индийскими учеными проведено исследование, подтверждающее, что процесс инфильтрации урана в поверхностные водные объекты вызван сельскохозяйственными стоками, в частности применением азотных удобрений [18]. Обнаружена корреляционная связь между повышенными концентрациями урана в воде и гематологическими изменениями у населения [19, 20]. Также специфика и металлогения подземных вод может отразиться на элементном составе волос человека [21, 22].

Для определения качества воды был использован достаточно новый, малоизученный компонент окружающей среды, а именно солевые отложения питьевых вод (накипь). Накипь – это твердые отложения, которые образуются на теплообменной посуде в результате длительного нагревания (кипячения). Преимущество такого объекта в том, что накипь является депонирующей средой, в которой накопление проис-

ходит в течение многих месяцев и отражает химический состав вод, из которых она формируется [23].

Так, на протяжении нескольких лет в результате исследований российских ученых было доказано, что элементный состав карбонатных отложений, образующихся при кипячении питьевых вод, отражает геохимические изменения в водоносных горизонтах, происходящие под воздействием природного и антропогенного факторов [24–28].

Особый интерес представляет концентрация урана в накипи, т. к. исследуемая нами территория лежит в пределах крупных урановорудных провинций – Шусарьсуйской и Сырдарьинской, которые заключают в себе более 76 % запасов урана, разведанных в республике Казахстан. Данные по содержанию урана в накипи позволят спрогнозировать ареол распространения радиоактивного элемента [29]. Часто изучаются вариации содержания урана в земной коре, которые указывают не только на его источник, но и на геохимические условия возникновения урана [30–34].

Также установлено, что основной источник урана в водных объектах обусловлен такими факторами, как выветривание, растворение, колебание уровня грунтовых вод и антропогенная деятельность [35, 36]. Поступая с водой в организм человека, уран может накапливаться в различных органах, таких как печень, почки, кости, селезенка, легкие, оказывая негативное влияние на организм в целом [37–39]. При хроническом поступлении урана в организм происходит нарушение кроветворной и нервной системы, а также лучевое поражение. Часто урану сопутствует торий, который может обладать тератогенным эффектом [40].

Целью исследования является изучение региональных особенностей элементного состава солевых отложений питьевых вод на территории Южного Казахстана.

Материалы и методы

Нами были изучены солевые отложения питьевых вод. Пробы отбирались на территории Кызылординской области в 13 населенных пунктах и в Туркестанской области в 17 населенных пунктах в период с 2018 по 2020 гг. (рис. 1).

Отбор проб и подготовка проводилась согласно патенту № 2298212 [41]. Пробы отбирались из эмалированной посуды (чайники), в которой многократно кипятилась вода, используемая для питья. Отобранная накипь высушивалась при комнатной температуре до сухого состояния, затем измельчалась в агатовой ступке и расфасовывалась в специальные алюминиевые пакетики по 100 гр. Общее количество населенных пунктов – 30, общее количество проб – 74.

Определение элементов осуществлялось с помощью инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) в лаборатории МИНОЦ «Урановая геология» Томского политехнического университета.

В рамках исследования была проведена математическая обработка полученных данных с помощью программ Excel и STATISTICA 7, которая включала в себя расчет среднего значения, стандартной ошибки, максимума, минимума (разброс), коэффициента вари-

ации. Проведена проверка на нормальность распределения выборки полученных результатов, осуществлен

корреляционный и кластерный анализ с построением дендрограммы.

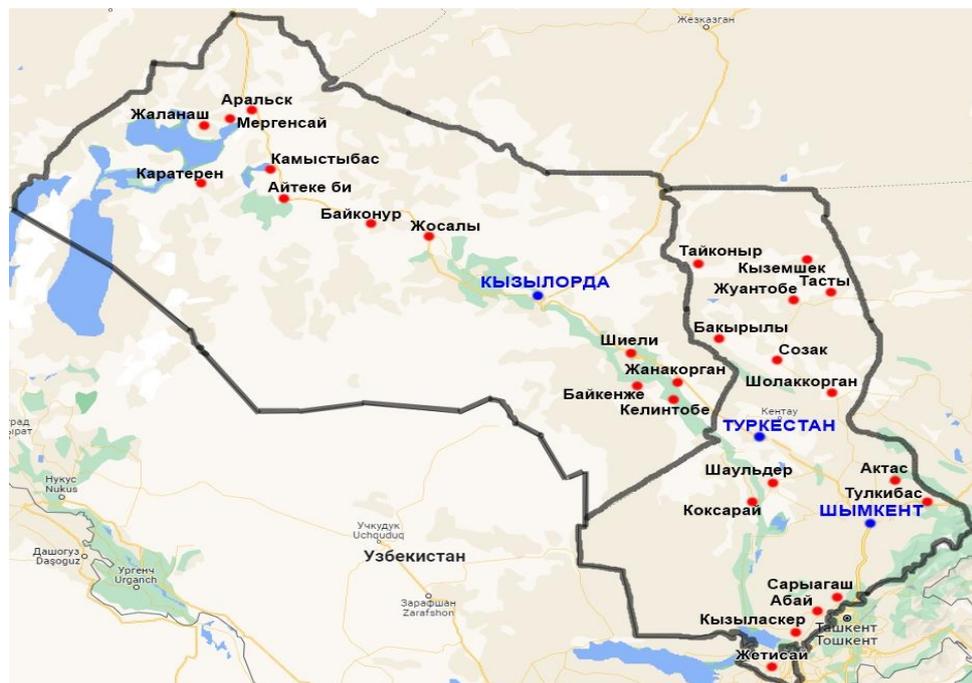


Рис. 1. Карта-схема отбора проб солевых отложений питьевых вод на территории Кызылординской и Туркестанской областей

Fig. 1. Scheme map of sampling salt deposits of drinking water in the territory of Kyzylorda and Turkestan regions

При статистической обработке данных из выборки исключались пробы с аномальными показателями, принадлежность к аномально высоким показателям рассчитывалась по формуле:

$$\tau_i = \frac{|X_i - X_{cp}|}{s}$$

Коэффициент концентрации рассчитывался как соотношение содержания определенного элемента в исследуемой пробе к фоновому содержанию:

$$K_k = \frac{c}{c_k}$$

В качестве фонового содержания использовалась накипь из воды озера Байкал, как эталон пресной воды – из природного источника [24]. Коэффициент концентрации, имеющий значение выше 1, позволил построить геохимический ассоциативный ряд в порядке убывания.

Результаты исследования и их обсуждение

На территории Южного Казахстана были измерены концентрации 28 химических элементов периодической системы, результаты статистической обработки приведены в табл. 1.

Полученные результаты показали достаточно широкий диапазон значений по всем изучаемым элементам. Такой большой разброс значений можно объяснить тем, что водоносные горизонты имеют различный химический состав, что определяется особенностями водовмещающих пород, геологией, особенностями климата и процессами антропогенного воздействия [42].

Видно, что распределение большинства химических элементов (за исключением Ca) значимо отлича-

ется от нормального. Содержание в накипи таких элементов, как натрий, кальций, железо, цинк, стронций и барий, на несколько порядков выше, чем концентрация остальных элементов, данный факт можно объяснить тем, что они являются структурообразующими, в минеральном составе накипи питьевых пресных вод (табл. 1).

Содержание цинка, стронция и бария в антропогенных карбонатах обусловлено возможностью замещения кальция в кристаллической структуре основных минералов накипи кальцита и арагонита.

Показатель коэффициента вариации для Ca минимален (31 %), что указывает на однородность выборки. Для элементов Sr и U коэффициент вариации не превышает 100 % (соответственно 66 и 79 %). Остальные химические элементы, с более высокими коэффициентами вариации (более 100 %), имеют неоднородный характер распределения, что может говорить о сочетанном воздействии факторов (антропогенные и геологические). 14 элементов, имеющих коэффициент вариации от 100–200 % (Na, Sc, As, Br, Rb, Cs, Ba, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu), и 9 элементов с коэффициентом вариации от 200–500 % (Cr, Fe, Co, Zn, La, Hf, Ta, Au, Th), и только 2 элемента имеют коэффициент выше 500 – Ag и Sb.

При сравнении с литературными данными [43–46] солевые отложения питьевых вод территории Южного Казахстана характеризуются более высокими концентрациями таких химических элементов, как Na, Cr, As, Sr, Sb, La, Th, U, и низкими содержаниями Br, Ba, Yb.

Таблица 1. Статистические параметры химических элементов в солевых отложениях питьевых вод Южного Казахстана (N=74)

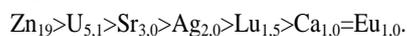
Table 1. Statistical parameters of chemical elements in salt deposits of drinking water in Southern Kazakhstan (N=74)

Элемент Element	m	σ	G	X_{med}	S	min	max	K_v
Na	506	79	259	296	683	0,02	7074	135
Ca	256434	9156	241924	260964	78769	34906	486439	30
Sc	0,2	0,03	0,07	0,08	0,26	0,004	1,7	151
Cr	13,3	3,1	3,5	3,2	27	0,14	204	206
Fe	10109	3965	700	1439	34108	0,04	244247	337
Co	26	8,3	6,7	2,8	71	0,004	424	270
Zn	1677	624	337	316	5369	3,34	45430	320
As	3,9	0,7	2,1	2,5	6,5	0,06	54,3	168
Br	2,4	0,3	1,3	1,3	2,7	0,03	12,8	113
Rb	1,2	0,18	0,55	0,5	1,6	0,05	7,8	140
Sr	4855	374	3075	4634	3217	30	15911	66
Ag	1,45	0,9	0,1	0,15	8,2	0,001	69	567
Sb	1,2	0,7	0,06	0,04	6,3	0,001	41	528
Cs	0,04	0,008	0,01	0,008	0,06	0,0001	0,3	166
Ba	157	18	83	124	160	8	800	102
La	1,2	0,3	0,35	0,4	2,7	0,01	20	220
Ce	4,3	0,58	1,48	2,04	8,0	0,2	15,4	187
Nd	3,8	0,4	1,29	3,4	3,8	0,001	25	101
Sm	0,14	0,01	0,05	0,11	0,14	0,005	0,87	101
Eu	0,02	0,003	0,007	0,008	0,02	0,0003	0,16	157
Tb	0,01	0,003	0,006	0,005	0,02	0,0001	0,17	172
Yb	0,04	0,007	0,01	0,01	0,06	0,0001	0,28	161
Lu	0,03	0,004	0,01	0,03	0,03	0,0001	0,24	103
Hf	0,12	0,03	0,03	0,02	0,29	0,0001	2,3	255
Ta	0,09	0,04	0,005	0,005	0,38	0,0001	2,8	413
Au	0,01	0,002	0,002	0,002	0,02	0,0001	0,13	245
Th	0,2	0,05	0,03	0,04	0,5	0,0003	3,4	265
U	28	2,5	17	23	22	0,11	135	79

Примечание: m – среднее, σ – стандартная ошибка среднего, G – геометрическое среднее, X_{med} – медиана, S – стандартное отклонение, min – минимум, max – максимум, K_v – коэффициент вариации.

Note: m is the mean, σ is the standard error of mean, G is geometric mean, X_{med} is the median, S is the standard deviation, min – minimum, max – maximum, K_v is the coefficient of variation.

Наличие перечисленных элементов говорит о металлогенической особенности недр территории Южного Казахстана, что также подтверждается высокими показателями коэффициента концентрации некоторых химических элементов относительно солевых образований пресной воды озера Байкал. На основе данных коэффициента концентрации был построен геохимический ассоциативный ряд концентрации элементов-индикаторов в солевых отложениях питьевых вод территории Южного Казахстана, который имеет следующий вид:



Региональной особенностью изученной территории исследования является содержание цинка, урана, стронция, серебра в солевых отложениях питьевых вод.

Геохимической особенностью накипи Южного Казахстана является низкое значение торий-уранового отношения (0,007), что подтверждает влияние урановых месторождений на формирование пресных вод, используемых в питьевом водоснабжении.

Высокий уровень содержания халькофильных и литофильных элементов характерен для глинистых пород, преобладающих на территории Южного Казахстана [47, 48].

Для выявления особенностей химического состава солевых отложений питьевых вод Южного Казахстана

нами были проанализированы природные образования – травертины (рис. 2).

В травертинах Памукале (Турция) содержание почти всех химических элементов, кроме кальция, ниже, чем в накипи питьевых вод Южного Казахстана. Отмечается небольшая разница в содержании таких элементов, как натрий, серебро, цезий, золото. В травертинах из г. Томска выделяется высокое содержание брома.

В составе накипи Южного Казахстана наблюдаются высокие концентрации редкоземельных и радиоактивных элементов, вероятно, это связано с тем, что воды изучаемой территории сосредоточены в основном в верхних водоносных горизонтах, данная особенность также отмечается в работе Л.П. Рихванова [49].

В качестве источников поступления повышенных концентраций урана могут выступать урановые месторождения с редкоземельным оруднением (Инкай, Буденновское, Хорасан, Мынкудук) в мелпалеогеновых горизонтах [50].

Для исследования взаимосвязи между химическими элементами были проанализированы коэффициенты парной корреляции. Результаты корреляционного анализа показали положительные связи между элементами Ce-La, Ce-Nd (0,8) и отрицательную связь между элементами Ba-U, Sr-Co (-0,39).

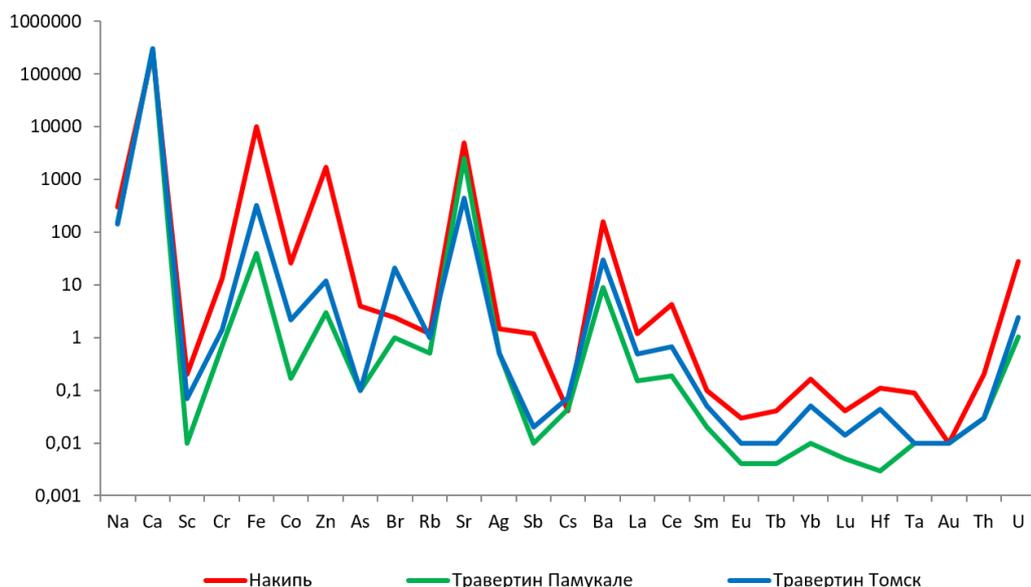


Рис. 2. Сравнительный анализ химического состава накипи территории Южного Казахстана и природных известковых образований

Fig. 2. Comparative analysis of the chemical composition of scale in the territory of Southern Kazakhstan and natural calcareous formations

Из особенностей корреляционных связей можно отметить положительные связи тория почти со всеми элементами кроме стронция; отрицательные связи стронция с большим числом химических элементов,

значимые отрицательные связи между парами Sr-Au (-0,3), Sr-Th (-0,27); положительные связи кальция с барием, церием и неодимом.

Таблица 2. Связи химических элементов в солевых отложениях питьевых вод Южного Казахстана

Table 2. Relationships of chemical elements in salt deposits of drinking waters of Southern Kazakhstan

Na	Ca	Sc	Cr	Fe	Co	Zn	As	Br	Rb	Sr	Ag	Sb	Cs	Ba	La	Ce	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu	Hf	Ta	Au	Th	U			
1	0,04	0,42	0,52	0,66	0,34	0,64	0,45	0,22	0,11	0,03	0,08	0,50	0,15	0,20	0,24	0,29	0,15	0,34	0,07	0,26	0,49	0,17	0,36	0,30	0,17	0,52	0,20	Na	
	1	0,12	0,13	0,18	0,22	0,05	0,07	0,29	0,00	0,31	0,19	0,13	0,16	0,39	0,08	0,30	0,38	0,02	0,05	0,02	0,01	0,00	0,06	0,04	0,04	0,08	0,15	Ca	
		1	0,40	0,56	0,31	0,39	0,30	0,44	0,02	0,08	0,09	0,25	0,50	0,10	0,02	0,13	0,21	0,60	0,04	0,56	0,38	0,69	0,04	0,14	0,62	0,21	Sc		
			1	0,56	0,34	0,31	0,25	0,13	0,18	0,01	0,17	0,29	0,21	0,13	0,08	0,09	0,08	0,38	0,18	0,07	0,43	0,16	0,30	0,27	0,07	0,38	0,09	Cr	
				1	0,44	0,53	0,43	0,25	0,04	0,02	0,39	0,00	0,24	0,12	0,17	0,09	0,05	0,24	0,03	0,18	0,03	0,18	0,30	0,33	0,12	0,09	0,30	0,20	Fe
					1	0,22	0,25	0,04	0,02	0,39	0,00	0,24	0,12	0,17	0,09	0,05	0,24	0,03	0,18	0,03	0,18	0,30	0,33	0,12	0,09	0,30	0,20	Co	
						1	0,44	0,43	0,23	0,16	0,20	0,55	0,29	0,26	0,34	0,40	0,24	0,36	0,08	0,30	0,52	0,05	0,41	0,36	0,17	0,57	0,19	Zn	
							1	0,31	0,19	0,00	0,23	0,34	0,25	0,19	0,07	0,18	0,10	0,28	0,01	0,07	0,38	0,10	0,26	0,24	0,00	0,43	0,23	As	
								1	0,03	0,05	0,17	0,39	0,23	0,14	0,02	0,11	0,08	0,30	0,18	0,00	0,33	0,20	0,44	0,08	0,10	0,40	0,09	Br	
									1	0,02	0,10	0,27	0,30	0,00	0,36	0,43	0,36	0,44	0,06	0,30	0,27	0,37	0,06	0,27	0,20	0,30	0,04	Rb	
										1	0,02	0,17	0,07	0,16	0,15	0,05	0,30	0,10	0,10	0,09	0,24	0,06	0,15	0,20	0,30	0,27	0,42	Sr	
											1	0,32	0,03	0,01	0,22	0,29	0,27	0,31	0,20	0,20	0,23	0,19	0,18	0,32	0,09	0,19	0,16	Ag	
												1	0,28	0,20	0,55	0,55	0,44	0,55	0,10	0,34	0,57	0,22	0,47	0,64	0,25	0,67	0,00	Sb	
													1	0,20	0,27	0,25	0,15	0,47	0,45	0,14	0,40	0,12	0,30	0,15	0,30	0,53	0,09	Cs	
														1	0,42	0,49	0,35	0,13	0,35	0,23	0,24	0,05	0,22	0,09	0,03	0,37	0,39	Ba	
															1	0,84	0,61	0,33	0,21	0,51	0,52	0,36	0,37	0,53	0,14	0,55	0,03	La	
																1	0,85	0,39	0,08	0,56	0,43	0,55	0,25	0,53	0,07	0,51	0,06	Ce	
																	1	0,38	0,11	0,54	0,18	0,61	0,11	0,47	0,01	0,34	0,24	Nd	
																		1	0,05	0,34	0,47	0,32	0,43	0,38	0,39	0,56	0,22	Sm	
																			1	0,06	0,36	0,26	0,44	0,05	0,14	0,31	0,12	Eu	
																				1	0,34	0,39	0,17	0,35	0,02	0,37	0,09	Tb	
																					1	0,12	0,67	0,40	0,28	0,74	0,08	Yb	
																						1	0,13	0,39	0,26	0,20	0,19	Lu	
																							1	0,29	0,22	0,68	0,03	Hf	
																								1	0,12	0,56	0,01	Ta	
																									1	0,30	0,15	Au	
																										1	0,15	Th	
																											1	U	

Примечание: значимые корреляционные связи выделены полужирным шрифтом – на уровне вероятности 95 %, красным шрифтом выделены отрицательные связи.

Note: significant correlations are highlighted in bold – at the 95 % probability level, negative correlations are highlighted in red

Возможно, на формирование ассоциации кальций–барий влияют месторождения баритовых руд. Так, например, в составе руд Бадамского месторождения в Туркестанской области выявлены кварц, барит, флюорит. Корреляционная связь кальция с церием и неодимом, вероятнее всего, связана с фосфатными урановыми месторождениями с повышенным содер-

жанием редких земель (месторождения Акдала, Бала-саускандык).

Наблюдаются положительные корреляционные связи между элементами группы железа (кобальт, цинк, хром, мышьяк, сурьма), что подтверждается возможным влиянием месторождения железных руд в Туркестанской области (месторождение Абаил).

Имеются положительные корреляционные связи между макро- и микроэлементами на уровне значимости 0,2–0,6 с вероятностью 95 %, что также говорит о возможном вкладе геологической составляющей изучаемого района исследования.

Для понимания характера накопления химических элементов и формируемых ими ассоциаций нами был проведен кластерный анализ (рис. 3), который пока-

зал следующие значимые ассоциации химических элементов: 1 – U, Nd, Ce, La; 2 – Ba, Co; 3 – Th, Hf, Ta, Fe, Sb, Sc; 4 – Lu, As, Zn, Cr; 5 – Sr, Ca; 6 – Tb, Eu; 7 – Sm, Br; 8 – Yb, Cs, Rb, Na.

Для выявления региональной геохимической специфики нами были рассмотрены коэффициенты концентрации медианного значения по региону (рис. 4).

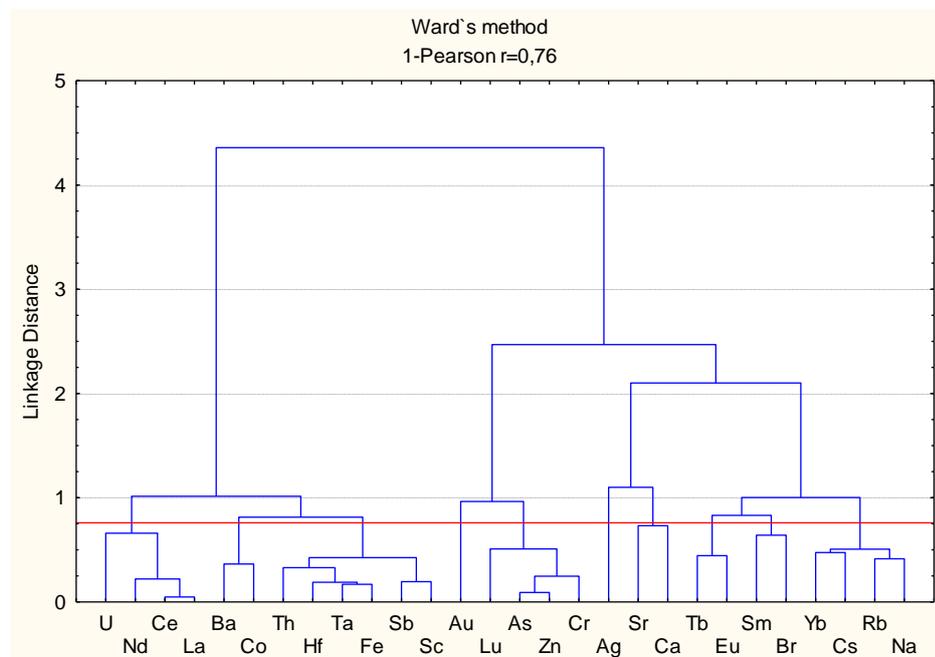


Рис. 3. Дендрограмма корреляционной матрицы геохимического спектра элементов в солевых отложениях питьевых вод территории Южного Казахстана ($r_{0,05}=0,76$)

Fig. 3. Dendrogram of the correlation matrix of the geochemical spectrum of elements in salt deposits of drinking water in the territory of Southern Kazakhstan ($r_{0,05}=0,76$)

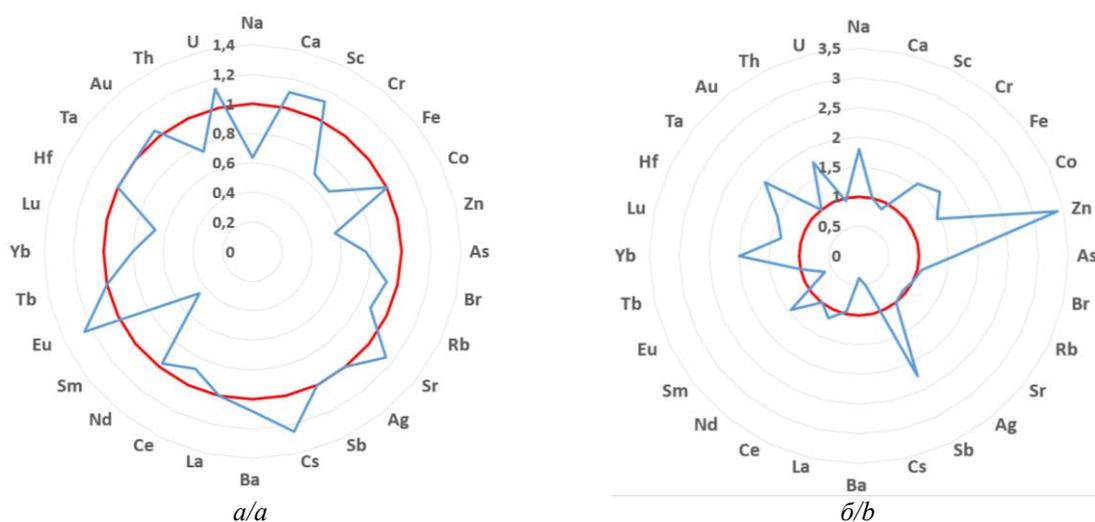


Рис. 4. Коэффициенты концентрации химических элементов в солевых отложениях питьевых вод Туркестанской (а) и Кызылординской (б) областей относительно регионального среднего

Fig. 4. Concentration coefficients of chemical elements in salt deposits of drinking waters of Turkestan (a) and Kyzylorda (b) regions relative to the regional average

Видно, что две близлежащие области значительно различаются в концентрировании химических элементов в накипи. Геохимическая специфика солевых образо-

ваний Кызылординской области отражается в концентрировании более широкого спектра химических элементов. Так, для Кызылординской области, в от-

личие от Туркестанской, характерно концентрирование таких элементов, как цинк, сурьма, иттербий, тантал, натрий, торий, железо, мышьяк, хром, самарий, гафний более значимо. В то же время можно увидеть, что выявляется общий спектр элементов, характерный для двух областей. К ним относятся такие элементы, как: кальций, золото, кобальт, серебро, сурьма, тербий, гафний, тантал.

Установлена высокая концентрация цинка, которая может поступать в водные объекты как естественным, так и техногенным путем. Цинк может попадать в природные воды в результате процессов разрушения и растворения горных пород. Так, например, в г. Туркестане, расположенном в 70 км от Ачисайского месторождения, наблюдается высокое содержание цинка в солевых отложениях – 3821 мг/кг, что выше его ПДК для питьевых вод. Значительное количество цинка попадает в водные объекты в результате техногенного воздействия: со сточными водами рудообогатительных фабрик и хвостохранилищ; применение минеральных удобрений и пестицидов впоследствии сопровождается их выносом с поверхностным и дренажным стоком и влияет на качество воды в бассейне реки Сырдарья. К примеру, в поселках, расположенных в непосредственной близости к Аральскому морю, концентрация цинка в солевых отложениях питьевых вод максимальна – 45430 мг/кг.

Специфика формирования геохимической составляющей в солевых образованиях питьевых вод хорошо демонстрируют геохимические ряды, составленные относительно регионального среднего.

Таблица 3. Геохимическая специализация солевых образований питьевых вод изученных районов относительно регионального среднего

Table 3. Geochemical specialization of salt formations of drinking water in the studied areas relative to the regional average

Регион/Region	Геохимический ряд/Geochemical series
Туркестанская область Turkestan region	$CS_{1,3}=Eu_{1,3}>U_{1,13}>Ca_{1,1}=Sc_{1,1}=$ $Sr_{1,1}>Ba_{1,08}>Au_{1,05}>Co_{1,0}=Ag_{1,0}=Sb_{1,0}=$ $La_{1,0}=Tb_{1,0}=Hf_{1,0}=Ta_{1,0}$
Кызылординская область Kyzylorda region	$Zn_{3,4}>Sb_{2,3}>Yb_{2,0}=Ta_{2,0}>Na_{1,8}=Th_{1,8}>Fe_{1,7}>$ $As_{1,6}>Cr_{1,5}=Sm_{1,5}=Hf_{1,5}>Co_{1,4}>Lu_{1,3}>Ce_{1,2}>$ $Br_{1,07}>Ca_{1,0}=Rb_{1,0}=Ag_{1,0}=Tb_{1,0}=Au_{1,0}$

Красным цветом выделены элементы, имеющие общую специфику накопления в обеих областях.

Элементная специфика накипи питьевых вод в Туркестанской и Кызылординской областях при нормировании относительно накипи из воды озера Байкал имеет схожий вид (табл. 4). Общими для двух регионов являются элементы Zn, U, Sr, Ag, Lu, Ca. Для Кызылординской области отмечается наличие в геохимическом ряду Fe и Sm. Общая геохимическая ха-

рактеристика двух регионов может объясняться наличием однотипных источников их поступления.

Таблица 4. Геохимическая специализация солевых образований питьевых вод изученных районов относительно накипи из воды озера Байкал

Table 4. Geochemical specialization of salt formations in the drinking waters of the studied areas relative to scale from the water of Lake Baikal

Регион Region	Геохимический ряд Geochemical series
Туркестанская область Turkestan region	$Zn_{11,1}>U_{6,0}>Sr_{3,2}>Ag_{2,14}>Eu_{1,3}>$ $Lu_{1,13}>Ca_{1,02}$
Кызылординская область Kyzylorda region	$Zn_{66,8}>U_{5,0}>Sr_{2,7}>Ag_{2,1}>Lu_{2,0}>$ $Ca_{1,8}>Fe_{1,7}>Sm_{1,06}$

Проведенный анализ показал, что солевые отложения питьевых вод Туркестанской и Кызылординской областей имеют высокую концентрацию цинка, урана, стронция и серебра, что обусловлено как геологической составляющей региона, так и техногенной деятельностью.

Заключение

В результате проведенного исследования получены данные по 28 химическим элементам, изученным методом ИНАА, в солевых отложениях питьевых вод территории Южного Казахстана.

В целом изучение элементного состава солевых отложений питьевых вод на территории двух областей Южного Казахстана позволили установить ориентировочные данные по содержанию химических элементов, которые могут быть применимы при последующих эколого-геохимических исследованиях. Полученные результаты свидетельствуют о неравномерном распределении элементов в солевых образованиях питьевых вод исследуемой территории. Определена региональная специфика солевых отложений питьевых вод на территории Туркестанской и Кызылординской областей.

Повышенные концентрации радиоактивных и редкоземельных элементов в накипи питьевых вод согласуются со спецификой распространения урановых месторождений, а также особенностями водовмещающих пород. Геохимическая особенность накипи отражает химический состав воды, исходя из которой можно судить о качестве воды для изучаемой территории.

Таким образом, солевые образования питьевых вод можно использовать как индикатор загрязнения исследуемой территории и для геохимического районирования.

Статья подготовлена при поддержке гранта РНФ номер 20-64-47021.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Указ Президента Республики Казахстан от 18 декабря 2012 года № 449 «О мерах по реализации Послания Главы государства народу Казахстана от 14 декабря 2012 года «Стратегия «Казахстан-2050»: новый политический курс состоявшегося государства». URL: https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=31312028 (дата обращения 09.05.2022)
2. Environmental effects of using large rivers for irrigation in the Kazakhstan – Syr Darya case study / Z. Mustafayev, J. Mosiej, K.S. Abdyvalieva, A. Kozykееva // Journal of Water and Land Development. – 2020. – V. 47. – P. 125–134.
3. Water availability and state of water resources within water-economic basins in Kazakhstan / G. Issanova, R. Jilili, J. Abuduwaili, A. Kaldybayev, G. Saparov, G. Yongxiao // Paddy and Water Environment. – 2018. – V. 16. – P. 183–191.

4. Бурлибаев М.Ж., Достай Ж.Д., Турсунов А.А. Арало-Сырдарьинский бассейн (Гидроэкологические проблемы, вопросы водоотделения). – Алматы: Дәуір, 2001. – 180 с.
5. Новикова Н.М. Эколого-географический аспект Аральского кризиса. Часть 1. Развитие Аральской проблемы, ее изучение, оценка и разработка мероприятий // Экосистемы: Экология и динамика. – 2019. – Т. 3. – № 1. – С. 5–66.
6. The fluctuating Aral Sea: a multidisciplinary-based history of the last two thousand years / S.K. Krivonogov, G.S. Burr, Y.V. Kuzmin, S.A. Gusskov, R.K. Kurmanbaev, T.I. Kenshinbay, D.A. Voyakin // *Gondwana Research*. – 2014. – V. 26. – P. 284–300.
7. Гидрогеохимические аспекты формирования природно-техногенной системы в низовьях реки Сырдарья в условиях антропогенной деятельности / Ж.С. Мустафаев, А.Т. Козыкеева Ж.Е., Ескермесов, Н.М. Кусмуханбетов // *Гидрометеорология и экология*. – 2014. – № 1. – С. 103–115.
8. Смоляр В.А., Сапарғалиев Д.С., Ким Д.В. Комплексное и рациональное использование поверхностных и подземных вод – основа водной безопасности Республики Казахстан // *Геология и охрана недр*. – 2020. – Т. 74. – № 1. – С. 59–71
9. Гидрология СССР. Т. XXXVI. Южный Казахстан. – М.: Изд-во «Недра», 1970. – 473 с.
10. Data on nitrate-nitrite pollution in the groundwater resources a Sonqor plain in Iran / D. Jalili, M. RadFard, H. Soleimani, S. Nabavi, H. Akbari, A. Kavosi, A. Abasnia, A. Adibzadeh // *Data in Brief*. – 2018. – V. 20. – P. 394–401.
11. Heavy metal (loid) s in the groundwater of Shabestar area (NW Iran): source identification and health risk assessment / R. Barzegar, A.A. Moghaddam, S. Soltani, E. Fijani, E. Tziritis, N. Kazemian // *Exposure and Health*. – 2019. – V. 11. – P. 251–265.
12. Distributions and origins of nitrate, nitrite, and ammonium in various aquifers in an urbanized coastal area, south China / M. Zhang, G. Huang, C. Liu, Y. Zhang, Z. Chen, J. Wang // *Journal of Hydrology*. – 2020. – V. 582. – 124528.
13. Pollution with trace elements and rare-earth metals in the lower course of Syr Darya River and Small Aral Sea, Kazakhstan / P. Rzymiski, P. Klimaszuk, P. Niedzielski, W. Marszelewski, D. Borowiak, K. Nowinski, A. Baikenzheyeva, R. Kurmanbayev, N. Aladin // *Chemosphere*. – 2019. – V. 234. – P. 81–88.
14. Status and management of arsenic pollution in groundwater: a comprehensive appraisal of recent global scenario, human health impacts, sustainable field-scale treatment technologies / M.K. Yadav, D. Saidulu, A.K. Gupta, P.S. Ghosal, A. Mukherjee // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2021. – V. 9. – 105203.
15. Efficacy of agricultural waste derived biochar for arsenic removal: tackling water quality in the Indo-Gangetic plain / S. Mukherjee, A.K. Thakur, R. Goswami, P. Mazumder, K. Taki, M. Vithanage, M. Kumar // *Journal of Environmental Management*. – 2021. – V. 281. – 111814.
16. Assessment of arsenic status and distribution in Usangu agro-ecosystem-Tanzania / M. Mng'ong'o, S. Comber, L.K. Munishi, W. Blake, P.A. Ndakidemi, T.H. Hutchinson // *Journal of Environmental Management*. – 2021. – V. 294. – 113012.
17. Tokatli C., Varol M. Variations, health risks, pollution status and possible sources of dissolved toxic metal(loid)s in stagnant water bodies located in an intensive agricultural region of Turkey // *Environmental Research*. – 2021. – V. 201. – 111571.
18. Mobilization and health risk assessment of fertilizer induced uranium in coastal groundwater / M. Mathivanan, C. Sabarathinam, M.P. Viswanathan, V. Senapathi, D. Nadesan, G.G. Indrani, G. Malaimedu, S.S. Kumar // *Environmental Research*. – 2022. – V. 203. – 111791.
19. Winde F., Erasmus E., Geipel G. Uranium contaminated drinking water linked to leukaemia – revisiting a case study from South Africa taking alternative exposure pathways into account // *Science of the Total Environment*. – 2017. – V. 574. – P. 400–421.
20. Duggal V., Sharma S., Singh A. Toxicological risk and age-dependent radiation dose assessment of uranium in drinking water in southwest-central districts of Haryana State, India // *Groundwater for Sustainable Development*. – 2021. – V. 13. – 100577.
21. Индикаторные показатели состояния экосистем в элементном составе жителей районов Северного Казахстана / Г.Е. Байкенова, Н.В. Барановская, А.А. Какабаев, Р.И. Берсимбаев, Н.П. Корогод, Д.В. Наркович, В.В. Куровская // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 7. – С. 148–158.
22. Comparison of strontium isotope ratios in Mexican human hair and tap water as provenance indicators / S.T.M. Ammer, L.M. Kootker, E.J. Bartelink, V.E. Anderson, E. Cunha, G.R. Davies // *Forensic Science International*. – 2020. – V. 314. – 110422.
23. Язиков Е.Г., Барановская Н.В., Рихванов Л.П. Использование солевых образований (накипи) для целей геохимического районирования территорий // *Современные проблемы геохимии, геологии и поисков месторождений полезных ископаемых: материалы международной конференции, посвященной 100-летию академика К.Л. Лукашева*. – Минск: ИЦ БГУ, 2007. – С. 252–254.
24. Соктоев Б.Р. Геохимия карбонатной составляющей природных пресных вод и её индикаторное значение в эколого-геохимических и прогнозно-металлогенетических исследованиях (на примере Байкальского региона): автореф. дис. канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2015. – 22 с.
25. Геохимическая специализация осадков (накипей) водных источников на примере двух регионов Сибири / А.Э. Тапхаева, Т.Т. Тайсаев, Л.П. Рихванов, Е.Г. Язиков, Н.В. Барановская // *Сибирский экологический журнал*. – 2010. – Т. 17. – № 4. – С. 685–696.
26. Соктоев Б.Р., Рихванов Л.П. Карбонатообразование в бытовых условиях: особенности минералогии и геохимии // *Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий, рациональное природопользование. Современное минералообразование*. – Чита: Забайкальский государственный университет, 2018. – С. 237–240.
27. Соктоев Б.Р., Фархутдинов И.М., Рихванов Л.П. Антропогенные карбонаты как индикатор техногенного воздействия на гидросферу (на примере хвостохранилищ горнодобывающих предприятий) // *Сборник материалов Девятой Российской молодежной научно-практической Школы с международным участием*. – М., 2019. – С. 372–374.
28. Эколого-геохимические особенности природных сред Томского района и заболеваемость населения / Л.П. Рихванов, Е.Г. Язиков, Ю.И. Сухих, Н.В. Барановская, В.Т. Волков, Н.Н. Волкова, В.В. Архангельский, Т.А. Архангельская, О.А. Денисова, А.Ю. Шатилов, Е.П. Янкович / под ред. А.Г. Бакирова. – Томск: Изд-во «Курсив», 2006. – 216 с.
29. Соктоев Б.Р., Рихванов Л.П. Элементный состав солевых отложений природных пресных вод: возможности применения в эколого-геохимических исследованиях // *Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий*. – 2016. – № 11. – С. 247–249.
30. Earth's chondritic Th/U: negligible fractionation during accretion, core formation, and crust-mantle differentiation / S.A. Wipperfurth, M. Guo, O. Sramek, W.F. McDonough // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2018. – V. 498. – P. 196–202.
31. Influences of geological factors on the distribution of uranium in drinking water limescale in the junction zone of the East European Platform and the Southern Urals / I. Farkhutdinov, B. Soktoev, A. Zlobina, A. Farkhutdinov, C. Zhang, E. Chesalova, L. Belan, I. Volfson // *Chemosphere*. – 2021. – V. 282. – 131106
32. Geochemistry of radioactive elements (U, Th) in coal and peat of northern Asia (Siberia, Russian Far East, Kazakhstan, and Mongolia) / S.I. Arbuzov, A.V. Volostnov, L.P. Rikhvanov, A.M. Mezhibor, S.S. Ilenok // *International Journal of Coal Geology*. – 2011. – V. 86. – P. 318–328.
33. Редкоземельные и радиоактивные (Th, U) элементы в компонентах природной среды на территории Томской области / Н.В. Барановская, Е.В. Агеева, Б.Р. Соктоев, Д.В. Наркович, О.А. Денисова, Т.В. Матковская // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 2. – С. 17–28.
34. Влияние геологических факторов на распределение урана и тория в солевых отложениях питьевых вод (Республика Башкортостан) / И.М. Фархутдинов, Б.Р. Соктоев, Л.П. Рихванов, А.М. Фархутдинов, А.Н. Злобина, Р.А. Исмагилова, В.Н. Никонов, Л.Н. Белан // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 4. – С. 16–27.

35. Spatio-temporal variations of Uranium in groundwater: implication to the environment and human health / N. Devaraj, B. Panda, S. Chidambaram, M.V. Prasanna, D.K. Singh, A.L. Ramanathan, S.K. Sahoo // *Science of The Total Environment*. – 2021. – V. 775. – 145787.
36. Uranium and thorium leachability in contaminated stream sediments from a uranium minesite / J. Wang, J. Liu, H. Li, Y. Chen, T. Xiao, G. Song, D. Chen, C. Wang // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2017. – V. 176. – P. 85–90.
37. Барановская Н.В., Игнатова Т.Н., Рихванов Л.П. Уран и торий в органах и тканях человека // *Вестник Томского государственного университета*. – 2010. – № 339. – С. 182–188.
38. A systematic study of uranium retention in human organs and quantification of radiological and chemical doses from uranium ingestion / P. Bangotra, M. Sharma, R. Mehra, R. Jakhu, A. Singh, A.S. Gautam, S. Gautam // *Environmental Technology and Innovation*. – 2021. – V. 21. – 101360.
39. Distribution of radionuclides in natural waters of Northern Kazakhstan and assessment of waterborne doses irradiation of population / N.S. Salikova, Z.O. Tleuova, A.S. Kurmanbayeva, R.K. Khussainova, A.A. Kakabayev // *Periodico Tche Quimica*. – 2020. – V.17. – P. 1016–1037.
40. Levels of uranium and thorium in maternal scalp hair and risk of orofacial clefts in offspring / Y. Wei, L. Jin, Z. Li, J. Liu, L. Wang, X. Pi, S. Yin, C. Wang, A. Ren // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2019. – V. 204. – P. 125–131.
41. Способ определения участков загрязнения ураном окружающей среды: пат. 2298212 Рос. Федерация, № 2005120840; заявл. 04.07.05; опубл. 27.04.07. Бюл. № 12. – 6 с.
42. Леонова А.В. Основы гидрогеологии и инженерной геологии. – Томск: ТПУ, 2013. – 148 с.
43. Монголина Т.А. Геохимические особенности солевых отложений (накипи) питьевых вод как индикатора природно-техногенного состояния территории: автореф. дис. ...канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2011. – 22 с.
44. Геохимическая характеристика солевых отложений питьевых вод Байкальского региона / Б.Р. Соктоев, Л.П. Рихванов, Т.Т. Тайсаев, Н.В. Барановская // *Известия Томского политехнического университета*. – 2014. – Т. 324. – № 1. – С. 209–223.
45. Арынова Ш.Ж., Рихванов Л.П. Эколого-геохимическая оценка территории Павлодарской области (Республика Казахстан) по данным изучения элементного состава солевых отложений питьевых вод // *Вестник Забайкальского государственного университета*. – 2015. – № 12. – С. 4–10.
46. Робертус Ю.В., Рихванов Л.П., Соктоев Б.Р. Особенности химического состава солевых отложений подземных питьевых вод Республики Алтай // *Известия Томского политехнического университета*. – 2014. – Т. 324. – № 1. – С. 190–195.
47. Методические рекомендации по геохимической оценке загрязнения территории городов химическими элементами / Б.А. Ревич, Ю.Е. Саев, Р.С. Смирнова, Е.П. Сорокина. – М.: ИМГРЭ, 1982. – 112 с.
48. Пономаренко В.В. Фациальные условия накопления отложений медистых песчаников Чу-Сарысуйской впадины (Южный Казахстан) // *Вестник Воронежского государственного университета*. – 2015. – № 3. – С. 22–26.
49. Рихванов Л.П. Общие и региональные проблемы радиэкологии. – Томск: ТПУ, 1997. – 384 с.
50. Черняков В.М. Современное состояние сырьевой базы природного урана в Казахстане и пути ее совершенствования // *Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Материалы IV международной конференции*. – Томск: ТПУ, 2013. – С. 554–559.

Поступила 22.06.2022 г.

Информация об авторах

Шарипова Б.У., магистр экологии, преподаватель кафедры биологии и методики преподавания Кокшетауского университета им. Ш. Уалиханова.

Какабаев А.А., кандидат биологических наук, ассоциированный профессор кафедры горного дела, строительства и экологии, советник ректора по международной интеграции Кокшетауского университета им. Ш. Уалиханова.

Барановская Н.В., доктор биологических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Арынова Ш.Ж., доктор PhD, ассоциированный профессор, НАО «Торайгыров университет».

Корогод Н.П., кандидат биологических наук, доцент кафедры общей биологии Павлодарского педагогического университета.

UDC 574.2:550.47

GEOCHEMICAL FEATURES OF SALT FORMATIONS OF DRINKING WATER IN SOUTHERN KAZAKHSTAN

Botagoz U. Sharipova¹,
oralovna82@mail.ru

Anuarbek A. Kakabayev¹,
anuarka@mail.ru

Natalia V. Baranovskaya²,
nata@tpu.ru

Shynar Zh. Arynova³,
shinar_uzh@mail.ru

Natalya P. Korogod⁴,
natalya_korogod@mail.ru

¹ Sh. Ualikhanov Kokshetau University,
76, Abay street, Kokshetau, 020000, Republic of Kazakhstan.

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

³ Toraighyrov University,
64, Lomov street, Pavlodar, 140000, Republic of Kazakhstan.

⁴ Pavlodar Pedagogical University,
60, Mira street, Pavlodar, 140002, Republic of Kazakhstan.

The relevance of the work. Due to the unfavorable ecological situation in the territory of Southern Kazakhstan, there is a need to obtain data on natural and natural-anthropogenic geochemical processes occurring in the conditions of urbanization and industrial development, including uranium mining. To assess the changes in the ecological and geochemical state of the territory, the elemental composition of salt formations of drinking water was used, since this component of the ecosystem proved itself to be a reliable indicator of environmental pollution.

The aim of the research was to study the features of the elemental composition of salt deposits of drinking water in the territory of Southern Kazakhstan.

Methods: instrumental neutron activation analysis.

Results. Chemical elements in salt formations of fresh drinking waters of Southern Kazakhstan (Kyzylorda and Turkestan regions) were analyzed. The authors identified the leading group of elements in the scale of drinking waters of the studied area – Na, Ca, Fe (structure-forming), Zn, Sr, Ba (isomorphic substitution in the structure of calcium carbonate). An inhomogeneous distribution of almost all the studied elements is observed, with the exception of Ca. The regional specificity of Southern Kazakhstan is the presence of Zn, U, Sr, Ag in anthropogenic carbonates. The increased content of U and TR is associated with the distribution of bed-infiltration types of uranium deposits with rare-earth mineralization in the Cretaceous and Paleogene horizons of the Shu-Sarysu and Syrdarya provinces. The authors identified specific elements in the salt formations of drinking water for the Turkestan region (Cs, Eu, U, Ca, Sc, Sr, Ba, Au, Co, Ag, Sb, La, Tb, Hf, Ta) and the Kyzylorda region (Zn, Sb, Yb, Ta, Na, Th, Fe, As, Cr, Sm, Hf, Co, Lu, Ce, Br, Ca, Rb, Ag, Tb, Au).

Key words:

Chemical elements, salt deposits, technogenesis, Southern Kazakhstan, drinking water, uranium deposits.

The research was supported by the grant of the RSF no. 20-64-47021.

REFERENCES

1. Ukaz Prezidenta Respubliki Kazakhstan ot 18 dekabrya 2012 goda № 449 «O merakh po realizatsii Poslaniya Glavy gosudarstva narodu Kazakhstana ot 14 dekabrya 2012 goda «Startegiya «Kazakhstan-2050»: novy politichesky kurs sostoyavshegosya gosudarstva» [Decree of the President of the Republic of Kazakhstan dated December 18, 2012 No. 449 «On measures to implement the Address of the Head of State to the people of Kazakhstan dated December 14, 2012 «Strategy «Kazakhstan-2050»: a new political course of the established state»]. Available at: https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=31312028 (accessed 9 May 2022).
2. Mustafayev Z., Mosiej J., Abdyvalieva K.S., Kozykeeva A. Environmental effects of using large rivers for irrigation in the Kazakhstan – Syr Darya case study. *Journal of Water and Land Development*, 2020, vol. 47, pp. 125–134.
3. Issanova G., Jilili R., Abuduwaili J., Kaldybayev A., Saparov G., Yongxiao G. Water availability and state of water resources within water-economic basins in Kazakhstan. *Paddy and Water Environment*, 2018, vol. 16, pp. 183–191.
4. Burlibaev M.Zh., Dostay Zh.D., Tursunov A.A. *Aralo-Syrdarinskiy basseyn (Gidroekologicheskie problemy, voprosy vodotdeleniya)* [Aral-Syrdarya basin (hydroecological problems, water separation issues)]. Almaty, Daur Publ, 2001. 180 p.
5. Novikova N.M. Ecological and geographical aspects of the Aral Sea crisis. P. 1. The development of the Aral Sea problem, its research, evaluation and development activities. *Ecosystems: Ecology and Dynamics*, 2019, vol. 3, no. 1, pp. 5–66. In Rus.

6. Krivonogov S.K., Burr G.S., Kuzmin Y.V., Gusskov S.A., Kurmanbaev R.K., Kenshinbay T.I., Voyakin D.A. The fluctuating Aral Sea: a multidisciplinary-based history of the last two thousand years. *Gondwana Research*, 2014, vol. 26, pp. 284–300.
7. Mustafaev J.S., Kozykееva A.T., Eskermesov Zh.E., Kusmukhanbetov N.M. Gidrogeokhimicheskie aspekty formirovaniya prirodno tekhnogennoy sistemy v nizovyakh reki Syrdari v usloviyakh antropogennoy deyatelnosti [Hydrogeochemical aspects of the formation of the natural-technogenic system in the lower reaches of the Syrdarya River under the conditions of anthropogenic activity]. *Gidrometeorologiya i ekologiya*, 2014, no. 1, pp. 103–115.
8. Smolyar V.A., Sapargaliyev D.S., Kim D.V. Comprehensive and rational utilization of surface water and groundwater – the basis of water security of the Republic of Kazakhstan. *Geology and bowels of the Earth*, 2020, vol. 74, no.1, pp. 59–71. In Rus.
9. *Gidrologiya SSSR. T. XXXVI. Yuzhny Kazakhstan* [Hydrology of the USSR. V. XXXVI. South Kazakhstan]. Moscow, Nedra Publ., 1970. 473 p.
10. Jalili D., RadFard M., Soleimani H., Nabavi S., Akbari H., Kavosi A., Abasnia A., Adibzadeh A. Data on Nitrate-Nitrite pollution in the groundwater resources a Sonqor plain in Iran. *Data in Brief*, 2018, vol. 20, pp. 394–401.
11. Barzegar R., Moghaddam A.A., Soltani S., Fijani E., Tziritis E., Kazemian N. Heavy metal (loid) s in the groundwater of Shabestar area (NW Iran): source identification and health risk assessment. *Exposure and Health*, 2019, vol. 11, pp. 251–265.
12. Zhang M., Huang G., Liu C., Zhang Y., Chen Z., Wang J. Distributions and origins of nitrate, nitrite, and ammonium in various aquifers in an urbanized coastal area, south China. *Journal of Hydrology*, 2020, vol. 582, 124528.
13. Rzymyski P., Klimaszuk P., Niedzielski P., Marszelewski W., Borowiak D., Nowinski K., Baikenzheyeva A., Kurmanbayev R., Aladin N. Pollution with trace elements and rare-earth metals in the lower course of Syr Darya River and Small Aral Sea, Kazakhstan. *Chemosphere*, 2019, vol. 234, pp. 81–88.
14. Yadav M.K., Saidulu D., Gupta A.K., Ghosal P.S., Mukherjee A. Status and management of arsenic pollution in groundwater: a comprehensive appraisal of recent global scenario, human health impacts, sustainable field-scale treatment technologies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, vol. 9, 105203.
15. Mukherjee S., Thakur A. K., Goswami R., Mazumder P., Taki K., Vithanage M., Kumar M. Efficacy of agricultural waste derived biochar for arsenic removal: tackling water quality in the Indo-Gangetic plain. *Journal of Environmental Management*, 2021, vol. 281, 111814.
16. Mng'ong'o M., Comber S., Munishi L.K., Blake W., Ndakidemba P.A., Hutchinson T.H. Assessment of arsenic status and distribution in Usangu agro-ecosystem-Tanzania. *Journal of Environmental Management*, 2021, vol. 294, 113012.
17. Tokatli C., Varol M. Variations, health risks, pollution status and possible sources of dissolved toxic metal(loid)s in stagnant water bodies located in an intensive agricultural region of Turkey. *Environmental Research*, 2021, vol. 201, 111571.
18. Mathivanan M., Sabarathinam Ch., Viswanathan P. M., Senapathi V., Nadesan D., Indrani G. G., Malaimegu G., Kumar S.S. Mobilization and health risk assessment of fertilizer induced uranium in coastal groundwater. *Environmental Research*, 2022, vol. 203, 111791.
19. Winde F., Erasmus E., Geipel G. Uranium contaminated drinking water linked to leukaemia – revisiting a case study from South Africa taking alternative exposure pathways into account. *Science of the Total Environment*, 2007, vol. 574, pp. 400–421.
20. Duggal V., Sharma S., Singh A. Toxicological risk and age-dependent radiation dose assessment of uranium in drinking water in southwest-central districts of Haryana State, India. *Groundwater for Sustainable Development*, 2021, vol. 13, 100577.
21. Baikenova G.E., Baranovskaya N.V., Kakabayev A.A., Bersimbaev R.I., Korogod N.P., Narkovich D.V., Kurovskaya V.V. Indicators of the state of the ecosystems based on the hair compositions of the Northern Kazakhstan residents. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 331, no. 2, pp. 148–158. In Rus.
22. Ammer S.T.M., Kootker L.M., Bartelink E.J., Anderson B.E., Cunha E., Davies G.R. Comparison of strontium isotope ratios in Mexican human hair and tap water as provenance indicators. *Forensic Science International*, 2020, vol. 314, 110422.
23. Yazikov E.G., Baranovskaya N.V., Rikhvanov L.P. Ispolzovanie solevykh obrazovaniy (nakipi) dlya tseley geokhimicheskogo rayonirovaniya territoriy [Use of salt formations (scale) for the purposes of geochemical zoning of territories]. *Sovremennyye problemy geokhimii, geologii i poiskov mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh. Materialy mezhdunarodnoy konferentsii, posvyashchennoy 100-letiyu akademika K.L. Lukasheva* [Modern problems of geochemistry, geology and prospecting for mineral deposits materials of the international. Conference dedicated to the 100th anniversary of academician K.L. Lukashev]. Minsk, BSU Publ., 2007. pp. 252–254.
24. Soktoev B.R. *Geokhimiya karbonatnoy sostavlyayushchey prirodnykh presnykh vod i ee indikatornoye znachenie v ekologo-geokhimicheskikh i prognozno-metallogenicheskikh issledovaniyakh (na primere Baykalskogo regiona)*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Geochemistry of the carbonate component of natural fresh waters and its indicator value in ecological-geochemical and predictive-metallogenetic studies (on the example of the Baikal region)]. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2015. 22 p.
25. Tapkhaeva A.E., Taisaev T.T., Rikhvanov L.P., Yazikov E.G., Baranovskaya N.V. Geochemical Specialization of Sediments (Scums) of Water Sources by the Example of Two Locales of Siberia. *Siberian Journal of Ecology*, 2010, vol. 17, no. 4, pp. 685–696. In Rus.
26. Soktoev B.R., Rikhvanov L.P. Karbonatobrazovanie v bytovykh usloviyakh: osobennosti mineralogii i geokhimii [Carbonate formation in household conditions: mineralogy and geochemistry features]. *Mineralogiya i geokhimiya landshafta gornorudnykh territoriy, ratsionalnoye prirodoopolzovanie. Sovremennoye mineraloobrazovanie* [Mineralogy and geochemistry of the landscape of mining areas, rational nature management. Modern mineral formation]. Chita, Transbaikalian State University Publ., 2018. pp. 237–240.
27. Soktoev B.R., Farkhutdinov I.M., Rikhvanov L.P. Antropogennyye karbonaty kak indikator tekhnogennoy vozdeystviya na gidrosferu (na primere khvostokhranilishch gomodobyvayushchikh predpriyatiy) [Anthropogenic carbonates as an indicator of anthropogenic impact on the hydrosphere (on the example of tailing dumps of mining enterprises)]. *Sbornik materialov Devyatyoy Rossiyskoy molodezhnoy nauchno-prakticheskoy Shkoly s mezhdunarodnym uchastiyem* [Collection of materials of the Ninth Russian Youth Scientific and Practical School with international participation.]. Moscow, 2019. pp. 372–374.
28. Rikhvanov L.P., Yazikov E.G., Sukhikh Yu.I., Baranovskaya N.V., Volkov V.T., Volkova N.N., Arkhangel'skiy V.V., Arkhange'skaya T.A., Denisova O.A., Shatilov A.Yu., Yankovich E.P. *Ekologo-geokhimicheskie osobennosti prirodnykh sred Tomskogo rayona i zabolevaemost naseleniya* [Ecological and geochemical features of the natural environment of the Tomsk region and the incidence of the population]. Ed. by A.G. Bakirov. Tomsk, Kursiv Publ., 2006. 216 p.
29. Soktoev B.R., Rikhvanov L.P. Elementnyy sostav solevykh otlozheniy prirodnykh presnykh vod: vozmozhnosti primeneniya v ekologo-geokhimicheskikh issledovaniyakh [Elemental composition of salt deposits of natural fresh waters: possibilities of application in ecological and geochemical research]. *Geologiya, poleznye iskopayemye i problemy geoekologii Bashkortostana, Urala i sopredelnykh territoriy*, 2016, no. 11, pp. 247–249.
30. Wipperfurth S.A., Guo M., Sramek O., McDonough W.F. Earth's chondritic Th/U: Negligible fractionation during accretion, core formation, and crust–mantle differentiation. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, vol. 498, pp. 196–202.
31. Farkhutdinov I., Soktoev B., Zlobina A., Farkhutdinov A., Zhang C., Chesalova E., Belan L., Volfson I. Influences of geological factors on the distribution of uranium in drinking water limescale in the junction zone of the East European Platform and the Southern Urals. *Chemosphere*, 2021, vol. 282, 131106.
32. Arbuзов S.I., Volostnov A.V., Rikhvanov L.P., Mezhibor A.M., Ilenok S.S. Geochemistry of radioactive elements (U, Th) in coal and peat of northern Asia (Siberia, Russian Far East, Kazakhstan, and Mongolia). *International Journal of Coal Geology*, 2011, vol. 86, pp. 318–328.

33. Baranovskaya N.V., Ageeva E.V., Soktoev B.R., Narkovich D.V., Denisova O.A., Matkovskaya T.V. Rare Earth and radioactive (Th, U) elements in the components of the environment on the territory of Tomsk region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 2, pp. 17–28. In Rus.
34. Farkhutdinov I.M., Soktoev B.R., Rikhvanov L.P., Farkhutdinov A.M., Zlobina A.N., Ismagilova R.A., Nikonov V.N., Belan L.N. Influence of geological factors on uranium and thorium distribution in drinking water salt deposits (Republic of Bashkortostan). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 4, pp. 16–27. In Rus.
35. Devaraj N., Panda B., Chidambaram S., Prasanna M.V., Singh D.K., Ramanathan A. L., Sahoo S.K. Spatio-temporal variations of Uranium in groundwater: Implication to the environment and human health. *Science of The Total Environment*, 2021, vol. 775, 145787.
36. Wang J., Liu J., Li H., Chen Y., Xiao T., Song G., Chen D., Wang C. Uranium and thorium leachability in contaminated stream sediments from a uranium minesite. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, vol. 176, pp. 85–90.
37. Baranovskaya N.V., Ignatova T.N., Rikhvanov L.P. Uran i toriy v organakh i tkanyakh cheloveka [Uranium and thorium in human organs and tissues]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2010, no. 339, pp. 182–188.
38. Bangotra P., Sharma M., Mehrab R., Jakhu R., Singh A., Gautam A.S., Gautam S. A systematic study of uranium retention in human organs and quantification of radiological and chemical doses from uranium ingestion. *Environmental Technology and Innovation*, 2021, vol. 21, 101360.
39. Salikova N.S., Tleuova Z.O., Kurmanbayeva A.S., Khussainova R.K., Kakabayev A.A. Distribution of radionuclides in natural waters of Northern Kazakhstan and assessment of waterborne doses irradiation of population. *Periodico Tche Quimica*, 2020, vol. 17, pp. 1016–1037.
40. Wei Y., Jin L., Li Z., Liu J., Wang L., Pia X., Yin S., Wang C., Ren A. Levels of uranium and thorium in maternal scalp hair and risk of orofacial clefts in offspring. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2019, vol. 204, pp. 125–131.
41. Rikhvanov L.P., Yazikov E.G., Baranovskaya N.V., Yankovich E.P. *Sposob opredeleniya uchastkov zagryazneniya uranom okruzhayushhey sredy* [The way to locate contaminated by uranium areas]. Patent RF, no. 2298212, 2007.
42. Leonova A.V. *Osnovy gidrogeologii i inzhenernoy geologii* [Fundamentals of hydrogeology and engineering geology]. Tomsk, TPU Publ., 2013. 148 p.
43. Mongolina T.A. *Geokhimicheskie osobennosti soleyvykh otlozheniy (naki) pityevykh vod kak indikatora prirodno-tekhnogenogo sostoyaniya territorii*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Geochemical features of salt deposits (scale) of drinking water as an indicator of the natural and technogenic state of the territory. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2011. 22 p.
44. Soktoev B.R., Rikhvanov L.P., Taysaev T.T., Baranovskaya N.V. Geochemical characteristics of drinking water salt deposits of Baikal region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 1, pp. 209–223. In Rus.
45. Arynova Sh., Rikhvanov L.P. Ecological and geochemical evaluation of the territory of Pavlodar region (the Republic of Kazakhstan) based on chemical composition analysis of salt deposits in drinking water. *Transbaikalian State University Journal*, 2015, vol. 12, no. 127, pp. 4–10. In Rus.
46. Robertus Yu.V., Rikhvanov L.P., Soktoev B.R. Features of chemical composition of salt deposits in underground drinking water of Altai Republic. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 1, pp. 190–195. In Rus.
47. Revich B.A., Saet Yu.E., Smirnova R.S., Sorokina E.P. *Metodicheskie rekomendatsii po geokhimicheskoy otsenke zagryazneniya territorii gorodov khimicheskimi elementami* [Guidelines for the geochemical assessment of urban pollution by chemical elements]. Moscow, IMGRE Publ., 1982. 112 p.
48. Ponomarenko V. V. Facies conditions buildup copper sandstones Chu Sarysu depression (South Kazakhstan). *Proceedings of Voronezh State University*, 2015, vol. 3, pp. 22–26. In Rus.
49. Rikhvanov L.P. *Obshchie i regionalnye problemy radioekologii* [General and regional problems of radioecology]. Tomsk, TPU Publ., 1997. 384 p.
50. Chernyakov V.M. *Sovremennoe sostoyanie syrevoy bazy prirodnogo urana v Kazakhstane i puti ee usovershenstvovaniya* [Current status of the resource base of natural uranium in Kazakhstan and ways of its improvement]. *Materialy IV mezhdunarodnoy konferentsii. Radioaktivnost i radioaktivnye elementy v srede obitaniya cheloveka* [Proceedings of IV international conference. Radioactivity and radioactive elements in environment]. Tomsk, TPU Publ., 2013. pp. 554–559.

Received: 22 June 2022.

Information about the authors

Botagoz U. Sharipova, master of Ecology, lecturer, Sh. Ualikhanov Kokshetau University.
Anuarbek A. Kakabayev, Cand. Sc., associate professor, Sh. Ualikhanov Kokshetau University.
Natalia V. Baranovskaya, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.
Shynar Zh. Arynova, PhD, associate professor, Toraighyrov University.
Natalya P. Korogod, Cand. Sc., associate professor, Pavlodar Pedagogical University.

УДК 66.067.57:66.012.37

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗДЕЛЕНИЯ ЖИДКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ УЛУЧШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В РОТОРАХ ФИЛЬТРУЮЩИХ ЦЕНТРИФУГ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Хабибуллин Марат Яхиевич,
m-hab@mail.ru

Институт нефти и газа Уфимского государственного нефтяного технического университета (филиал в г. Октябрьский),
Россия, 452607, г. Октябрьский, ул. Девонская, 54а.

Актуальность исследования обусловлены необходимостью обеспечить более эффективную экономичность, повышения надежности и долговечности, эффективности и производительности работы центрифуг. Требуется получение и изучение их энергетических характеристик, особенно связанных с затратами энергии на преодоление различных вредных сопротивлений. Получение энергетических характеристик центрифуг также необходимо для создания новых приводов, так как применяемая в настоящее время в приводах промышленных центрифуг ременная передача имеет существенные недостатки, отдельные из которых недопустимы.

Цель: на основании результатов экспериментальных исследований предложить новую математическую модель движения разделяемой системы в роторах фильтрующих центрифуг с центробежной и шнековой выгрузкой осадка при тонкослойном фильтровании суспензий со среднезернистой твердой фазой и объемной концентрацией меньше 60 %.

Объекты. Исследуются процессы в роторах фильтрующих центрифуг с центробежной и шнековой выгрузкой осадка при тонкослойном фильтровании суспензий со среднезернистой твердой фазой. Экспериментально в роторах рассматриваемых центрифуг удастся различить две зоны – зону напорного фильтрования и зону центробежного отжима. При нарушении режима фильтрования суспензия из зоны напорного фильтрования может попадать в зону центробежного отжима. В местах прорывов суспензии, как и в зоне напорного фильтрования, слой осадка смывается.

Методы. Согласно разработанной математической модели, ротор по образующей разделен на две зоны. В зоне I осадок отсуществует, он смывается потоком суспензии и отбрасывается в зону II, где происходит накопление осадка с объемной влажностью порядка 40–50 %. Осадок в зоне II накапливается до тех пор, пока напряжения от тангенциальной составляющей центробежной силы не станут равными внутренним касательным напряжениям в осадке. После этого осадок начинает двигаться вдоль ротора, постепенно освобождаясь от влаги. Для определения длины зоны напорного фильтрования составлено дифференциальное уравнение, описывающее течение жидкости вдоль ротора (в виде тонкой пленки) с одновременной фильтрацией ее через сито. Рассматривается движение осадка в зоне II. В первом приближении к реологической модели принимается осадок за неньютоновскую жидкость.

Результаты. Предложенная на основе проведенных аналитических и экспериментальных исследований математическая модель движения разделяемой системы в коническом роторе позволяет определить длину зоны напорного фильтрования и рассчитать параметры процесса, обеспечивающие наличие в роторе зоны осадка, а также определить продолжительность пребывания осадка в роторе, зная которую можно по известным формулам вычислить влажность получаемого осадка.

Ключевые слова:

Трубочатые, фильтрующие центрифуги, механизм движения разделяемой системы, производительность, частота вращения ротора.

Введение

Во многих отраслях народного хозяйства в настоящее время для разделения стойких жидких неоднородных систем широко применяют фильтрующие и трубочатые центрифуги с шнековой выгрузкой осадка, которые отличаются высокими факторами разделения. Они широко применяются и при бурении эксплуатационных скважин для очистки бурового раствора от выбуренного шлама. Повышение надежности и долговечности, эффективности и производительности, а также экономичности центрифуг требует получения и изучения их энергетических характеристик, особенно связанных с затратами энергии на преодоление различных вредных сопротивлений. Получение энергетических характеристик центрифуг также необходимо для создания новых приводов, так как применяемая в настоящее время в приводах промышленных центрифуг ременная передача имеет существенные недостатки, отдельные из которых недопустимы [1–4].

Энергетические показатели трубочатой центрифуги может характеризовать любая зависимость, позволяющая определять необходимую для привода центрифуги мощность при заданных производительности и частоте вращения ротора. Например, зависимость момента на валу центрифуги от частоты вращения ее ротора при различных значениях производительности или зависимость необходимой для привода центрифуги мощности от передаточного числа привода и др. Мощность $N_{ц}$, требуемая для привода трубочатой центрифуги, складывается из технологической мощности $N_{т}$, необходимой для обеспечения собственно процесса центрифугирования, и мощностей $N_{п}$, $N_{г}$ и $N_{а}$, необходимых для преодоления сопротивлений соответственно в подшипниках, гидравлического и аэродинамического [5–7].

Технологическую мощность определяют по известной формуле [8]:

$$N_{т} = 0,5m_{с} v_{вых}^2, \quad (1)$$

где m_c – секундный массовый расход суспензии, кг/с; $v_{\text{вых}}$ – абсолютная скорость фугата на выходе из го- ловки ротора центрифуги, м/с.

При инженерных расчетах значение $v_{\text{вых}}$ обычно заменяют близким ему значением $v_{\text{окр}}$ – окружной скорости ротора на радиусе расположения выпускных каналов; кроме того, не учитывают затраты энергии на распыление вытекающего фугата, а для осветляющих центрифуг пренебрегают затратами энергии на раскручивание частиц твердой фазы. Как показали экспериментальные исследования, для учета этих факторов в зависимость (1) необходимо ввести поправочный коэффициент 1,32. Тогда технологическую мощность определяем согласно выражению (2):

$$N_T = 0,66m_c v_{\text{окр}}^2. \quad (2)$$

Потери на трение в подшипниках качения верхней опоры могут быть учтены коэффициентом полезного действия подшипника $\eta_{\text{п}}=0,98$. Мощность для преодоления потерь на трение в подшипнике скольжения нижней опоры определяют по формуле [9]

$$N_{\text{п}} = f_{\text{тр}} P_{\text{п}} v_{\text{в}}, \quad (3)$$

где $f_{\text{тр}}$ – коэффициент трения; $P_{\text{п}}$ – радиальная нагрузка на подшипник, н; $v_{\text{в}}$ – окружная скорость шейки вала, м/с.

Гидравлические потери при течении суспензии в трубчатом роторе центрифуги определить аналитически крайне затруднительно вследствие сложности процесса. Однако на основании экспериментальных исследований [10–17] рекомендуется принимать (4):

$$N_T \approx 0,6N_T. \quad (4)$$

Вследствие того, что в общем балансе энергии центрифуги гидравлические потери составляют всего 10–12 %, можно пользоваться приведенной рекомендацией.

Аэродинамические потери в общем балансе энергии центрифуги составляют 50–60 % [18–22], при этом с увеличением частоты вращения ротора (т. е. в перспективе развития центрифуг) эти потери резко возрастают. Вопросу определения аэродинамических потерь вращающихся роторов центрифуг и сепараторов посвящено много работ, анализ которых показывает, что большинство зависимостей получены экспериментально в различных условиях, вследствие чего они количественно и качественно различаются.

Сходную структуру имеют зависимости, рекомендованные в работах [23], аэродинамическую мощность определяют по формуле (5):

$$N_a = c_3 \rho L R_p^4 \omega^3, \quad (5)$$

где c_3 – экспериментальный коэффициент; ρ – удельная плотность среды, в которой вращается ротор центрифуги, кг/м³; L – длина ротора центрифуги, м; R_p – наружный радиус ротора, м; ω – угловая скорость вращения ротора, с⁻¹.

Зависимость, рекомендованная в работе [24], получена на основании анализа гидродинамики потока среды в зазоре между вращающимся ротором и неподвижным кожухом центрифуги. Влияние величины

этого зазора на аэродинамические потери учтено параметром [25], определяемым по формуле (6):

$$A = 0,018 - 0,068m^2 + 0,115m^3 - 0,048m^4, \quad (6)$$

где $m = R_p/R_k$; R_k – внутренний радиус кожуха, м.

Тогда мощность будет определяться по выражению (7):

$$N_a = c_3 A \rho L R_p^4 \omega^3. \quad (7)$$

Анализ выражения (6) показывает, что зависимость $A=f(m)$ имеет минимум при $\approx 0,6$, т. е. соотношение $R_p/R_k \approx 0,6$ является наиболее выгодным с энергетической точки зрения.

В результате экспериментальных исследований было получено значение коэффициента $c_3=1,07$, учитываемого в основном потери на торцах ротора, которыми при теоретическом анализе пренебрегали.

Таким образом, зависимости (2)–(4), (7) позволяют вычислять отдельные составляющие и, следовательно, суммарную мощность, необходимую для привода трубчатой центрифуги при различных значениях ее производительности и частоты вращения ротора.

На рис. 1 представлены моментные характеристики промышленной трубчатой центрифуги ОТР-151К-01 при ее работе на воде, рассчитанные по данным формулам, а также результаты экспериментальных измерений [26–28]. Расхождение расчетных и экспериментальных величин крутящего момента на валу центрифуги не превышает 4 %.

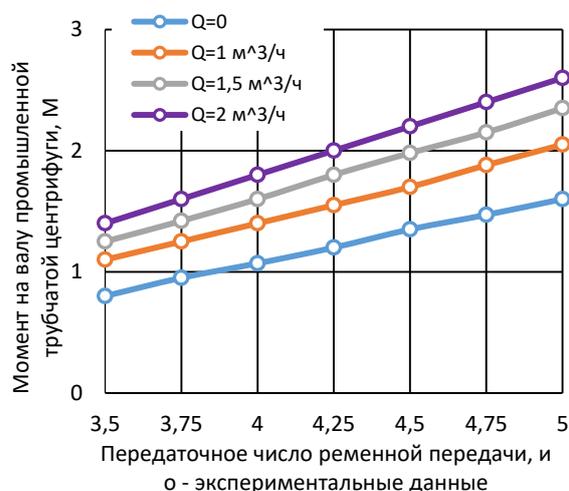


Рис. 1. Расчетные зависимости момента M на валу промышленной трубчатой центрифуги ОТР-151К-01 при ее работе на воде от передаточного числа i и привода при различной производительности Q (частота вращения вала двигателя 2900 об/мин)

Fig. 1. Calculated dependences of the moment M on the shaft of the tubular industrial centrifuge OTR-151K-01 during its operation on water on the gear ratio i and the drive at different performance Q (frequency of rotation of the motor shaft 2900 rpm)

Экспериментальные исследования были проведены на промышленной трубчатой центрифуге ОТР-151К-01 [29]. Передаточное число ременной передачи варьировали сменными шкивами, производительность цен-

трифуги измеряли объемным методом. Для измерения крутящего момента на валу центрифуги была применена специально сконструированная измерительная головка, содержащая торсионметр. Угол закручивания торсионного валика, линейно зависящий от измеряемого крутящего момента, определяли при помощи стробоскопического тахометра 2ТСт 32-456. При этом сразу измеряли частоту вращения входного вала и, следовательно, ротора центрифуги.

Экспериментальные исследования были проведены на промышленной трубчатой центрифуге ОТР-152К-1, модернизированной для использования во взрывоопасных производствах [30]. Как было установлено в процессе этих исследований, полученные моментные характеристики трубчатой центрифуги ОТР-151К-01 при ее работе на воде можно с достаточной для инженерной практики точностью (до 6–7 %) распространить на ряд других продуктов, например полиэфирные лаки и минеральные масла, имеющие несколько меньшую плотность и большую вязкость по сравнению с водой [31].

Конструкции фильтрующих центрифуг, у которых шнековая выгрузка осадка, эксплуатируются в различных химических производствах; начато внедрение в промышленность центрифуг с центробежной выгрузкой осадка. Исследование центробежного фильтрования суспензий с объемной концентрацией 50–60 % позволило выявить закономерности процесса, протекающего в этих центрифугах [32–36].

На начальной стадии процесса фильтрования отделение жидкой фазы практически не связано с увеличением толщины слоя осадка и с соответствующим возрастанием сопротивления при фильтровании. В данном случае основное влияние на процесс оказывает не сопротивление слоя осадка, который размывает-

ся поступающей в ротор суспензией, а сопротивление фильтрующей перегородки (листового сита). Поэтому для начальной стадии первого периода процесса тонкослойного центробежного фильтрования вместо термина «фильтрование с образованием осадка» было предложено применять термин «напорное фильтрование».

На начальной стадии процесса фильтрования отделение жидкой фазы практически не связано с увеличением толщины слоя осадка и с соответствующим возрастанием сопротивления при фильтровании. В данном случае основное влияние на процесс оказывает не сопротивление слоя осадка, который размывается поступающей в ротор суспензией, а сопротивление фильтрующей перегородки (листового сита). Поэтому для начальной стадии первого периода процесса тонкослойного центробежного фильтрования вместо термина «фильтрование с образованием осадка» было предложено применять термин «напорное фильтрование».

Экспериментально в роторах рассматриваемых центрифуг удается различить две зоны – зону напорного фильтрования и зону центробежного отжима (рис. 2). При нарушении режима фильтрования суспензия из зоны напорного фильтрования может попадать в зону центробежного отжима. В местах прорывов суспензии, как и в зоне напорного фильтрования, слой осадка смывается [37, 38].

На основании результатов экспериментальных исследований предложена новая математическая модель движения разделяемой системы в роторах фильтрующих центрифуг с шнековой и центробежной выгрузкой осадка в случае тонкослойного фильтрования суспензий со среднезернистой твердой фазой и объемной концентрацией меньше 60 % [39–42].

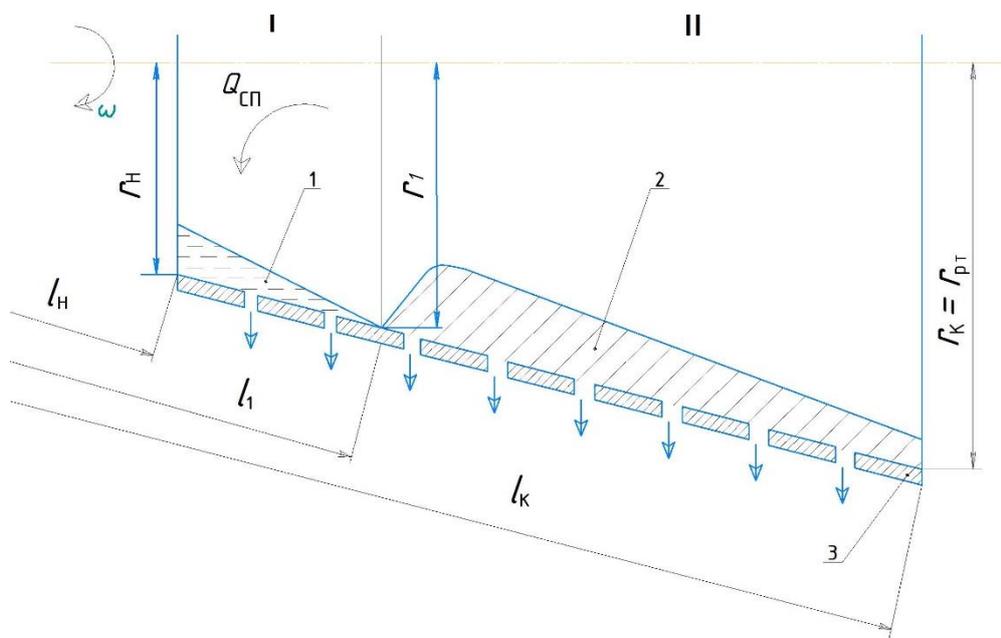


Рис. 2. Схема тонкослойного центробежного фильтрования. I – зона напорного фильтрования; II – зона центробежного отжима; 1 – жидкость; 2 – осадок; 3 – стенка ротора

Fig. 2. Scheme of thin-layer centrifugal filtration. I – pressure filtration zone; II – zone of centrifugal extraction; 1 – liquid; 2 – sediment; 3 – rotor wall

Согласно этой модели, ротор по образующей разделен на зоны *I* и *II* (рис. 2).

В зоне *I* осадок здесь отсутствует, он смывается суспензией и выбрасывается в зону *II*, где происходит его накопление с объемной влажностью порядка 40–50 %. Осадок в зоне *II* накапливается до тех пор, пока напряжения от тангенциальной составляющей центробежной силы не станут равными внутренним касательным напряжениям в осадке. После этого осадок начинает двигаться вдоль ротора, постепенно освобождаясь от влаги. Для определения длины зоны напорного фильтрования составлено дифференциальное уравнение, описывающее течение жидкости вдоль ротора (в виде тонкой пленки) с одновременной фильтрацией ее через сито, которая определяется по формуле (8):

$$\frac{du_{ж}}{dl} + \frac{1}{3} \left(\frac{u_{ж}}{l} \right) + A_1 l = 0, \quad (8)$$

где $u_{ж}$ – средняя по толщине скорость течения пленки, м/с; l – расстояние до вершины конуса вдоль образующей, м; $A_1 = \frac{\omega^2 \sin 2\alpha}{2v\beta}$; ω – угловая скорость ротора, с⁻¹; α – угол наклона образующей конуса, град.; v – кинематическая вязкость, м²/с; β – сопротивление фильтрующей перегородки (коэффициент).

В результате интегрирования уравнения (8) и подстановки граничного условия $u_{ж}|_{l=l_n} = u_{ж,n}$ получим уравнение (9):

$$u_{ж} = u_{ж,n} \left(\frac{l_n}{l} \right)^{1/3} - \frac{3}{7} \frac{A_1}{l_n^{1/3}} \left(l^{7/3} - l_n^{7/3} \right), \quad (9)$$

где $u_{ж,n} = \left(\frac{Q^2 \omega^2}{12\pi^2 v l_n} \right)^{1/3}$; l_n – расстояние от вершины конуса до начала ротора, м; Q – расход жидкости, м³/с.

Толщина пленки жидкости непрерывно уменьшается, и при достижении координаты $l=l_1$ (рис. 2) напорное фильтрование прекращается. Решив уравнение (9) при $l=l_1$, в случае $u_{ж}=u_{ж1}=0$ определяем l_1 по формуле (10):

$$l_1 = l_n \left[\frac{7}{3A_1} \frac{u_{ж,n}}{l_n^2} + 1 \right]^{3/7}. \quad (10)$$

Для проведения нормальной работы центрифуги значение длины зоны напорного фильтрования (l_1-l_n) не может превышать 25–30 % от общей длины, образующей поверхности конического ротора. Задавая значением длины зоны напорного фильтрования, из выражения (10) находим максимально допустимую производительность жидкости, при которой осуществляется оптимальный режим работы центрифуги. Производительность по жидкости в зоне напорного фильтрования определяем из следующего соотношения [43] по формуле (11):

$$Q = \frac{2\sqrt{3}\pi\omega^2}{v \sin^2 \alpha} \left[\frac{3 \cos \alpha}{7\beta} \left(r_1^{7/3} - r_n^{7/3} \right) \right]^{3/2}, \quad (11)$$

где r_1 – радиус ротора на границе зон, м; r_n – начальный радиус ротора, м.

Рассмотрим движение осадка в зоне *II*. В первом приближении к реологической модели примем осадок за неньютоновскую жидкость. Необходимо составить уравнение баланса сил для элементарного слоя осадка толщиной dn (здесь n – нормаль к образующей конического ротора) и длиной dl (где l – компонента вектора количества движения), который находится под действием центробежной силы и сил внутреннего трения. В результате это уравнение можно представить в формуле (12):

$$\frac{d\tau^*}{dn} = \rho_{ос} \omega^2 r \sin \alpha, \quad (12)$$

где τ^* – касательное напряжение, МПа; $\rho_{ос}$ – плотность осадка, кг/м³.

Интегрируя дифференциальное уравнение (12) с учетом граничного условия $\tau^*|_{n=0}=0$, получим касательное напряжение, которое определяется по формуле (13):

$$\tau^* = \rho_{ос} \omega^2 r n \sin \alpha. \quad (13)$$

Градиент скорости сдвига пропорционален касательному напряжению [44]. Тогда для движущегося осадка дифференциальное уравнение запишется формулой (14):

$$-\frac{du_{ос}}{dn} = f(\tau^*), \quad (14)$$

где $u_{ос}$ – скорость сдвига осадка, м/с.

Максимальные напряжения имеют место у стенки (сита) и определяются по формуле (15):

$$\tau_{ст}^* = \rho_{ос} \omega r h_{ос} \sin \alpha, \quad (15)$$

где $h_{ос}$ – толщина осадка, м.

Таким образом, касательные напряжения определяются по формуле (16):

$$\tau^* = \tau_{ст}^* \frac{n}{h_{ос}}. \quad (16)$$

Подставив зависимость (16) в уравнение (15), после его интегрирования можно определить распределение скорости $u_{ос}$ по толщине слоя осадка по выражению (17):

$$u_{ос} = \int_n^{h_{ос}} f \left(\tau_{ст}^* \frac{n}{h_{ос}} \right) dn. \quad (17)$$

Объемный расход осадка [44] определяется по формуле (18):

$$Q_{ос} = \frac{2\pi r h_{ос}^2}{(\tau_{ст}^*)^2} \int_0^{\tau_{ст}^*} \tau^* f(\tau^*) d\tau^*. \quad (18)$$

Для дилатантной жидкости в соответствии со степенным законом $\tau^* = k_0 \left(\frac{du_{ос}}{dn} \right)^{m_0}$ получим функцию касательного напряжения, определяемую по формуле (19):

$$f(\tau^*) = \left(\frac{\tau^*}{k_0} \right)^{1/m_0}, \quad (19)$$

где k_0, m_0 – постоянные.

После подстановки функции (19) в уравнение (18) и интегрирования с учетом выражения (15) находим объемный расход осадка по формуле (20):

$$Q_{oc} = \frac{2\pi r h_{oc}^2 m_0}{2m_0 + 1} \times \left[\frac{\rho_{oc} \omega^2 r h_{oc} \sin \alpha}{k_0} \right]^{1/m_0}. \quad (20)$$

Тогда средняя скорость сдвига по толщине слоя осадка будет определяться по выражению (21):

$$(u_{oc})_{cp} = \left[\left(\frac{m_0}{2m_0 + 1} \right)^{m_0} \times \left(\frac{\rho_{oc} \omega^2 \sin \alpha}{k_0} \right) \left(\frac{Q_{oc}}{2\pi} \right)^{m_0+1} r^{-m_0} \right]^{\frac{1}{2m_0+1}}. \quad (21)$$

Аналогичное выражение для $(u_{oc})_{cp}$ получено несколько иным методом в работе [45].

В заключение находим продолжительность пребывания осадка в роторе по формуле (22):

$$\tau_{up} = \int_{r_1}^{r_{pr}} \frac{dr}{(u_{oc})_{cp} \sin \alpha} = \left[\frac{(2m_0 + 1)^{3m_0+1}}{m_0^m (3m_0 + 1)^{2m_0+1}} \times \left(\frac{k_0}{\rho_{oc} \omega^2} \right) \left(\frac{2\pi}{Q_{oc} \sin^2 \alpha} \right)^{m_0+1} \right]^{\frac{1}{2m_0+1}} \times \left[r_{pr}^{\frac{3m_0+1}{2m_0+1}} - r_1^{\frac{3m_0+1}{2m_0+1}} \right], \quad (22)$$

где r_{pr} – максимальный радиус ротора, м.

Заключение

Предложенная модель движения разделяемой системы в коническом роторе позволяет определить длину зоны напорного фильтрования и рассчитать параметры процесса, обеспечивающие наличие в роторе зоны осадка, а также определить продолжительность пребывания осадка в роторе, зная которую можно по известным формулам вычислить влажность получаемого осадка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кузин М.А., Панин И.Н., Цимбалюк Е.П. Очистка воды бассейнов длительной выдержки атомных станций // Водоочистка, водоподготовка, водоснабжение. – 2010. – № 6. – С. 12–15.
- Гиляев Ген.Г., Хабибуллин М.Я., Гиляев Г.Г. Перспективы применения кислотного геля для закачки пропанта в процессе проведения гидроразрыва карбонатных пластов на территории самарской области // Нефтяное хозяйство. – 2020. – № 8. – С. 54–57. DOI: 10.24887/0028-2448-2020-8-54-57
- Kuzin M.A. Vibration reliability and endurance of a centrifuge for separating suspensions // Chemical and Petroleum Engineering. Springer Science+Business Media. – 2010. – V. 46. – P. 45–50. DOI: 10.1007/S10556-010-9287-8.
- Жужиков В.А. Фильтрование. Теория и практика разделения суспензий. – М.: Изд-во «Химия», 1980. – 398 с.
- Хабибуллин М.Я. Повышение долговечности и надежности работы центробежных сепараторов путем применения новых материалов // Нефтегазовое дело. – 2020. – Т. 18. – № 3. – С. 107–112. DOI: 10.17122/ngdelo-2020-3-107-112
- Critical review on the active site structure of sulfated zirconia catalysts and prospects in fuel production / G.X. Yan, A. Wang, I.E. Wachs, J. Baltrusaitis // Applied Catalysis A: General. – 2019. – V. 572. – P. 210–225.
- Alkane isomerization over sulfated zirconia solid acid system / P. Wang, Y. Yue, T. Wang, X. Bao // International Journal of Energy Research. – 2020. – V. 44 (5). – P. 3270–3294.
- A study of fluorine-containing catalysts based on MOR and BEA zeolites in isomerization of n-hexane / O.V. Dzhikiya, M.D. Smolikov, E.A. Belopukhov et al. // AIP Conference Proceedings. – 2020. – V. 2285 (1). – P. 020005. DOI: 10.1063/5.0027245
- Прошин И.А. Управление в вентильно-электромеханических системах. Кн. Вторая. Математическое моделирование вентильно-электромеханических систем. – Пенза: Изд-во ПТИ, 2002. – 307 с.
- Хабибуллин М.Я. Совершенствование процесса солянокислотной обработки скважин применением новейших технологий и оборудования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 10. – С. 128–134. DOI: 10.18799/24131830/2020/10/2861
- Серпокрылов Н.С., Щербак А.С. Доочистка шахтных вод на фильтрах с песчаной загрузкой // Инженерный вестник Дона. – 2011. – № 2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2011/434/ (дата обращения 15.05.2022).
- Лаптев А.Г., Бородай Е.Н. Математическая модель процесса адсорбции при очистке сточных вод ТЭС от нефтепродуктов // Инженерный вестник Дона. – 2010. – № 4. – С. 144–149
- Лукьяненко В.М., Таранец А.В. Центрифуги. – М.: Изд-во «Химия», 1988. – 384 с.
- Хабибуллин М.Я. Увеличение эффективности разделения жидких систем при сборе пластовой жидкости // Нефтегазовое дело. – 2020. – Т. 18. – № 2. – С. 64–71. DOI: 10.17122/ngdelo-2020-2-64-71
- Разделение суспензий в химической промышленности / Т.А. Малиновская, И.А. Кобринский, О.С. Кирсанов, В.В. Рейнфарт. – М.: Изд-во «Химия», 1983. – 264 с.
- Хабибуллин М.Я. Исследование процессов, происходящих в колонне труб при устьевой импульсной закачке жидкости в скважину // Нефтегазовое дело. – 2018. – Т. 16. – № 6. – С. 34–39. DOI: 10.17122/ngdelo-2018-6-34-39
- Weiland R.H., McPherson R.R. Accelerated settling by addition of buoyant particles // Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals. – 1979. – V. 40. – P. 45–49.
- Suleimanov R.I., Khabibullin M.Ya., Suleimanov Re.I. Analysis of the reliability of the power cable of an electric-centrifugal pump unit // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering 2019. – 2019. – P. 012054. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012054
- Patwardhan V.S., Tien C. Sedimentation and liquid fluidization of solid particles of different sizen and densities // Chemical Engineering Science: X-Journals. – 1985. – V. 40. – P. 1051–1060.
- Khabibullin M.Ya., Suleimanov R.I. Automatic packer reliability prediction under pulsed transient flooding of hydrocarbon reservoirs // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – P. 012024. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012024
- Соколов В.И., Соколов Н.В. Совершенствование процесса сепарирования жидких неоднородных систем // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 1986. – № 3. – С. 15–16.
- Wissentan A. Biochemical basis of free and immobilized enzyme application in industry, analysis and therapy // Journal of Chemical Technology and Biotechnology. – 1980. – V. 30. – P. 521–529.
- Langeloh Th., Stahl W. Der einfluss des schleppreffektes auf die klarung in dekantier-zentrifugen // Aufbereitungs-technik. – 1989. – V. 6. – P. 331–337.
- Семенов Е.В., Карамзин В.А., Поляков В.И. Расчет формы рабочей поверхности центрифуги // Теоретические основы химической технологии. – 1985. – Т. 19. – № 4. – С. 564–567.
- Welke G., Dresenkamp B. Zur Qualität sicherung von Trypsin zur Zellzucht // Archiv für Experimentelle Veterinaermedizin – specciation.net. – 1988. – V. 42. – P. 302–307.
- Kuzin M.A. Simulation and vibrational reliability of centrifuge for separating suspensions // Russian Engineering Research. – 2009. – V. 29. – P. 1099–1101. DOI: 10.3103/S1068798X09110069.

27. Khabibullin M.Ya. Development of the design of the sucker-rod pump for sandy wells // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – P. 012065. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012065
28. Кузин М.А., Панин И.Н., Цимбалюк Е.П. Патронный фильтр для очистки воды бассейнов длительной выдержки атомных станций // Экология и промышленность России. – 2010. – № 6 – С. 12–13.
29. Прошин И.А., Бурков В.В. Математическое моделирование процессов центрифугирования // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2010. – Т. 6. – № 11. – С. 71–74.
30. Федотов К.В., Тютюнин В.В. Моделирование процессов гравитационного обогащения // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2009. – № 37. – С. 176–181.
31. Кузин М.А., Панин И.Н., Цимбалюк Е.П. Применение метода аналогии для расчета трубчатого текстильного фильтра и систем очистки на его основе // Водоочистка, водоподготовка, водоснабжение. – 2010. – №4. – С. 36–37.
32. Миньков Ж.И., Пикущак Е.В., Дик И.Г. Моделирование седиментации частиц полидисперсной суспензии в тарельчатой центрифуге // Теплофизика и аэромеханика. – 2009. – Т. 16. – № 1. – С. 79–88.
33. Пичулин В.С., Лукьянюк В.Ю., Соболева А.Ю. Центрифуги короткого радиуса (ЦКР) как гидростатическая модель земной гравитации // Труды МАИ. – 2008. – № 32. – С. 1–11.
34. Павлова Н.В., Павлов И.Н., Тушкина Т.М. О численном моделировании двухфазных течений в роторе лабораторной центрифуги // Ползуновский вестник. – 2008. – № 1–2. – С. 11–15.
35. Кузин М.А., Панин И.Н., Цимбалюк Е.П. Фильтровально-адсорбционная очистка воды с использованием насыпных кварцевых фильтров // Водоочистка, водоподготовка, водоснабжение. – 2009. – № 4. – С. 8–9.
36. Пуленец Н.Е. Задачи и методы обеспечения прочности ротора испытательных центрифуг // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2006. – № 5-1 (47). – С. 192–197.
37. Лаптев А.Г., Башаров М.М., Лаптева Е.А. Математические модели и методы расчетов теплообменных и сепарационных процессов в двухфазных средах. – Казань: Казанский Государственный Энергетический Университет, 2021. – 288 с.
38. Семенов Е.В., Карамзин В.А. О разделении суспензии в роторе осадительной фильтрующей центрифуги // Теоретические основы химической технологии. – 2007. – Т. 41. – № 2. – С. 183–190.
39. Кузин М.А. Вибрационная надёжность центрифуги // Нелинейный мир. – 2010. – № 11. – С. 724–728.
40. Khabibullin M.Y. Theoretical grounding and controlling optimal parameters for water flooding tests in field pipelines // Journal of Physics: Conference Series. International Conference «Information Technologies in Business and Industry». – 2019. – P. 042013. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/4/042013
41. Douglas N.M. Sedimentation centrifuges // Know what you need 11 Chem. Eng. – 1988. — March 28. – V. 95. – P. 42–51.
42. Minnini G., Spinosa L., Santory M. Centrifugation: influence of operating variables on cake concentration // 7 Eur. Abwasser und abfallsymg. EWPCA. – Munchen, 19–22 Mai, 1987. Doc. Pt. 1. St. Augustin. - 1987. – P. 488–499.
43. Kuzin M.A. Vibration reliability and lifetime of centrifuge // Abstracts of III International Pyroprocessing Research Conference: «IRPC-2010». – Dimitrovgrad, 2010. – V. 29. – P. 49.
44. Модели и эффективность процессов межфазного переноса. Ч. 2. Тепло массообменные процессы / А.Г. Лаптев, М.М. Башаров, Е.А. Лаптева, Т.М. Фарахов. – Казань: Центр инновационных технологий, 2020. – 565 с.
45. Records A., Sutherland K. Decanter centrifuge handbook // Alan Records, Ken Sutherland. 1. ed. – Oxford: Elsevier advanced technology, 2001. – V. XI – P. 421.

Поступила 15.06.2022 г.

Информация об авторах

Хабибуллин М.Я., кандидат технических наук, доцент кафедры нефтепромысловых машин и оборудования, Уфимский государственный нефтяной технический университет, филиал в г. Октябрьский.

UDC 66.067.57:66.012.37

INCREASING THE EFFICIENCY OF SEPARATING LIQUID SYSTEMS ON THE BASIS OF IMPROVING ENERGY CHARACTERISTICS IN ROTORS OF FILTERING CENTRIFUGES OF VARIOUS DESIGNS

Marat Ya. Khabibullin,
m-hab@mail.ru

Institute of Oil and Gas of Ufa State Petroleum Technological University (branch in Oktyabrsky),
54a, Devonskaya avenue, Oktyabrsky, 452607, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to provide more efficient economy, improve reliability and durability, efficiency and productivity of centrifuges. It is required to obtain and study their energy characteristics, especially those associated with energy costs to overcome various harmful resistances. Obtaining the energy characteristics of centrifuges is also necessary to create new drives, since the belt drive currently used in industrial centrifuge drives has significant drawbacks, some of which are unacceptable.

Purpose: based on the results of experimental studies, propose a new mathematical model for a separated system movement in the rotors of filter centrifuges with centrifugal and screw unloading of sediment in thin-layer filtration of suspensions with a medium-grained solid phase and a volume concentration of less than 60 %.

Objects. The processes in the rotors of filtering centrifuges with centrifugal and screw unloading of sludge during thin-layer filtration of suspensions with a medium-grained solid phase are studied. Experimentally, in the rotors of the centrifuges under consideration, it is possible to distinguish two zones – the pressure filtration zone and the centrifugal pressing zone. If the filtration mode is violated, the suspension from the pressure filtration zone can fall into the centrifugal pressing zone. In places of suspension breakthroughs, as well as in the pressure filtration zone, the sediment layer is washed off.

Methods. According to the developed mathematical model, the rotor is divided into two zones along the generatrix. There is no sediment in zone I, it is washed away by the suspension flow and thrown into zone II, where sediment is accumulated with a volumetric moisture content of about 40–50 %. Sediment in zone II is accumulated until the stresses from the tangential component of the centrifugal force become equal to the internal shear stresses in the sediment. After that, the sediment begins to move along the rotor, gradually freeing itself from moisture. To determine the length of the pressure filtration zone, a differential equation was compiled that describes the flow of liquid along the rotor (in the form of a thin film) with its simultaneous filtration through a sieve. The sediment movement in zone II is considered. In the first approximation to the rheological model, the sediment is taken as a non-Newtonian liquid.

Results. The mathematical model of the movement of the separated system in the conical rotor proposed on the basis of the conducted analytical and experimental studies makes it possible to determine the length of the pressure filtration zone and calculate the process parameters that ensure the presence of a zone and sediment in the rotor, as well as determine the duration of the sediment in the rotor, knowing which, one can according to known formulas, calculate the moisture content of the resulting sediment.

Key words:

Tubular, filtering centrifuges, mechanism of movement of the divided system, productivity, rotor speed.

REFERENCES

- Kuzin M.A., Panin I.N., Tsymbalyuk E.P. Purification of water in long-term storage pools of nuclear power plants. *Water treatment, water treatment, water supply*, 2010, no. 6, pp. 12–15. In Rus.
- Gilaev G.G., Khabibullin M.Ya., Gilaev G.G. Prospects for the use of acid gel for proppant injection in the process of hydraulic fracturing of carbonate reservoirs in the Samara region. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2020, no. 8, pp. 54–57. DOI: 10.24887/0028-2448-2020-8-54-57. In Rus.
- Kuzin M.A. Vibration reliability and endurance of a centrifuge for separating suspensions. *Chemical and Petroleum Engineering, Springer Science+Business Media*, 2010, vol. 46, pp. 45–50. DOI: 10.1007/S10556-010-9287-8.
- Zhuzhikov V.A. *Filtrovaniye. Teoriya i praktika razdeleniya suspenziy* [Filtration. Theory and practice of separation of suspensions]. Moscow, Khimiya Publ., 1980. 398 p.
- Khabibullin M.Ya. Improving the durability and reliability of centrifugal separators by using new materials. *Oil and Gas Business*, 2020, vol. 18, no. 3, pp. 107–112. In Rus. DOI: 10.17122/ngdelo-2020-3-107-112.
- Yan G.X., Wang A., Wachs I.E., Baltrusaitis J. Critical review on the active site structure of sulfated zirconia catalysts and prospects in fuel production. *Applied Catalysis A: General*, 2019, vol. 572, pp. 210–225.
- Wang P., Yue Y., Wang T., Bao X. Alkane isomerization over sulfated zirconia solid acid system. *International Journal of Energy Research*, 2020, vol. 44 (5), pp. 3270–3294.
- Dzhikiya O.V., Smolikov M.D., Belopukhov E.A. A study of fluorine-containing catalysts based on MOR and BEA zeolites in isomerization of n-hexane. *AIP Conference Proceedings*, 2020, vol. 2285 (1), pp. 020005. DOI: 10.1063 / 5.0027245
- Proshin I.A. *Upravlenie v ventilno-elektromekhanicheskikh sistemakh. Kn. 2. Matematicheskoe modelirovaniye ventilno-elektromekhanicheskikh sistem* [Management in valve-electromechanical systems. B. 2. Mathematical modeling of valve-electromechanical systems]. Penza, PTI Publ., 2002. 307 p.
- Khabibullin M.Ya. Improving the process of hydrochloric acid treatment of wells using the latest technologies and equipment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 10, pp. 128–134. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2020/10/2861
- Serpokrylov N.S., Shcherbakov A.S. Post-treatment of mine waters on filters with sand loading. *Inzhenernyy Bulletin of the Don*, 2011, no. 2. In Rus. Available at: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2011/434/ (accessed 15 May 2022).
- Laptev A.G., Borodai E.N. Mathematical model of the adsorption process in the treatment of wastewater from thermal power plants from oil products. *Engineering Bulletin of the Don*, 2010, no. 4, pp. 144–149. In Rus.
- Lukyanenko V.M., Taranets A.V. *Tsentrifugi* [Centrifuges]. Moscow, Khimiya Publ., 1988. 384 p.
- Khabibullin M.Ya. Increasing the efficiency of separation of liquid systems during the collection of reservoir fluid. *Oil and gas business*, 2020, vol. 18, no. 2, pp. 64–71. In Rus. DOI: 10.17122/ngdelo-2020-2-64-71.
- Malinovskaya T.A., Kobrinskii I.A., O.S. Kirsanov O.S., V.V. Reinfart V.V. *Razdeleniye suspenziy v khimicheskoy promyshlennosti* [Separation of suspensions in the chemical industry]. Moscow, Khimiya Publ., 1983. 264 p.

16. Khabibullin M.Ya. Investigation of the processes occurring in the pipe string during the wellhead pulsed injection of fluid into the well. *Oil and gas business*, 2018, vol. 16, no. 6, pp. 34–39. In Rus. DOI: 10.17122/ngdelo-2018-6-34-39.
17. Weiland R.H., McPherson R.R. Accelerated settling by addition of buoyant particles. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, 1979, vol. 40, pp. 45–49.
18. Suleimanov R.I., Khabibullin M.Ya., Suleimanov Re.I. Analysis of the reliability of the power cable of an electric-centrifugal pump unit. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering 2019*, 2019, pp. 012054. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012054
19. Patwardhan V.S., Tien C. Sedimentation and liquid fluidization of solid particles of different sizes and densities. *Chemical Engineering Science: X-Journals*, 1985, vol. 40, pp. 1051–1060.
20. Khabibullin M.Ya., Suleimanov R.I. Automatic packer reliability prediction under pulsed transient flooding of hydrocarbon reservoirs. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, pp. 012024. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012024
21. Sokolov V.I., Sokolov N.V. Improving the separation process of liquid heterogeneous systems. *Chemical and oil and gas engineering*, 1986, no. 3, pp. 15–16. In Rus.
22. Wissentan A. Biochemical basis of free and immobilized enzyme application in industry, analysis and therapy. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 1980, vol. 30, pp. 521–529.
23. Langeloh Th., Stahl W. Der einfluss des schleppeffektes auf die klarung in dekantier-zentrifugen. *Aufbereitungs-technik*, 1989, vol. 6, pp. 331–337.
24. Semenov E.V., Karamzin V.A., Polyakov V.I. Calculation of the shape of the centrifuge working surface. *Theoretical foundations of chemical technology*, 1985, vol. 19, no. 4, pp. 564–567. In Rus.
25. Welke G., Dresenkamp B. Zur Qualität sicherung von Trypsin zur Zellzucht. *Archiv für Experimentelle Veterinaermedizin – speciation.net*, 1988, vol. 42, pp. 302–307.
26. Kuzin M. A. Simulation and Vibrational Reliability of Centrifuge for Separating Suspensions. *Russian Engineering Research*, 2009, vol. 29, pp. 1099–1101. DOI: 10.3103/S1068798X09110069.
27. Khabibullin M.Ya. Development of the design of the sucker-rod pump for sandy wells. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, pp. 012065. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012065
28. Kuzin M.A., Panin I.N., Tsimbalyuk E.P. Cartridge filter for water purification in long-term storage pools of nuclear power plants. *Ecology and Industry of Russia*, 2010, vol. 6, pp. 12–13. In Rus.
29. Proshin I.A., Burkov V.V. Mathematical modeling of centrifugation processes. *Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2010, vol. 6, no. 11, pp. 71–74. In Rus.
30. Fedotov K.V., Tyutyunin V.V. Modeling of processes of gravitational enrichment. *Bulletin of the Irkutsk State Technical University*, 2009, no. 37, pp.176–181. In Rus.
31. Kuzin M.A., Panin I.N., Tsimbalyuk E.P. Application of the analog method for calculating a tubular textile filter and cleaning systems based on it. *Water treatment, water treatment, water supply*, 2010, no. 4, pp. 36–37. In Rus.
32. Minkov J.I., Pikushchak E.V., Dik I.G. Simulation of sedimentation of particles of a polydisperse suspension in a plate centrifuge. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2009, vol. 16, no. 1, pp. 79–88. In Rus.
33. Pichulin B.C., Lukyanuk V.Yu., Soboleva A.Yu. Short radius centrifuges (SCR) as a hydrostatic model of the Earth's gravity. *Proceedings of MAI*, 2008, no. 32, pp. 1–11. In Rus.
34. Pavlova N.V., Pavlov I.N., Tushkina T.M. On numerical modeling of two-phase flows in the rotor of a laboratory centrifuge. *Polzunovskiy Vestnik*, 2008, no. 1–2, pp. 11–15. In Rus.
35. Kuzin M.A., Panin I.N., Tsimbalyuk E.P. Filtration-adsorption water purification using bulk quartz filters. *Water purification, water treatment, water supply*, 2009, no. 4, pp. 8–9. In Rus.
36. Pulenets N.E. Tasks and methods for ensuring the strength of test centrifuge rotors. *Scientific and technical bulletin of the St. Petersburg State Polytechnic University*, 2006, no. 5-1 (47), pp. 192–197. In Rus.
37. Laptev A.G., Basharov M.M., Lapteva E.A. *Matematicheskie modeli i metody raschetov teplomassoobmennykh i separatsionnykh protsessov v dvukhfaznykh sredakh* [Mathematical models and methods for calculating heat and mass transfer and separation processes in two-phase media]. Kazan, Kazan State Power Engineering University, 2021. 288 p.
38. Semenov E.V., Karamzin V.A. On the separation of a suspension in the rotor of a precipitating filtering centrifuge. *Theoretical foundations of chemical technology*, 2007, vol. 41, no. 2, pp. 183–190. In Rus.
39. Kuzin M.A. Vibration reliability of a centrifuge. *Non-linear world*, 2010, no. 11, pp. 724–728. In Rus.
40. Khabibullin M.Y. Theoretical grounding and controlling optimal parameters for water flooding tests in field pipelines. *Journal of Physics: Conference Series. International Conference «Information Technologies in Business and Industry»*, 2019, pp. 042013. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/4/042013
41. Douglas N.M. Sedimentation centrifuges. *Know what you need 11 Chem. Eng*, 1988, March 28, vol. 95, pp. 42–51.
42. Minnini G., Spinosa L., Santory M. Centrifugation: influence of operating variables on cake concentration. *7 Eur. Abwasser and abfallsymg. EWPCA*. Munchen, 19–22 May, 1987. pp. 488–499.
43. Kuzin M.A. *Vibration reliability and lifetime of centrifuge. Abstracts of III International Pyroprocessing Research Conference: IRPC-2010*. Dimitrovgrad, 2010. Vol. 29, 49 p.
44. Laptev A.G., Basharov M.M., Lapteva E.A., Farakhov T.M. *Models and efficiency of interfacial transfer processes. P. 2. Heat and mass transfer processes* [Models and efficiency of interfacial transfer processes. P. 2. Heat and mass transfer processes]. Center for Innovative Technologies. Kazan, 2020. 565 p.
45. Records A., Sutherland K. Decanter centrifuge handbook. *Alan Records, Ken Sutherland*. 1st ed. Oxford, Elsevier advanced technology, 2001. Vol. XI, 421 p.

Received: 15 June 2022.

Information about the authors

Marat Ya. Khabibullin, Cand. Sc., associate professor, Institute of Oil and Gas of Ufa State Petroleum Technological University (branch in Oktyabrsky).

УДК 622.276.63

ПЕРКОЛЯЦИОННЫЙ ПОДХОД ПРИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПРИЗАБОЙНУЮ ЗОНУ СКВАЖИНЫ

Сентемов Андрей Алексеевич¹,
sentemov.a.a@yandex.ru

Дорфман Михаил Борисович¹,
m.dorfman@narfu.ru

¹ Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова,
Россия, 163002, г. Архангельск, набережная Северной Двины, 17.

Актуальность. При планировании работ по воздействию на призабойную зону скважины важно прогнозировать ожидаемый технологический и экономический эффект. Гидродинамическое моделирование во многом упрощает эту задачу. При моделировании движения жидкостей в пористом пространстве необходимо использовать модели, учитывающие сложную структуру пор и каналов призабойной зоны пласта. Один из подходов, моделирующих сложное строение пористого пространства с помощью решётки, описывается в теории перколяции.

Цель: оценка возможности применения теории перколяции для моделирования неоднородного распределения фильтрационно-ёмкостных свойств призабойной зоны пласта.

Методы: метод моделирования, в основу которого положена перколяционная теория. В области естественных наук теория перколяции позволяет определить значения порога протекания жидкости сквозь пористое пространство со сложной структурой каналов. Моделирование пористо-трещиноватой структуры пород коллекторов нефти с помощью перколяционной решётки представляется перспективным направлением. При описании явлений фильтрации флюидов в пласте данный подход позволяет учесть неоднородность распределения фильтрационно-ёмкостных свойств призабойной зоны, сложную структуру протекания кислотных составов в пористом пространстве, фрактальный характер образования новых каналов.

Результаты. Приведены результаты моделирования кислотной обработки скважины на основе промысловых данных. Результаты моделирования с применением теории перколяции показывают хорошую сходимость расчетных показателей с фактическими данными. Перколяционный подход может применяться при осуществлении всех методов, направленных на улучшение состояния призабойной зоны пласта: закачке поверхностно-активных веществ, полимеров, комплексном заводнении, кислотных обработках и других методах воздействия.

Ключевые слова:

Гидродинамическое моделирование, фильтрационно-ёмкостные свойства, призабойная зона пласта, теория перколяции, соляно-кислотная обработка, проницаемость.

Введение

Гидродинамическое моделирование решает многие задачи в нефтегазодобывающей отрасли. Одна из них – прогнозирование показателей добычи углеводородов при рассмотрении вопроса о проведении геолого-технических работ на скважинах, оценке их эффективности для достижения проектных показателей. В существующих методах и подходах моделирования используют осреднённые данные фильтрационно-ёмкостных характеристик пласта.

Обзор применяемых подходов при моделировании червоточин в процессе соляно-кислотной обработки (СКО) приведен Р.Д. Каневской и А.В. Новиковым в работе [1]. Пример статистического подхода, позволяющего получить регрессионные уравнения, описывается в статье В.А. Новикова [2]. Заслуживает внимания работа авторов Р.А. Хузин и Г.П. Хижняк, в которой предлагается структурировать призабойную зону пласта (ПЗП) и рассчитывать эффект от кислотных обработок на основе полуэмпирической модели [3]. Следует отметить, что созданные модели позволяют достаточно достоверно прогнозировать эффект от воздействия на ПЗП. Однако подходы, описанные в работах выше, не позволяют учесть случайный характер распределения фильтрационно-ёмкостных свойств порового пространства, влияющий на формирование, направление и величины обра-

зующихся червоточин при оптимальных параметрах проведения кислотной обработки.

Для моделирования движения жидкостей в поровом пространстве необходимо использовать модели, учитывающие сложную структуру пор и каналов ПЗП. При фильтрации в пласте жидкости двигаются с малыми скоростями по каналам с малой площадью поперечного сечения. Структура и размеры каналов неоднородно распределены в пласте. Неправильная форма, меняющиеся размеры и направление каналов в породе сильно затрудняют возможности моделирования движения жидкостей в подобных системах. Поэтому появились упрощённые модели пласта с осреднёнными фильтрационно-ёмкостными показателями.

В модели идеального грунта структура порового пространства представляется каналами цилиндрической формы, параллельно ориентированными относительно направления фильтрации (рис. 1).

В модели фиктивного грунта поровое пространство представляется пустотами между шарообразными частицами одного диаметра. Размер частиц при их правильной форме не влияет на пористость модели (рис. 2). Однако при рассмотрении реальных частиц при уменьшении размера их форма становится более неправильной и снижается плотность упаковки, пористость увеличивается [4–6].

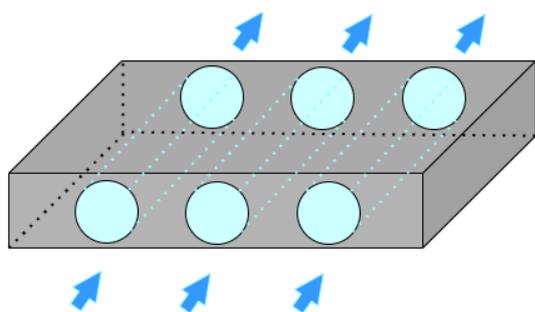


Рис. 1. Модель идеального грунта

Fig. 1. Perfect soil model

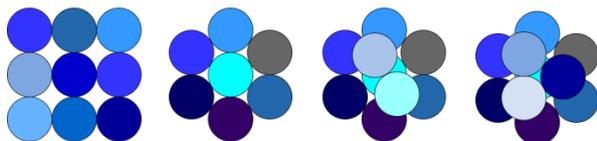


Рис. 2. Модель фиктивного грунта

Fig. 2. Fictitious soil model

Упрощённые модели не учитывают фрактальных структур распространения и движения пластовых флюидов и технологических жидкостей, закачиваемых в пласт. Работа в этом направлении может повысить точность результатов, получаемых при моделировании, для оценки эффективности мероприятий по воздействию на призабойную зону скважины.

Экспериментальная часть

На данный момент существует ряд программных продуктов, моделирующих процессы, протекающие при кислотной обработке пласта. Компьютерное моделирование предназначено для снижения затрат при СКО, увеличения производственных и экономических показателей.

Программное обеспечение для проектирования и анализа кислотной обработки STIMPRO позволяет проектировать, моделировать и анализировать процедуры закачки кислоты при давлении ниже давления гидроразрыва. Система контроля работает в режиме реального времени и допускает внесение изменений во время выполнения СКО, имеет инструменты анализа результата после выполнения задания. Система STIMPRO имеет библиотеку кислот и добавок, учитывает данные о стволе скважины, свойства коллектора. Программа предназначена для моделирования кислотной обработки карбонатных пластов и песчаников. Система STIMPRO собирает данные о ходе СКО в режиме реального времени для анализа работы, что дает лучшее понимание реакции скважины на стимуляцию и способствует оптимизации будущих обработок [7].

Симулятор большеобъемных селективных кислотных обработок (БСКО) разработан отечественной компанией ОАО «НК «Роснефть». Данный программный продукт входит в программный комплекс «Геология и добыча» и предназначен для расчёта параметров обработки, прогноза показателя продуктивности скважин и оценки экономического эффекта от проведения обработки. Программный комплекс «Геология и добыча» позволяет импортировать исходные

данные для проектирования БСКО по скважинам-кандидатам, полученные в других симуляторах программного комплекса, а также выводить результаты в форматах, совместимых с другими гидродинамическими симуляторами [8].

Более совершенными являются модели, основанные на вероятностном подходе распределения значений параметров фильтрационно-ёмкостных свойств пласта. В однофазных моделях, предназначенных для описания плоскопараллельной и плоскорадиальной фильтрации, процессы, протекающие в ПЗП, рассматриваются упрощенно, это накладывает ограничения на точность описания фильтрации и взаимодействия флюидов с породой. Двухфазные модели позволяют с достаточной точностью описать вытеснение нефти водой в ПЗП, процесс растворения карбонатной породы при кислотной обработке, оценить глубину проникновения кислотного раствора и эффективность обработки. Однако при моделировании СКО существует проблема учесть неоднородность свойств пласта вблизи забоя скважины. Эту проблему обычно решают путём осреднения [9–11].

Предлагаем решить проблему неоднородности свойств коллектора с помощью теории перколяции. Принципы теории перколяции применимы в стохастических моделях. Моделирование пористотрещиноватой структуры пород-коллекторов нефти с помощью перколяционной решётки представляется перспективным направлением в гидродинамическом моделировании [5, 12, 13].

Теория перколяции может применяться при моделировании образования электрических связей между проводящими и непроводящими ток частицами [14, 15], распространения болезней среди живых организмов [16], распространения горения материалов со сложной структурой и др. [4, 6, 17]. В области гидродинамического моделирования теория перколяции позволяет определить условия протекания флюида в пористом пространстве. При перколяционном моделировании используются регулярные решётки. Ячейка решётки имеет два состояния: открыта (проводящая) и закрыта (непроводящая). В теории перколяции существует две основных задачи: задача узлов и задача связей (рис. 3). Минимальная доля открытых узлов (связей), при которой возникает протекание, называется порогом перколяции. Данная теория позволяет получить пороговое значение для различных типов строения системы (решеток). Порог протекания является случайной величиной, находящейся в некотором интервале при конечном размере решётки, однако среднее значение порогов протекания в полученных экспериментах является неслучайной величиной в рамках решаемой задачи [18–20].

Теория перколяции имеет достаточно широкую область применения. Сложные неупорядоченные структуры нередко имеют фрактальный характер строения в определённом масштабе [21, 22]. Существуют общие методы моделирования таких структур и протекающих в них процессов. Теория перколяции применяется при описании процессов, протекающих в полимерных структурах (макромолекулярные клубки, кристаллиты и т. п.) [23–25].

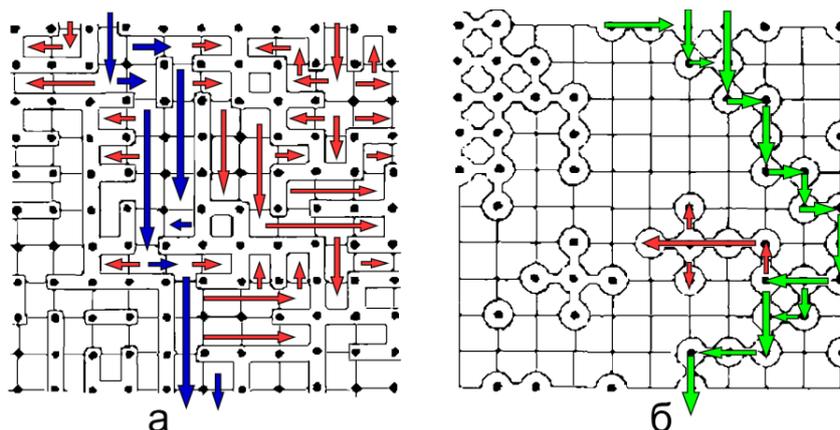


Рис. 3. Протекание по решётке: а) задача связей; б) задача узлов
Fig. 3. Lattice flow: a) link problem; б) node problem

Пример применения теории перколяции при полимерных средах – это процесс гелеобразования, который заключается в слиянии молекул полимера. Гель образуется, когда появляются связи (агрегаты), захватывающие всю систему. Считается, что процесс определяется температурой, концентрацией молекул и вероятностью образования связей между ними. Процесс гелеобразования является смешанной задачей теории перколяции [23, 26, 27].

Теория перколяции может применяться при моделировании горения полимерных структур. Учитывается природа частиц и волокон, образующих материал, их случайная ориентация в пространстве и возможность теплопроводности [9, 16].

Теория перколяции находит применение в сфере биологии и экологии. Может определяться время и площадь озеленения территории, например, после лесного пожара. На участке случайным образом расставляются центры окружностей одинакового радиуса. Задача состоит в нахождении числа центров окружностей на единицу площади, при котором все окружности будут иметь точки пересечения, образуя бесконечный кластер [17].

Теория перколяции применяется при описании магнитных фазовых переходов. При химическом допировании на атомах кислорода появляются дырки, возникает конкурирующее ферромагнитное действие между спинами атомов, происходит движение появившихся дырок и разрушается антиферромагнитный порядок. Теория перколяции используется при определении порогового значения, при котором антиферромагнетик превращается в парамагнетик. Задача решается на квадратной решётке, является комбинированной для узлов и связей [15, 27, 28].

Метод перколяции может применяться и при моделировании методов увеличения нефтеотдачи: закачка ПАВ, полимеров, комплексное заводнение, кислотные обработки и другие методы воздействия. При гидродинамическом моделировании с применением теории перколяции основная цель – учесть особенности строения порового пространства и изменение его структуры при взаимодействии с закачиваемым агентом [23, 29, 30].

Проницаемость пласта определяется наличием, величиной и структурой поровых каналов. Можно представить структуру пласта с учётом неоднородного распределения фильтрационно-ёмкостных свойств как пространственную решётку капилляров. Радиусы капилляров в такой модели распределяются согласно реальной порометрической кривой – функцией плотности распределения поровых каналов по радиусам.

Перколяционная модель с анизотропным распределением проницаемости среды предложена в работах [24, 31]. Модель использует теорию бесконечного кластера Шкловского–де-Жена (рис. 4), согласно которой проводимость материала определяется проводимостью его скелета.

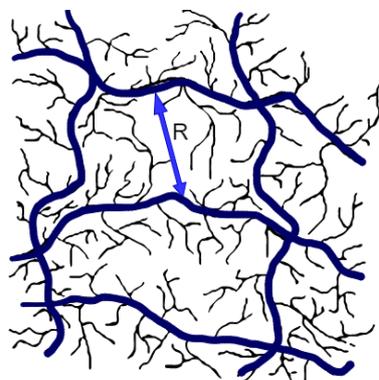


Рис. 4. Схематичное представление структуры бесконечного кластера

Fig. 4. Schematic representation of the infinite cluster structure

В модели кластер состоит из проводящих цепочек, формирующихся из гидравлически связанных поровых каналов различного радиуса. Общая проницаемость цепочки определяется наименьшим радиусом канала, который является определяющим параметром кластера (R).

В двухмерном случае перколяционной решётки цепочки проводимости лежат в одной плоскости, в трёхмерном же варианте цепочки могут иметь более сложную форму, образуя фрактальные структуры. В работе [21] авторы предлагают алгоритм, определя-

ющий среднюю проводимость трёхмерной решётки на единицу длины. Предлагаются коэффициенты, учитывающие влияние перетоков между параллельными каналами и фрактальную структуру каналов.

В процессе разработки при изменении направления фильтрации, смене относительных фазовых проницаемостей, изменении обводнённости может возникать гистерезис относительных фазовых проницаемостей. Это явление необходимо учитывать при моделировании, иначе возможны ошибки. Выделяют два основных механизма возникновения гистерезиса – образование нефтяной плёнки на поверхности каналов при фильтрации с последующей гидрофобизацией поверхности порового пространства и перемещение флюидов, которое приводит к изменению реологических свойств жидкостей [32–34].

В работе [35] описывается механизм прохождения нефти через каналы изначально с гидрофильными свойствами поверхности, которые меняются в процессе фильтрации. Предлагается модель пористой среды с микрогетерогенной смачиваемостью, в которой выделяются доли каналов с постоянными и меняющимися свойствами. Предложенный вариант позволяет учесть изменение относительных фазовых проницаемостей при изменении водонасыщенности.

Основная задача теории перколяции – определить возможность протекания (проницаемости) сквозь структуру и при каком пороговом значении физических и геометрических параметров происходит изменение. Порог протекания является случайной величиной, находящийся в некотором интервале при конечном размере решётки, однако среднее значение всех порогов протекания в полученных экспериментах является неслучайной величиной (табл. 1).

При моделировании процесса протекания по принципам инвазивной перколяции пространство разбивается на ячейки, которым присваиваются случайные численные значения в заданном интервале, определяющие их проницаемость. В процессе моделирования закачиваемый агент проникает в ячейки с

наибольшими значениями. При достижении крайней ячейки области процесс завершается [17, 35, 36].

Таблица 1. Значения порогов протекания для разных типов сеток

Table 1. Values of percolation thresholds for different types of grids

Тип решётки Grid type	Порог протекания Percolation threshold	
	для задачи связей for the link problem	для задачи узлов for the node problem
Квадратная/Square	0,5	0,59
Треугольная/Triangular	0,347	0,5
Простая кубическая/Simple cubic	0,25	0,31
Объёмно-центрированная Body centered cubic	0,18	0,25

Вышеописанный принцип инвазивной перколяции может быть применён в процессе моделирования СКО. Следует использовать значения проницаемости для задания их ячейкам. Кислотный раствор будет проникать в зоны с большей проницаемостью, при взаимодействии с коллектором будет увеличивать её, образуя каналы растворения в ПЗП.

Результаты и их обсуждение

Данный подход прогнозирования эффективности СКО был реализован по результатам проведения работ в скважине № 70 Западно-Сихорейского нефтяного месторождения. Месторождение приурочено к небольшому трехкупольному поднятию в отложениях верхнего фанена. Разрабатываемый продуктивный пласт на месторождении один – ДФ4. Пласт по компонентному составу представлен известняками (средняя карбонатность 97 %), имеет неоднородную структуру, всего 13 пропластков. Вскрытый бурением интервал является карбонатным коллектором с каверново-поровым типом пустотного пространства. Эксплуатация скважины проводится открытым стволом. Основные геолого-промысловые данные по скважине представлены в табл. 2.

Таблица 2. Основные геолого-промысловые данные

Table 2. Basic geological and field data

Характеристика пласта ДФ4 DF4 formation	Значение Value	Характеристика по скв. № 70 Well № 70	Значение Value
Коэффициент пористости Porosity	6,8	Дебит, м ³ /сут Oil rate, m ³ /day	70
Коэффициент проницаемости, мД Permeability, mDa ²	69,7	Коэффициент проницаемости, мД Permeability, mDa ²	12
Нефтенасыщенная толщина, м Oil-saturated thickness, m	6,8	Забойное давление, МПа Bottom hole pressure, MPa	14,05
Пластовая температура, °С Reservoir temperature, °C	69,2	Радиус ПЗП, м Bottomhole zone radius, m	3,2
Плотность нефти, кг/м ³ Oil density, kg/m ³	868	Скин фактор Skin factor	13,8
Геологические запасы, тыс. т Geological reserves, k tons	801	Коэф. продуктивности, м ³ /сут·МПа Productivity index, m ³ /day·MPa	10,1
Пластовое давление, МПа Reservoir pressure, MPa	30,65	Радиус скважины, м Well radius, m	0,171

По результатам гидродинамических исследований скважины № 70 проницаемость ПЗП этой скважины ухудшена в радиусе 3,2 м вследствие кольматации

при бурении. Для восстановления продуктивности была проведена СКО. Кислотная обработка была произведена в объеме 3,5 м³ 15 % раствора HCl. С це-

лю оценки эффективности СКО производился контроль технологических параметров работы скважины: устьевого давления, динамического уровня, дебита по жидкости и нефти. Согласно промысловым отчётам коэффициент продуктивности скважины № 70 увеличился в полтора раза до $15,7 \text{ м}^3/(\text{сут} \cdot \text{МПа})$.

Моделирование воздействия на призабойную зону пласта осуществлялось с применением гидродинамического симулятора tNavigator. Геологическая модель имела параметры сетки $100 \times 100 \times 10 \text{ м}$. Сетка в области ПЗП для большей точности моделирования была измельчена дополнительно. Данные по пористости модели были взяты из промысловых данных и адаптированы для модели с помощью нормального распределения. Проницаемость ячеек определялась согласно зависимости пористости от проницаемости по уравнению связи (1):

$$Lg K_{пр} = 0,376 K_p - 2,885, \quad (1)$$

где K_p – коэффициент пористости; $K_{пр}$ – коэффициент проницаемости, полученный в результате исследования керна с каверново-поровым типом пустотного пространства.

Моделирование загрязнения ПЗП осуществлялось путем снижения проницаемости в данной зоне. Снижение проницаемости определялось по результатам гидродинамических исследований. Далее производился расчет гидродинамической модели.

В программном продукте Matlab создавалась модель на основе инвазивной перколяции. После этого результаты расчётов в Matlab загружались в tNavigator, где выполнялся расчет гидродинамической модели. Проницаемость в зонах проникновения кислотного раствора оценивалась в результате проведения многовариантного моделирования и была принята равной 250 мД. Графическая иллюстрация моделирования каналов проникновения кислоты показана на рис. 5.

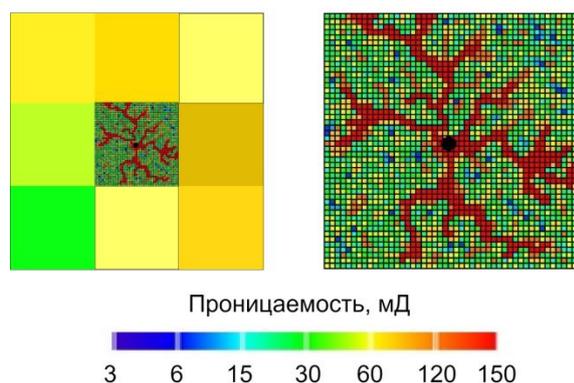


Рис. 5. Изменение проницаемости при моделировании кислотной обработки

Fig. 5. Permeability change in acid treatment simulation

По результатам моделирования работы скважины до и после СКО построены графики среднемесячных дебитов жидкости и нефти для сравнения фактических данных после стимуляции и расчетных показателей (рис. 6, 7). Разница в фактической и расчетной

накопленной добыче составляет по нефти $332,2 \text{ м}^3$, по жидкости $1337,9 \text{ м}^3$, а погрешность расчета не превышает 7 %.

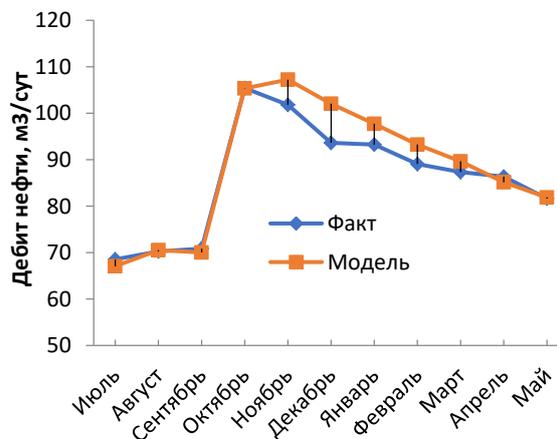


Рис. 6. Результат расчёта модели для дебита скважины по нефти

Fig. 6. Simulation result for oil flow rate

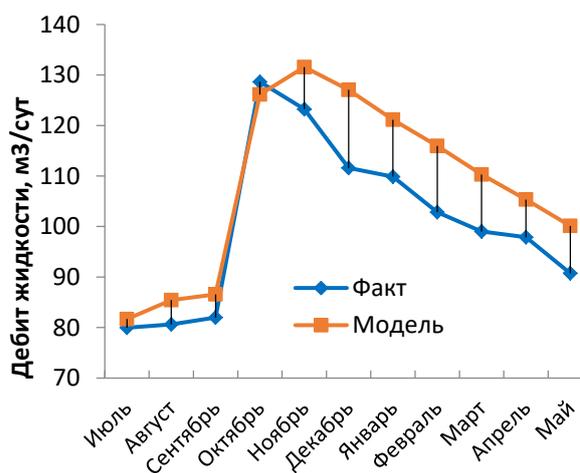


Рис. 7. Результат расчёта модели для дебита скважины по жидкости

Fig. 7. Simulation result for liquid flow rate

Заключение

Применение теории инвазивной перколяции для стохастических процессов фильтрации активных растворов позволяет достаточно точно смоделировать проникновение кислотного раствора в призабойную зону. В этом случае удастся учесть неоднородность фильтрационных характеристик пористости и проницаемости, случайный характер создаваемых каналов. Апробация данного подхода по результатам кислотного воздействия в скважине № 70 Западно-Сихорейского месторождения показывает хорошую сходимость расчетных показателей с фактическими.

Стоит отметить, что при использовании перколяционного подхода имеют место сложности, связанные с дискретизацией объекта (ПЗП). В связи с этим возникает необходимость определения минимального

размера ячейки для соответствия физического масштаба протекающих процессов масштабу модели. При моделировании необходимо учитывать существенное различие типов коллекторов – от чисто трещинных до порово-кавернозных. Дополнительно необходимо, наряду с моделированием червоточин методом перколяции, определять технологический режим проведения кислотной обработки с расчётом параметров закачки (расхода и объёма закачки, давления и т. д.).

На настоящий момент перколяционный подход недостаточно применяется при моделировании процессов гидродинамики, в частности воздействия на

ПЗП различными реагентами. Для дальнейшего развития этого направления необходимо продолжить целенаправленные лабораторные исследования и обработку промысловых данных по воздействию на ПЗП.

Вышеописанный подход к прогнозированию эффективности геолого-технических мероприятий можно реализовать при планировании всех мероприятий, направленных на изменение состояния фильтрационных характеристик ПЗП: селективную водоизоляцию, гидрофобизацию с изменением смачиваемости породы и т. п. В каждом отдельном случае необходимо определять и моделировать критический параметр, влияющий на изменение фильтрации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каневская Р.Д., Новиков А.В. Методы моделирования червоточин при соляно-кислотном воздействии на карбонатные пласты // Нефтепромысловое дело. – 2018. – № 3. – С. 19–28.
2. Новиков В.А. Прогнозирование эффективности кислотного воздействия на основе построения математических моделей, учитывающих технологию и используемую композицию // Технологии нефти и газа. – 2021. – № 1 (132). – С. 30–35.
3. Хузин Р.А., Хижняк Г.П. Моделирование многократных кислотных обработок карбонатных коллекторов с учетом комплексного строения околоскважинной зоны пласта // Евразийское Научное Объединение. – 2020. – № 3–6 (61). – С. 421–426
4. Acheampong T., Phimister E., Kemp A. An optimisation model for incentivising the development of marginal oil and gas fields amidst increasingly complex ownership patterns: UKCS case study // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2021. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.109109.
5. Garrouch A.A., Jennings A.R. A contemporary approach to carbonate matrix acidizing // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – V. 158. – P. 129–143. DOI: 10.1016/j.petrol.2017.08.045.
6. Kinetic modeling of malondialdehyde reactivity in oil to simulate actual malondialdehyde formation upon lipid oxidation / A. Vandemoortele, P.M. Heynderickx, L. Leloup, B. de Meulenaer // Food Research International. – 2021. – V. 140. DOI: 10.1016/j.foodres.2020.110063.
7. Matuz T., Rathinaswamy B. Habituation of visual evoked responses in neonates and fetuses: a MEG study // Developmental Cognitive Neuroscience. – 2012. – V. 2. – Iss. 3. – P. 303–316. DOI: 10.1016/j.dcn.2012.03.001.
8. Математическое моделирование и оптимизация солянокислотных обработок скважин в карбонатных коллекторах / Г.Т. Булгакова, Р.Я. Харисов, А.Р. Шарифуллин, А.В. Пестриков // Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть». – 2014. – № 35. – С. 22–29.
9. Ali M.T., Ezzat A.A., Nasr-El-Din H.A. A model to simulate matrix-acid stimulation for wells in dolomite reservoirs with vugs and natural fractures // SPE journal. – 2020. – V. 25. – № 2. – P. 609–631.
10. Experimental investigation of acid imbibition on matrix and fractured carbonate rich shales / T.W. Teklu, H.N. Abass, R. Hanashmoon, J.C. Carratu, M. Ermila // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2017. – V. 45. – P. 706–725. DOI: 10.1016/j.jngse.2017.06.001.
11. Ndonhong V., Belostrino E., Zhu D. Acid jetting in carbonate rocks: an experimental study // SPE Production & Operations. – 2018. – № 33 (02). – P. 382–392. DOI: 10.2118/180113-PA.
12. Вольнов И.А., Каневская Р.Д. Моделирование солянокислотного воздействия на карбонатные коллектора // Нефтяное хозяйство. – 2009. – № 7. – С. 97–99.
13. Дорфман М.Б., Сентемов А.А. Влияние фильтрационно-ёмкостных свойств призабойной зоны пласта на эффективность кислотной обработки // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 2. – С. 124–130.
14. Энергия связи электронов или дырок в кластерах Cu–O: точная диагонализация гамильтониана Эмери / В.Ф. Ельсин, В.А. Кашурников, Л.А. Опёнов, А.И. Подливаев // Письма ЖЭТФ. – 1991. – № 99 (1). – С. 237–248.
15. Zhao Y., Khandagale P., Majidi C. Modeling electromechanical coupling of liquid metal embedded elastomers while accounting stochasticity in 3D percolation // Extreme Mechanics Letters. – 2021. – V. 48. DOI: 10.1016/j.eml.2021.101443.
16. Epidemics, the Ising-model and percolation theory: a comprehensive review focused on Covid-19 / I.F. Mello, L. Squillante, G.O. Gomes, A.C. Seridonio, M. de Souza // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2021. – V. 573. DOI: 10.1016/j.physa.2021.125963.
17. Deep neural networks predicting oil movement in a development unit / P. Temirchev, M. Simonov, R. Kostoev, E. Burnaev, I. Oseledets, A. Akhmetov, A. Margarit, A. Sitnikov, D. Koroteev // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2020. – V. 184. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106513.
18. Coastlines and percolation in a model for hierarchical random deposition / J. Berx, E. Bervoets, C.V. Giuraniuc, J.O. Indekeu // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2021. – V. 574. DOI: 10.1016/j.physa.2021.125998.
19. Hamidreza H., Behmanesh H., Clarkon Ch.R. A semi-analytical approach for analysis of the transient linear flow regime in tight reservoirs under three-phase flow conditions // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2018. – V. 54. – P. 283–296. DOI: 10.1016/j.jngse.2018.04.004.
20. Kadet V.V., Galechyan A.M. Accounting for fluid rheology in the hydrophobization model of relative permeability hysteresis // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2017. – V. 58. – Iss. 6. – P. 1004–1012.
21. Liu J., Regenauer-Lieb K. Application of percolation theory to microtomography of rocks // Earth-Science Reviews. – 2021. – V. 214. DOI: 10.1016/j.earscirev.2021.103519.
22. Liu Y., Wilkinson A. Rheological percolation behaviour and fracture properties of nanocomposites of MWCNTs and a highly crosslinked aerospace-grade epoxy resin system // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2018. – V. 105. – P. 97–107.
23. Caio S.A., Darllen G., Heloysa M.C. An on-line system using ion-imprinted polymer for preconcentration and determination of bismuth in seawater employing atomic fluorescence spectrometry // Talanta. – 2018. – V. – 184. – P. 87–92. DOI: 10.1016/j.talanta.2018.02.089.
24. Grabowski K., Zbyrad P. Multiscale electro-mechanical modeling of carbon nanotube composites // Computational Materials Science. – 2017. – V. 135. – P. 169–180. DOI: 10.1016/j.commatsci.2017.04.019.
25. Theoretical modeling and experimental verification of percolation threshold with MWCNTs' rotation and translation around a growing bubble in conductive polymer composite foams / S. Wang, Y. Huang, Ch. Zhao, E. Chang, A. Ameli, H.E. Naguib, Ch.B. Park // Composites Science and Technology. – 2020. V. – 199. DOI: 10.1016/j.compscitech.2020.108345.
26. Zhao S., Zhu D., Bai B. Experimental study of degradable preformed particle gel (DPPG) as temporary plugging agent for carbonate reservoir matrix acidizing to improve oil recovery // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2021. – V. 205. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.108760.

27. Абдулалиев Ф.А., Бельшина Ю.Н. Применение теории перколяции для описания фрактального структурообразования элементов в неоднородных средах на примере горения полимерных материалов при пожаре // Современные проблемы гражданской защиты. – 2016. – № 2 (19). – С. 21–24.
28. Aryanfar A., Medlej S., Tarhini Goddard A. III. 3D percolation modeling for predicting the thermal conductivity of graphene-polymer composites // Computational Materials Science. – 2021. – V. 197. DOI: 10.1016/j.commatsci.2021.110650.
29. Иудин Ф.Д., Иудин Д.И., Казанцев В.Б. Перколяционный переход в активных нейронных сетях с адаптивной геометрией // Письма в ЖЭТФ. – 2015. – № 101 (4). – С. 289–293.
30. Multi-range percolation model on the square lattice / C.S. do Amaral, M. Schnabel, B.N.B. de Lima, A.P.F. Atman // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2019. – V. 535. DOI: 10.1016/j.physa.2019.122383.
31. Percolation and conductivity development of the rod networks within randomly packed porous media / W. Mingzhi, L. Yushi, Q. Beimeng, A. Abir, W. Wei // Composites Part B: Engineering. – 2020. – V. 187. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.107837.
32. Li W., Wang Z., Qiao L. Determination of the optimal spacing of water curtain boreholes for underground oil storage from the perspective of percolation theory // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2020. – V. 97. DOI: 10.1016/j.tust.2019.103246.
33. Kadet V.V., Maximenko A.A. Determination of relative permeabilities using the network models of porous media // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2000. – V. 28. – Iss. 3. – P. 145–152.
34. Application and development trend of artificial intelligence in petroleum exploration and development / Lichun Kuang, He Liu, Yili Ren, Kai Luo, Mingyu Shi, Jian Su, Xin Li // Petroleum Exploration and Development. – 2021. – V. 48. – Iss. 1. – P. 1–14. DOI: 10.1016/S1876-3804(21)60001-0.
35. Variations in bounding and scanning relative permeability curves with different carbonate rock types / M.R. Dernaika, M.A. Basioni, A. Dawoud, M.Z. Kalam, S.M. Skjæveland // Paper SPE 162265. 2012 Abu Dhabi International Petroleum Conference and Exhibition. – Abu Dhabi, 2012. – P. 11–14.
36. Fangbo X., Zhiping X., Yakobson B.I. Site-percolation threshold of carbon nanotube fibers – Fast inspection of percolation with Markov stochastic theory // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2014. – V. 407. – P. 341–349. DOI: 10.1016/j.physa.2014.04.013.

Поступила 22.06.2022 г.

Информация об авторах

Сентемов А.А., аспирант кафедры бурения скважин, разработки нефтяных и газовых месторождений Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова.

Дорфман М.Б., кандидат технических наук, доцент кафедры бурения скважин, разработки нефтяных и газовых месторождений Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова.

UDC 622.276.63

PERCOLATION APPROACH IN RESERVOIR SIMULATION OF WELL TREATMENT METHODS

Andrey A. Sentemov¹,
sentemov.a.a@yandex.ru

Mikhail B. Dorfman¹,
m.dorfman@narfu.ru

¹ Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov,
17, Severnaya Dvina embankment, Arkhangelsk, 163002, Russia.

Relevance. When planning the operation of bottomhole zone treatment, it is important to predict the obtained technological and economic effect. Hydrodynamic modeling is a very useful tool to achieve this aim. When modeling the movement of fluids in a porous space, it is necessary to use models that take into account the complex structure of pores and channels in the bottomhole zone. One of the approaches, modelling the reservoir complex structure with using grids, is described by the percolation theory.

The main aim of this work is to evaluate the possibility of using the percolation theory to simulate the heterogeneous reservoir properties of the bottomhole zone.

Methods: modeling method based on the percolation theory. In the field of natural sciences, the percolation theory is used to determine the values of the percolation threshold for fluid flow through a porous space with a complex channel structure. Modeling the porous space of oil reservoir using a percolation theory seems to be a promising direction. This approach takes into account the heterogeneity of bottomhole zone reservoir properties, the complex structure of the acid compositions flow in the porous space and the fractal nature of formation of new channels.

Results. The article presents the results of modeling a well acidizing based on field data. The simulation results using the percolation theory show a good convergence of the calculated indicators with the actual data. The percolation method can also be used to simulate enhanced oil recovery methods: injection of surfactants, polymers, complex water flooding, acid treatments, and other methods. In hydrodynamic modeling, describing the movement of fluids in porous space the percolation approach aims to take into account the features of pore channels structure and the interaction of fluids with surface of formation.

Key words:

Hydrodynamic modeling, reservoir properties, bottomhole zone, percolation theory, matrix acidizing, permeability.

REFERENCES

- Kanevskaya R.D., Novikov A.V. Methods of wormholes simulation under hydrochloric acid impact on carbonate formations. *Oil field engineering*, 2018, no. 3, pp. 19–28. In Rus.
- Novikov V.A. Forecasting efficiency of acid impact on the basis of construction of mathematical models taking into account the technology and used composition. *Oil and Gas Technologies*, 2021, no. 1 (132), pp. 30–35. In Rus.
- Khuzin R.A., Khizhniak G.P. Modelirovanie mnogokratnykh kislotnykh obrabotok karbonatnykh kollektorov s uchetom kompleksnogo stroeniya okoloskvazhinnoy zony plasta [Modeling multiple acid treatments of carbonate reservoirs taking into account the complex structure of the near-wellbore formation zone]. *Eurasian scientific association*, 2020, no. 3–6 (61), pp. 421–426.
- Acheampong T., Phimister E., Kemp A. An optimisation model for incentivising the development of marginal oil and gas fields amidst increasingly complex ownership patterns: UKCS case study. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.109109.
- Garrouch A.A., Jennings A.R. Contemporary approach to carbonate matrix acidizing. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, no. 158, pp. 129–143. DOI: 10.1016/j.petrol.2017.08.045.
- Vandemoortele A., Heynderickx P.M., Leloup L., De Meulenaer B. Kinetic modeling of malondialdehyde reactivity in oil to simulate actual malondialdehyde formation upon lipid oxidation, *Food Research International*, 2021, no. 140. DOI: 10.1016/j.foodres.2020.110063.
- Matuz T., Rathinaswamy B. Habituation of visual evoked responses in neonates and fetuses: a MEG study. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 2012, no. 2, Iss. 3, pp. 303–316. DOI: 10.1016/j.dcn.2012.03.001.
- Bulgakov G.T., Kharisov R.Ya., Sharifullin A.R., Pestrikov A.V. Mathematical modeling and optimizing the design of matrix treatments in carbonate reservoirs. *Scientific and technical bulletin of Rosneft Oil Company*, 2014, no. 35, pp. 22–29. In Rus.
- Ali M.T. A model to simulate matrix-acid stimulation for wells in dolomite reservoirs with vugs and natural fractures. *Spe Journal*, 2020, vol. 25, no. 2, pp. 609–631.
- Teklu T.W., Abass H.H. Experimental investigation of acid imbibition on matrix and fractured carbonate rich shales. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2017, vol. 45, pp. 706–725. DOI: 10.1016/j.jngse.2017.06.001.
- Ndonghong V. Acid jetting in carbonate rocks: an experimental study. *SPE Production & Operations*, 2018. vol. 33 (02), pp. 382–392. DOI: 10.2118/180113-PA.
- Kanevskaya R.D., Volnov I.A. Acidizing simulation of carbonate reservoir. *Oil industry*, 2009, no. 7, pp. 97–99. In Rus.
- Dorfman M.B., Sentemov A.A. Influence of reservoir properties of the bottomhole zone on acidizing efficiency. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 2, pp. 124–130. In Rus.
- Elsin V.F., Kashurnikov V.A., Openov L.A., Podlivaev A.I. Energiya svyazi elektronov ili dyrok v klasterakh Cu–O: tochnaya diagonalizatsiya Gamiltoniana Emeri [Binding energy of electrons or holes in Cu–O clusters: an exact diagonalization of the Emery Hamiltonian]. *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters (JETP Letters)*, 1991, no. 99 (1), pp. 237–248.
- Zhao Y. Modeling electromechanical coupling of liquid metal embedded elastomers while accounting stochasticity in 3D percolation. *Extreme Mechanics Letters*, 2021, vol. 48. DOI: 10.1016/j.eml.2021.101443.
- Mello I.F., Squillante L., Gomes G.O., Seridonio A.C., De Souza M. Epidemics, the Ising-model and percolation theory: a comprehensive review focused on Covid-19. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2021, vol. 573. DOI: 10.1016/j.physa.2021.125963.
- Simonov M., Kostoev R., Burnaev E., Oseledets I., Akhmetov A., Margarit A., Sitnikov A., Koroteev D., Temirchev P. Deep neural networks predicting oil movement in a development unit. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, vol. 184. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106513.

18. Berx J., Bervoets E., Giuraniuc C.V., Indekeu J.O. Coastlines and percolation in a model for hierarchical random deposition. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2021, vol. 574. DOI: 10.1016/j.physa.2021.125998.
19. Hamdi H., Behmanesh H., Clarkson R. A semi-analytical approach for analysis of the transient linear flow regime in tight reservoirs under three-phase flow conditions. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, vol. 54, pp. 283–296. DOI: 10.1016/j.jngse.2018.04.004.
20. Kadet V.V., Galechyan A.M. Accounting for fluid rheology in the hydrophobization model of relative permeability hysteresis. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2017, vol. 58, Iss. 6, pp. 1004–1012.
21. Liu J., Regenauer-Lieb K. Application of percolation theory to microtomography of rocks. *Earth-Science Reviews*, 2021, vol. 214. DOI: 10.1016/j.earscirev.2021.103519.
22. Liu Y., Wilkinson A. Rheological percolation behaviour and fracture properties of nanocomposites of MWCNTs and a highly crosslinked aerospace-grade epoxy resin system. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, vol. 105, pp. 97–107.
23. Cao S.A., Darllen G., Heloysa M.C. An on-line system using ion-imprinted polymer for preconcentration and determination of bismuth in seawater employing atomic fluorescence spectrometry. *Talanta*, 2018, vol. 184, pp. 87–92. DOI: 10.1016/j.talanta.2018.02.089.
24. Grabowski K., Zbyrad P. Multiscale electro-mechanical modeling of carbon nanotube composites. *Computational Materials Science*, 2017, vol. 135, pp. 169–180. DOI: 10.1016/j.commatsci.2017.04.019.
25. Sai Wang, Yifeng Huang, Chongxiang Zhao, Eunse Chang, Amir Ameli, Hani E. Naguib, Chul B. Park. Theoretical modeling and experimental verification of percolation threshold with MWCNTs' rotation and translation around a growing bubble in conductive polymer composite foams. *Composites Science and Technology*, 2020, vol. 199. DOI: 10.1016/j.compscitech.2020.108345.
26. Zhao S., Zhu D., Baojun Bai. Experimental study of degradable preformed particle gel (DPPG) as temporary plugging agent for carbonate reservoir matrix acidizing to improve oil recovery. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, vol. 205. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.108760.
27. Abdulaliev F.A., Belshina Y.N. The application of percolation theory to describe the fractal structure of the elements in inhomogeneous media by the example of combustion of polymer materials in case of fire. *Modern problems of civil protection*, 2016, no. 2 (19), pp. 21–24. In Rus.
28. Aryanfar A., Medlej S. 3D percolation modeling for predicting the thermal conductivity of graphene-polymer composites. *Computational Materials Science*, 2021, vol. 197. DOI: 10.1016/j.commatsci.2021.110650.
29. Iudin F.D., Iudin D.I., Kazantsev V.B. Perkolyatsionny perekhod v aktivnykh neyronnykh setyakh s adaptivnoy geometriyey [Percolation transition in active neural networks with adaptive geometry]. *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters (JETP Letters)*, 2015, no. 101 (4), pp. 289–293.
30. Do Amaral C.S., Schnabel M., De Lima B.N.B., Atman A.P.F. Multi-range percolation model on the square lattice. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2019, vol. 535. DOI: 10.1016/j.physa.2019.122383.
31. Mingzhi W., Yushi L., Beimeng Q., Abir A., Wei W. Percolation and conductivity development of the rod networks within randomly packed porous media. *Composites Part B: Engineering*, 2020, vol. 187. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.107837.
32. Li W., Wang Z., Qiao L. Determination of the optimal spacing of water curtain boreholes for underground oil storage from the perspective of percolation theory. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, vol. 97. DOI: 10.1016/j.tust.2019.103246.
33. Kadet V.V., Maximenko A.A. Determination of relative permeabilities using the network models of porous media. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2000, vol. 28, Iss. 3, pp. 145–152.
34. Lichun Kuang, He Liu, Yili Ren, Kai Luo, Mingyu Shi, Jian Su, Xin Li. Application and development trend of artificial intelligence in petroleum exploration and development. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, vol. 48, Iss. 1, pp. 1–14. DOI: 10.1016/S1876-3804(21)60001-0.
35. Dernaika M.R., Basoni M.A., Dawoud A., Kalam M.Z., Skjæveland S.M. Variations in bounding and scanning relative permeability curves with different carbonate rock types. *Paper SPE 162265. 2012 Abu Dhabi International Petroleum Conference and Exhibition. Abu Dhabi*, 2012. pp. 11–14.
36. Fangbo X., Zhiping X., Yakobson B.I. Site-percolation threshold of carbon nanotube fibers—Fast inspection of percolation with Markov stochastic theory. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2014, no. 407, pp. 341–349. DOI: 10.1016/j.physa.2014.04.013.

Received: 22 June 2022.

Information about the authors

Andrey A. Sentemov, post-graduate student, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov.

Mikhail B. Dorfman, Cand. Sc., associate professor, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov.

УДК 62-533.7

РЕЖИМЫ РАБОТЫ УСТАНОВОК ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ С МНОГОУРОВНЕВОЙ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Михальченко Сергей Геннадьевич¹,
msg@ie.tusur.ru

Семенов Сергей Михайлович²,
ssm@tpu.ru

Тимошкин Вадим Владимирович²,
timoshkinvv@tpu.ru

Попов Семен Семенович²,
ssp14@tpu.ru

Воронина Наталья Алексеевна²,
voronina@tpu.ru

Афанасьев Кирилл Сергеевич³,
afanks@tpu.ru

¹ Томский университет систем управления и радиоэлектроники,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.

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

³ АО «НПЦ «Полюс»,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Кирова, 56в.

Актуальность исследования обуславливается необходимостью улучшения показателей качества выходных напряжения и тока автономных инверторов напряжения в установках электроцентробежных насосов, применяющихся в нефтедобыче. К основным факторам, позволяющим повысить эти показатели качества, можно отнести: использование перспективных топологий силовой части и современных силовых полупроводниковых ключей, внедрение новых алгоритмов управления. В электроприводах, где применяются частотные преобразователи, возникают негативные факторы, влияющие на функционирование нефтепогружного кабеля и погружного асинхронного двигателя. Несинусоидальность напряжений на выходе преобразователя частоты приводит к повышенному износу изоляции питающей кабельной линии, а также негативно влияет на изоляцию обмоток асинхронного двигателя и снижает показатели качества систем управления электроприводом. Следовательно, поиск путей для улучшения качества выходного напряжения и тока автономных инверторов напряжения в установках электроцентробежных насосов является актуальной задачей.

Цель: разработка алгоритмов для улучшения показателей надежности работы многоуровневых преобразователей и повышение качества гармонического состава выходного напряжения и тока автономных инверторов напряжения в составе электропривода погружного нефтедобывающего насоса.

Объект: автономные инверторы напряжения в составе электропривода погружного нефтедобывающего насоса.

Методы и средства: теория надежности, гармонический анализ, функциональные схемы, коммутационные функции, топология электрических цепей силовых преобразователей, численные методы решения дифференциальных уравнений, быстрое преобразование Фурье, Matlab Simulink.

Результаты. Продемонстрировано значительное улучшение показателей качества тока и напряжения в многоуровневых преобразователях в составе электропривода погружного нефтедобывающего насоса. Рассмотрены возможные способы повышения показателей надежности путем изменения варианта компоновки топологии схемы, при этом вероятность безотказной работы по сравнению с классической компоновкой повысилась с 23,70 до 66,10 %. Установлено, что регулирование частоты коммутации в зависимости от режимов работы в многоуровневых инверторах позволит рационально управлять динамическими потерями и нагрузками на силовые ключи.

Ключевые слова:

Нефтедобыча, погружной двигатель, преобразователь частоты, широтно-импульсная модуляция, гармонические составляющие, многоуровневый инвертор.

Введение

В России сосредоточены большие запасы нефти, которые с течением времени постепенно истощаются, поэтому добывающие компании вынуждены переходить к месторождениям с трудноизвлекаемой нефтью и со значительными затратами на её добычу [1, 2]. Общая себестоимость извлекаемой нефти складывается из многих факторов: климат, удалённость месторождений от инфраструктуры, глубина залегания нефти, качество нефтепродуктов, а также от производительности используемого оборудования [3–5]. Значительная часть себестоимости формируется из затрат на электроэнергию, необходимую для питания электрооборудования. Внедрение частотно-регулируемых электро-

приводов для установок добычи нефти позволило значительно повысить их энергоэффективность и качество управления. Однако многочисленные исследования показали, что при использовании частотного преобразователя в составе электропривода снижается средняя наработка на отказ электродвигателя и кабеля [6]. В процессе эксплуатации установок электроцентробежных насосов (УЭЦН) с частотными преобразователями (ПЧ) наблюдается ускоренный износ изоляции погружного кабеля. Результатом является оплавление жил и междуфазное замыкание, что приводит к срабатыванию защиты и уходу установки в аварийный останов. Одной из основных причин ускоренного старения изоляции является форма токов и напряже-

ний, которые формируются ПЧ. Полупроводниковые ключи, формирующие выходное напряжение ПЧ, коммутируют с большой частотой, что приводит к появлению существенных градиентов нарастания напряжения и, как следствие, к возникновению перегрузок в кабеле. Таким образом, на участках кабеля формируется повышенное напряжение, что способствует его быстрому износу. Аналогично несинусоидальные токи и напряжения оказывают негативное влияние на асинхронный двигатель (АД), что не учтено в его паспортных данных, где указываются номинальные параметры при работе от источника с синусоидальным напряжением и заданной частотой. В электроприводе с частотным преобразователем в обмотках погружного электродвигателя возникают коронные разряды, которые приводят к ускоренному износу изоляции и последующему выходу из строя электрической машины. Следствием отказов кабеля или погружного двигателя является остановка УЭЦН из-за срабатывания систем защиты и последующие финансовые потери, вызванные простоем скважины и ремонтом оборудования [7–11].

У ПЧ можно выделить следующие недостатки: генерация высших гармоник и несинусоидальность выходного напряжения. Для решения этих проблем можно использовать синусоидальные фильтры или изменить силовую часть ПЧ и системы управления. Из-за большой длины питающего кабеля его можно рассматривать как фильтр, который имеет свои ёмкости и индуктивности и частично уменьшает амплитуду высших гармоник тока, но его изоляция испытывает по-прежнему перегрузки, вызванные существенными градиентами нарастания напряжения [12]. Одним из вариантов, позволяющих повысить качество выходного напряжения, является многоуровневая широтно-импульсная модуляция (ШИМ). Такой подход дает возможность существенно снизить частоту коммутации силовых ключей, уменьшить коэффициент гармонических искажений напряжений и токов, но это усложняет силовую часть и систему управления, что приводит к более высоким технологическим затратам [13, 14]. Отмеченное выше противоречие делает актуальным исследование режимов работы установок электропитания центробежных насосов с многоуровневой ШИМ.

Исследование «классической» трехфазной ШИМ

Классическая ШИМ основана на сравнении модулирующей функции напряжения с периодической пилообразной функцией. Для определения степени влияния высших гармоник на питающий кабель и АД используется упрощенная схема, которая позволяет оценить коэффициент гармонических искажений и особенности работы структуры. Наиболее распространенный вариант топологии силовой части трехфазного инвертора напряжения показан на рис. 1.

Система управления для трехфазного автономного инвертора напряжения с синусоидальной ШИМ имеет классический вид, показанный на рис. 2. В состав схемы входят блоки: генератор развертывающего

напряжения, компаратор (K) и логические блоки суммирования и умножения.

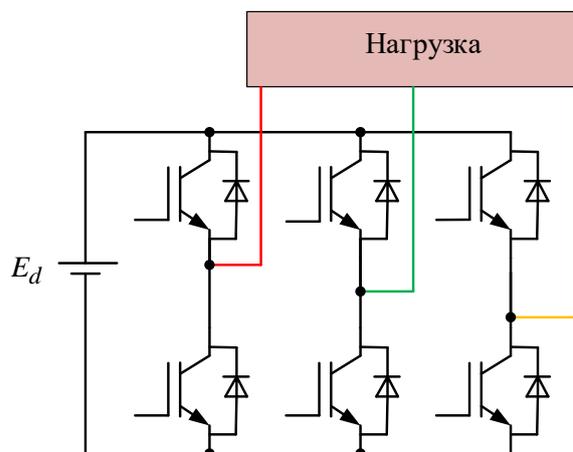


Рис. 1. Упрощенная схема силовой части преобразователя частоты

Fig. 1. Simplified diagram of the power part of the frequency converter

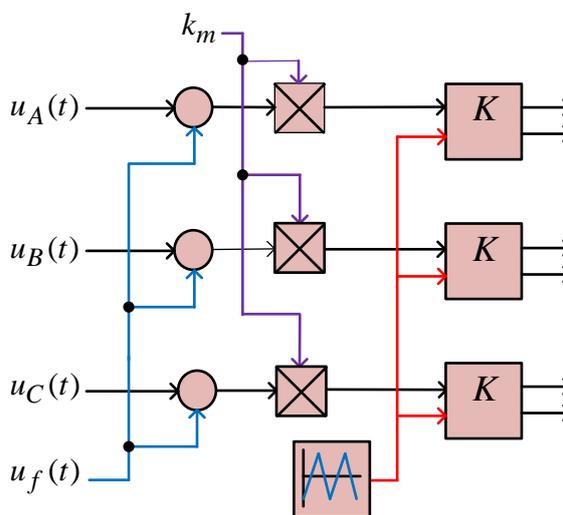


Рис. 2. Функциональная схема системы управления с синусоидальной ШИМ

Fig. 2. Functional diagram of the sinusoidal pulse-width modulation control system

Эталонные входные сигналы соответствующих фаз [15] приведены ниже:

$$\begin{aligned} u_A(t) &= U_m \cdot \sin(2\pi ft), \\ u_B(t) &= U_m \cdot \sin\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}\right), \\ u_C(t) &= U_m \cdot \sin\left(2\pi ft - \frac{4\pi}{3}\right). \end{aligned} \quad (1)$$

С помощью коэффициента усиления k_m , приведенного на рис. 2, регулируется величина задающих воздействий. На вход фазных компараторов поступают задающие синусоидальные сигналы и развертывающее напряжение, которое может иметь пилообразную или треугольную форму [16], в частотности однопо-

лярное треугольное развертывающее напряжение ШИМ имеет вид:

$$U_p = U_{\text{оп}} \left(1 - f_a(t) + 2f_a(t) \left[\frac{t}{a} - E_1 \left(\frac{t}{a} \right) \right] \right). \quad (2)$$

Здесь $f_a(t) = (-1)^{E_1(2t/a)}$ – функция прямоугольного синуса; $E_1 \left(\frac{t}{a} \right)$ – целочисленная функция Антье; $\left[\frac{t}{a} - E_1 \left(\frac{t}{a} \right) \right]$ – функция дробной части; $a = \frac{1}{f_{\text{оп}}}$ – период ШИМ; $U_{\text{оп}}$ – амплитуда развертывающего напряжения [17].

Как правило, для повышения амплитуды выходного напряжения в систему управления вводится сумма сигналов первой и третьей гармоник:

$$U = U_m \cdot \cos(2\pi ft) \quad \text{и} \quad U_f = \frac{1}{6} U_m \cdot \cos(2\pi 3ft).$$

Математическая модель коммутационной функции с ШИМ формируется как сигнум-функция $\xi_A(t)$ разностного уравнения, задающего (1) и развертывающего напряжений (2):

$$KF_A(t) = \frac{1}{2} [\text{sign}(\xi_A) + 1]. \quad (3)$$

При развертывающем однополярном треугольном напряжении коммутационная функция (3) примет вид:

$$KF_A(t) = \frac{1}{2} \text{sign} \left\{ \begin{aligned} &U_m \sin(2\pi ft) - \\ &-U_{\text{оп}} \left(1 - f_a(t) + 2f_a(t) \left[\frac{t}{a} - E_1 \left(\frac{t}{a} \right) \right] \right) \end{aligned} \right\} + \frac{1}{2}.$$

Подобным образом описываются коммутационные функции других фаз:

$$KF_B(t) = \frac{1}{2} \text{sign} \left\{ \begin{aligned} &U_m \cdot \sin \left(2\pi ft - \frac{2\pi}{3} \right) - \\ &-U_{\text{оп}} \left(1 - f_a(t) + 2f_a(t) \left[\frac{t}{a} - E_1 \left(\frac{t}{a} \right) \right] \right) \end{aligned} \right\} + \frac{1}{2};$$

$$KF_C(t) = \frac{1}{2} \text{sign} \left\{ \begin{aligned} &U_m \cdot \sin \left(2\pi ft - \frac{4\pi}{3} \right) - \\ &-U_{\text{оп}} \left(1 - f_a(t) + 2f_a(t) \left[\frac{t}{a} - E_1 \left(\frac{t}{a} \right) \right] \right) \end{aligned} \right\} + \frac{1}{2}.$$

Количество воздействий на систему управления, которые позволят повысить качество выходного напряжения и тока, ограничено. В табл. 1 представлены данные, показывающие, каким образом меняются коэффициенты гармонических искажений тока и линейного напряжения (K_i и K_u) при разных параметрах системы управления и с вариациями характера нагрузки. Исследования проводились без предмодуляции третьей гармоники. Вычислительный экспери-

мент с синусоидальной ШИМ был проведен с параметрами: $E_d=535$ В, $R=50$ Ом, $L=0,02$ Гн, соответствующими номиналам экспериментального образца (рис. 5, б), где R и L – параметры нагрузки, имитирующие работу погружного кабеля и электродвигателя в статическом режиме в составе УЭЦН. Детальное исследование влияния ШИМ на внутренние процессы кабеля и погружного двигателя требует привлечения математических моделей более высокого иерархического уровня [12, 18].

Таблица 1. Коэффициенты гармонических искажений тока и линейного напряжения при разных развертывающих сигналах

Table 1. Total harmonic distortions of current and line-to-line voltage

Кэфф. искажения Distortion coefficient	Треугольный опорный сигнал Triangular reference signal				Пилообразный опорный сигнал Sawtooth reference signal			
	R-нагрузка R-load		RL-нагрузка RL-load		R-нагрузка R-load		RL-нагрузка RL-load	
	кГц/kHz							
	$f_{\text{оп}}=3$ $f_{\text{ref}}=3$	$f_{\text{оп}}=10$ $f_{\text{ref}}=10$	$f_{\text{оп}}=3$ $f_{\text{ref}}=3$	$f_{\text{оп}}=10$ $f_{\text{ref}}=10$	$f_{\text{оп}}=3$ $f_{\text{ref}}=3$	$f_{\text{оп}}=10$ $f_{\text{ref}}=10$	$f_{\text{оп}}=3$ $f_{\text{ref}}=3$	$f_{\text{оп}}=10$ $f_{\text{ref}}=10$
Частота выходного сигнала $f=50$ Гц/Output frequency $f=50$ Hz								
K_i , %	68,6	68,95	12,44	3,87	68,59	68,63	14,27	4,42
K_u , %	68,62	68,93	68,91	69,25	68,58	68,69	68,89	69,01
Частота выходного сигнала $f=10$ Гц/Output frequency $f=10$ Hz								
K_i , %	68,63	68,95	12,39	3,9	68,58	68,7	14,23	4,41
K_u , %	68,63	68,95	68,95	69,27	68,59	68,7	68,91	69,03

Коэффициенты полных гармонических искажений сигнала K_i и K_u (THD – Total Harmonic Distortion) определялись по выражению [19]:

$$K_u = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_F}, \quad K_i = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}{I_F}, \quad (4)$$

где I_n – среднеквадратичное значение тока n -й гармоники; U_n – среднеквадратичное значение напряжения n -й гармоники; U_F – среднеквадратичное значение напряжения основной гармоники; I_F – среднеквадратичное значение тока основной гармоники.

На рис. 3, 4 изображены осциллограммы линейного напряжения и тока ($f=50$ Гц) для треугольного опорного сигнала ($f_{\text{оп}}=10$ кГц) с активно-индуктивной нагрузкой.

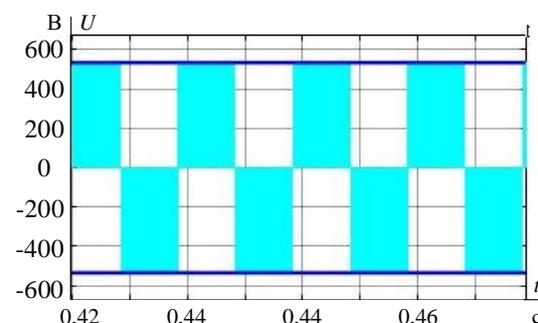


Рис. 3. Осциллограмма линейного напряжения при $f=50$ Гц и $f_{\text{оп}}=10$ кГц и треугольном опорном сигнале

Fig. 3. Oscillogram of line-to-line voltage at $f=50$ Hz and $f_{\text{ref}}=10$ kHz and triangular reference signal

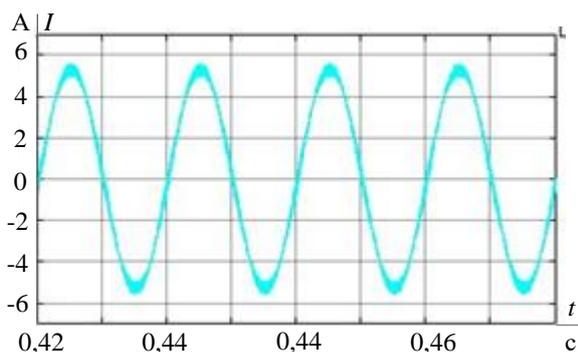


Рис. 4. Осциллограмма тока при $f=50$ Гц и $f_{om}=10$ кГц и треугольном опорном сигнале

Fig. 4. Oscillogram of current at $f=50$ Hz and $f_{ref}=10$ kHz and triangular reference signal

Многоуровневая ШИМ

Для повышения качества выходного напряжения могут быть использованы многоуровневые ШИМ в частотных преобразователях, которые имеют разные схематические представления, один из вариантов показан на рис. 5, где ВП – выпрямитель с источником энергии. Данная схема имеет модульную структуру, где каждая ячейка может запитываться автономно или от одного источника и выполнена на основе однофазной мостовой схемы.

В источниках литературы приводятся разные способы организации системы управления силовыми ключами в многоуровневой ШИМ. В настоящем исследовании применялись алгоритмы управления ячейками (рис. 6) для одной из фаз [20–25].

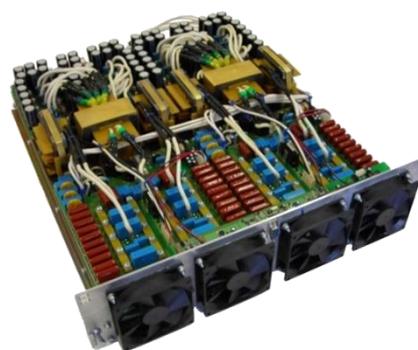
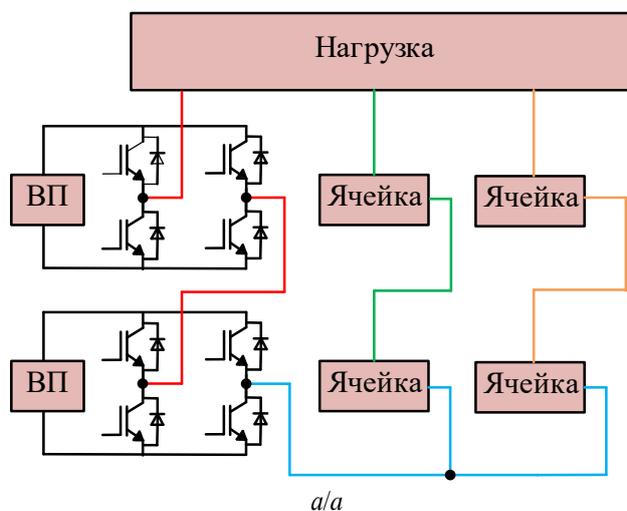


Рис. 5. Многоуровневая широтно-импульсная модуляция: а) функциональная схема; б) экспериментальный макет силовой ячейки

Fig. 5. Multilevel pulse-width modulation: a) functional diagram; b) experimental layout of the power cell

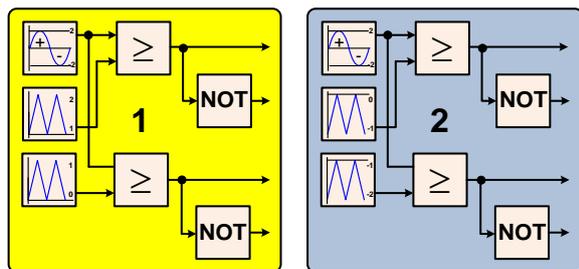


Рис. 6. Функциональная схема системы управления пятиуровневой широтно-импульсной модуляции: 1 – для первой ячейки; 2 – для второй ячейки

Fig. 6. Functional diagram of the five-level pulse-width modulation control system: 1 – for the first cell; 2 – for the second cell

На рис. 6, 7 используются следующие логические блоки: источник синусоидального напряжения, генераторы развертывающего напряжения, компаратор, блок логического отрицания.

В программной среде Matlab Simulink были проведены исследования для многоуровневой ШИМ с различным характером нагрузки и частотой опорного

сигнала. С целью корректного сравнения данных с классической ШИМ было выбрано питание одной ячейки для вариантов: пятиуровневой ШИМ с напряжением 133,75 В; для семиуровневой ШИМ с напряжением 66,875 В (при неизменных параметрах нагрузки). На рис. 7 представлены диаграммы опорных и задающих сигналов для пятиуровневого варианта.

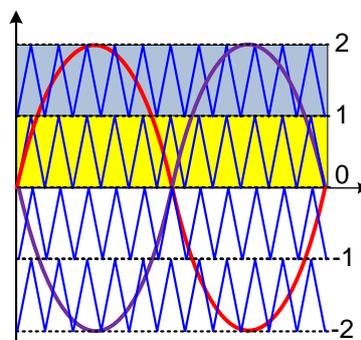


Рис. 7. Диаграммы опорных и задающих сигналов пятиуровневой широтно-импульсной модуляции

Fig. 7. Diagrams of the reference and setpoint signals of the five-level pulse-width modulation

В табл. 2 сведены данные коэффициентов искажения фазных токов и линейных напряжений при работе с активной и активно-индуктивной нагрузкой. Инвертор напряжения с семью уровнями продемонстрировал лучшие показатели, что было ожидаемо.

Коэффициент гармонических искажений для фазного и линейного напряжения в многоуровневой ШИМ будут отличаться, это зависит от количества уровней при формировании сигнала (рис. 8, 9). Здесь показана доля питающего напряжения U_d по отношению к амплитуде линейного и фазного напряжения при пятиуровневой ШИМ при $f=50$ Гц. При увеличении частоты ШИМ коэффициент гармонических искажений для тока начинает снижаться.

Для семиуровневой компоновки можно определить такую частоту опорного сигнала $f_{оп(7)}$, при которой будут обеспечиваться сопоставимые показатели гармонических искажений тока с пятиуровневым вариантом при его работе на частоте $f_{оп(5)}$. При этом $f_{оп(7)}$ меньше, чем $f_{оп(5)}$. Переход с пяти- и на се-

миуровневую схему позволяет снизить коэффициент гармонических искажений для напряжения примерно на 6,6 %. Если сравнивать с классической ШИМ, то качественный рост составит уже 53,62 %. Показатели качества токов и напряжений при работе на пониженной задающей частоте (10 Гц) и полученные на номинальной частоте (50 Гц) практически не отличаются друг от друга. Особенностью многоуровневых ШИМ является то, что возрастает качество выходных токов и напряжений по сравнению с классической ШИМ.

Дальнейшее повышение качества выходного напряжения и тока в частотном преобразователе связано с разработками и исследованиями многоуровневой структуры, которые позволяют повысить количество уровней напряжения без значительного увеличения элементов в силовой цепи. Такие подходы дают возможность в большей степени поднять качество выходного сигнала по сравнению со стандартными схемами и системами управления [26–28].

Таблица 2. Коэффициенты гармонического искажения тока и линейного напряжения в многоуровневых системах

Table 2. Total harmonic distortions of current and line-to-line voltage in multilevel systems

Коэфф. искажения Distortion coefficient	ШИМ/pulse-width modulation							
	Пятиуровневая/5-level				Семиуровневая/7-level			
	R-нагрузка R-load		RL-нагрузка RL-load		R-нагрузка R-load		RL-нагрузка RL-load	
	кГц/kHz							
$f_{оп(5)}=3$ $f_{ref}=3$	$f_{оп(5)}=10$ $f_{ref}=10$	$f_{оп(5)}=3$ $f_{ref}=3$	$f_{оп(5)}=10$ $f_{ref}=10$	$f_{оп(7)}=3$ $f_{ref}=3$	$f_{оп(7)}=10$ $f_{ref}=10$	$f_{оп(7)}=3$ $f_{ref}=3$	$f_{оп(7)}=10$ $f_{ref}=10$	
Частота выходного сигнала $f=50$ Гц/Output frequency $f=50$ Hz								
$K_i, \%$	26,80	27,02	5,63	1,74	18,07	18,18	3,86	1,18
$K_u, \%$	21,41	21,67	21,54	21,8	14,96	15,11	15,11	15,25
Частота выходного сигнала $f=10$ Гц/Output frequency $f=10$ Hz								
$K_i, \%$	26,91	26,97	5,56	1,74	18,71	18,20	3,78	1,18
$K_u, \%$	21,55	21,63	21,67	21,76	15,07	15,12	15,21	15,26

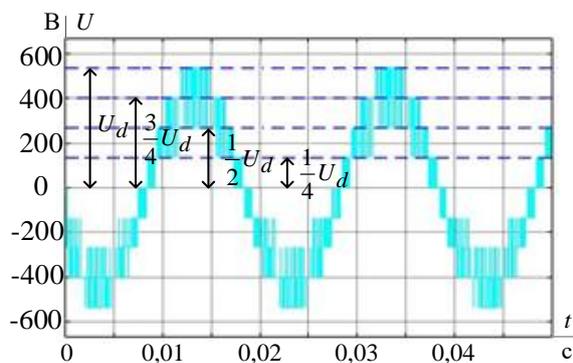


Рис. 8. Линейное напряжение для пятиуровневой ШИМ при $f=50$ Гц

Fig. 8. Line-to-line voltage for 5-level pulse-width modulation at $f=50$ Hz

Повышение надежности многоуровневой ШИМ

В процессе эксплуатации силовых преобразователей часто возникают аварийные ситуации, которые частично или полностью выводят их из строя. Наибольшим нагрузкам подвержены силовые ключи, коммутирующие на высоких частотах и работающие с большими токами. Выход из строя силового ключа приводит к короткому замыканию цепи или ее обры-

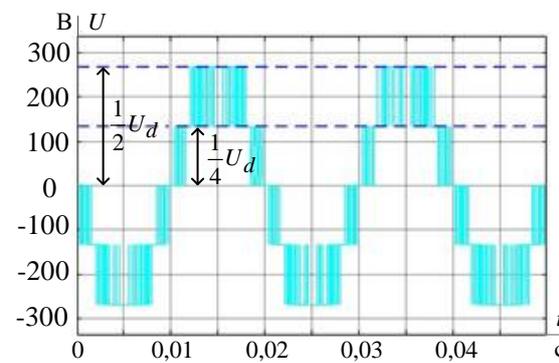


Рис. 9. Фазное напряжение для пятиуровневой ШИМ при $f=50$ Гц

Fig. 9. Phase voltage for 5-level pulse-width modulation at $f=50$ Hz

ву. Самой большой опасностью является короткое замыкание, так как в этом случае транзистор не реагирует на сигналы управления и это приводит к протеканию значительных токов через данный контур. Обрыв цепи ключа является менее опасным, при этом устройство может продолжить свою работу с меньшими показателями качества. А диагностировать в процессе работы тип неисправности в большинстве случаев проблематично [29].

Многоуровневые инверторы напряжения можно использовать не только для улучшения качества напряжения и тока, но и для повышения общей надежности системы благодаря большому числу включенных блоков, которые в случае аварии могут выступать резервирующими элементами. Авария силового преобразователя может остановить добычу и привести к существенным финансовым потерям. При добыче нефти есть ряд определенных требований, которые не позволяют мгновенно остановить технологический процесс. Для решения этой проблемы предложена модифицированная силовая схема многоуровневого инвертора (рис. 10), которая позволяет локализовать проблему и обеспечить высокую работоспособность оборудования. Создание безаварийных

алгоритмов управления и исследование соответствующих режимов их функционирования является актуальной задачей [30–34].

Принцип действия данной безаварийной системы рассматривается на примере выхода из строя одного блока фазы А. При возникновении неисправности внутри инверторов в ячейках 1 или 2 (рис. 10) формируется сигнал аварии на основе датчиков напряжения. Затем с помощью контакторов К2 и К3 осуществляется отключение аварийной ячейки и ее шунтирование. Далее на рабочую ячейку подается удвоенное постоянное напряжение с помощью контакторов К1, К01, К02 и К03, что позволяет сформировать приемлемые показатели гармонических искажений для тока и напряжения, что дает возможность продолжить работу УЭЦН.

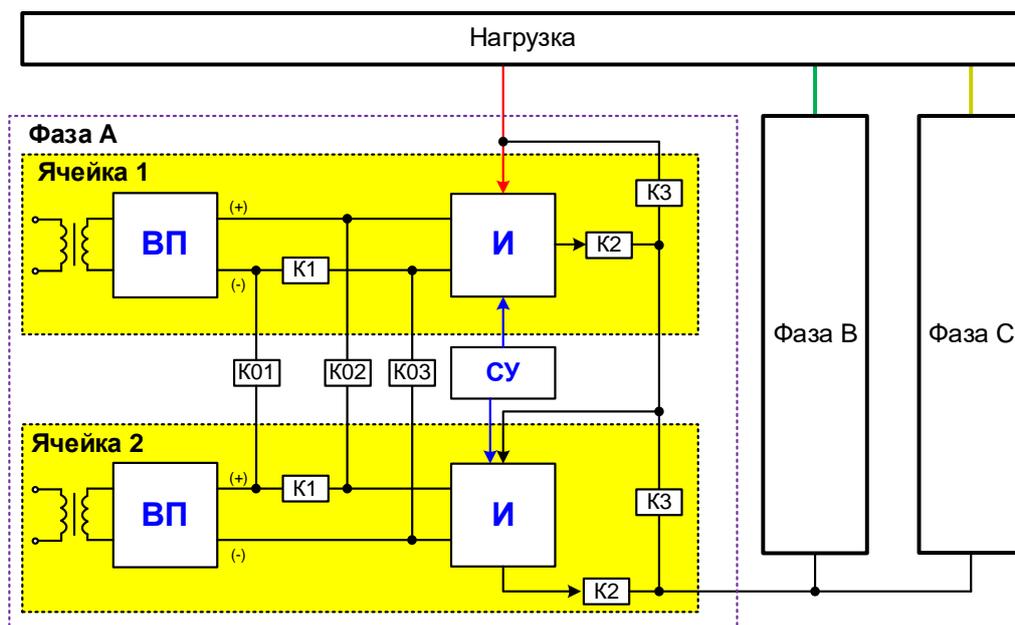


Рис. 10. Функциональная схема для безаварийного управления многоуровневой ШИМ

Fig. 10. Functional diagram for fault-tolerant control of multilevel pulse-width modulation

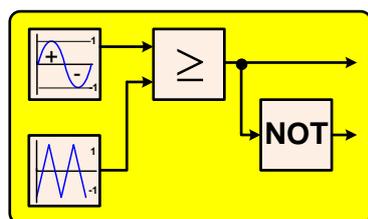


Рис. 11. Алгоритм двухполярной ШИМ

Fig. 11. Bipolar pulse-width modulation algorithm

Для обеспечения приемлемых показателей питания УЭЦН, таких как гармонические искажения тока и напряжения, коэффициент несинусоидальности, необходимо изменить тип управления для рабочей ячейки в соответствии с рис. 11, 12. Здесь проиллюстрированы варианты систем управления силовыми ключами для рабочей ячейки, реализованной на основе мостовой схемы. Алгоритм управления двухполярной ШИМ при этом упрощается, но обеспечивает более низкие показатели гармонических искажений

токов и напряжения по сравнению с однополярным алгоритмом (табл. 3). В данной ситуации рациональным решением является использование однополярной ШИМ.

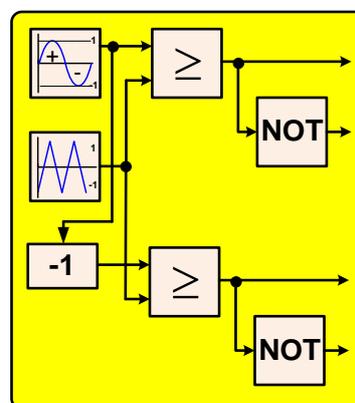


Рис. 12. Алгоритм однополярной ШИМ

Fig. 12. Unipolar pulse-width modulation algorithm

Оценка эффективности предложенной безаварийной системы управления осуществлялась по двум показателям для каждой фазы: коэффициент гармонического искажения согласно уравнению (4) и коэффициент несимметрии, который определялся по выражению:

$$K_H = \frac{1}{T} \int_0^T (i_A(t) + i_B(t) + i_C(t))^2 dt,$$

где $i_A(t)$, $i_B(t)$, $i_C(t)$ – мгновенные значения токов для соответствующих фаз.

При симметричной системе коэффициент K_H должен стремиться к нулю. В табл. 3 приведены рассчитанные коэффициенты для различных режимов работы пятиуровневого инвертора напряжения при активно-индуктивной нагрузке. Расчеты осуществлялись на основе имитационной модели в программной среде Matlab Simulink.

Таблица 3. Коэффициенты несимметрии и гармонических искажений токов и напряжений при разных режимах работы многоуровневого инвертора

Table 3. Total harmonic distortions and unbalance of current and line-to-line voltage at different operating modes of the multilevel inverter

Фазные токи Phase currents			Фазные напряжения Phase voltages			K_H	Режимы работы Modes of operation
I_a	I_b	I_c	U_a	U_b	U_c		
%							
1,74	1,74	1,74	27,18	27,2	27,20	0,01497	Нормальный режим работы Normal operation mode
1,74	1,74	12,31	27,18	27,2	116,98	2,859	Аварийный режим работы Emergency operation mode
1,74	1,74	35,77	27,18	27,2	65,61	5,465	Шунтирование аварийной ячейки Bypassing the emergency cell
1,74	1,74	35,77	27,18	27,2	65,51	1,751	Шунтирование аварийной ячейки с повышением напряжения Bypassing the emergency cell with voltage boost
1,74	1,74	1,79	27,18	27,2	52,88	0,01278	Безаварийное управление (однополярный алгоритм управления) Fault-tolerant control (unipolar control algorithm)
1,73	1,73	6,3	27,18	27,2	100,88	0,06443	Безаварийное управление (двухполярный алгоритм управления) Fault-tolerant control (bipolar control algorithm)

Для сравнения на рис. 13, 14 изображены осциллограммы напряжений и токов для нормального режима работы многоуровневого инвертора. Из этих графи-

ков следует, что токи имеют практически идеальный синусоидальный вид, а напряжения формируются по многоуровневой системе.

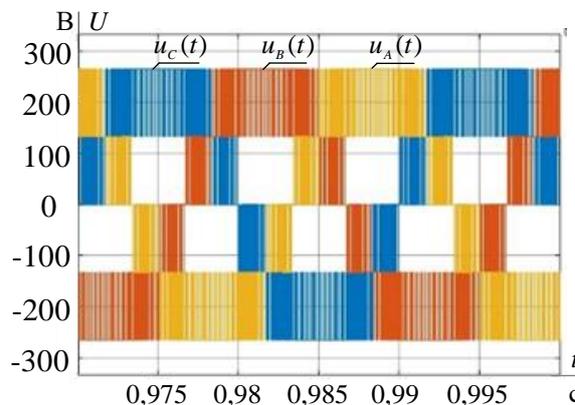


Рис. 13. Фазные напряжения при нормальном режиме работы

Fig. 13. Phase voltages during normal operation

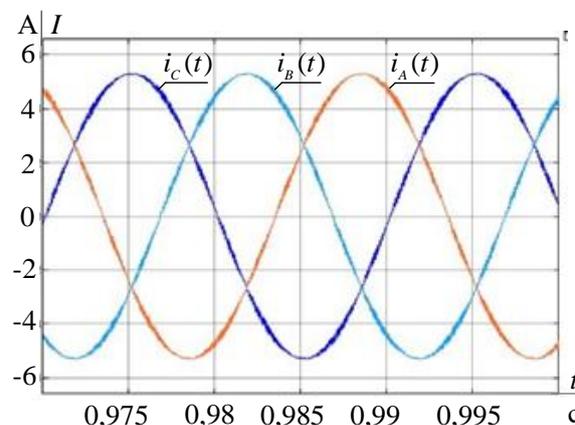


Рис. 14. Фазные токи при нормальном режиме работы

Fig. 14. Phase currents during normal operation

В соответствии с результатами моделирования на рис. 15, 16 показаны токи и напряжения при выходе из строя одного силового ключа в ячейке, при котором появляется неисправность вида «разрыв».

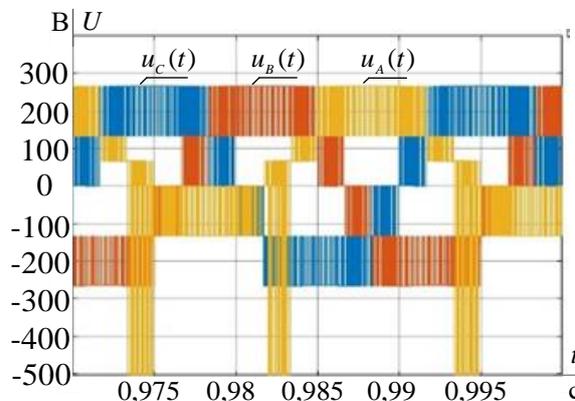


Рис. 15. Фазные напряжения при аварийном режиме работы

Fig. 15. Phase voltages during fault-tolerant operation

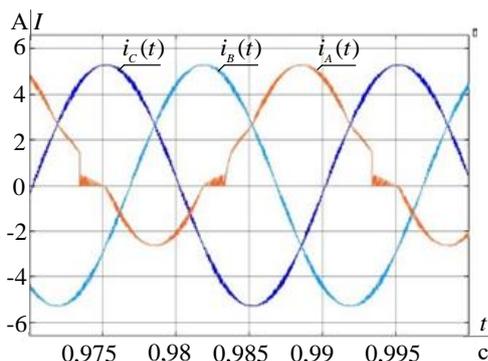


Рис. 16. Фазные токи при аварийном режиме работы
 Fig. 16. Phase currents during fault-tolerant operation

Такая неисправность оказывает влияние на работу силового преобразователя, что видно из изменения формы сигналов для тока и напряжения по аварийной фазе. Ясно, что коэффициенты искажения для тока и напряжения увеличиваются, а также появляется несимметрия токов фаз. При запитывании асинхронного двигателя данным типом напряжения появляются колебания электромагнитного момента, и при этом снижается мощность на валу АД в зависимости от реальных значений параметров машины [35].

Система верхнего уровня управления ПЧ, обнаружив и идентифицировав фазу аварийного режима работы, переходит на один из алгоритмов безаварийного ШИМ управления ключами соответствующей фазы.

При использовании алгоритмов безаварийного управления с однополярной ШИМ на выходе многоуровневого инвертора были получены соответствующие осциллограммы фазных напряжений (рис. 17) и токов (рис. 18), в том числе и для аварийной фазы А. Эти графики позволяют сделать вывод, что система является симметричной, а коэффициенты искажений тока и напряжения в аварийной фазе хуже, чем при нормальном режиме работы, но остаются на удовлетворительном уровне (табл. 3). В этой ситуации система может проработать до замены силового преобразователя или устранения неисправности.

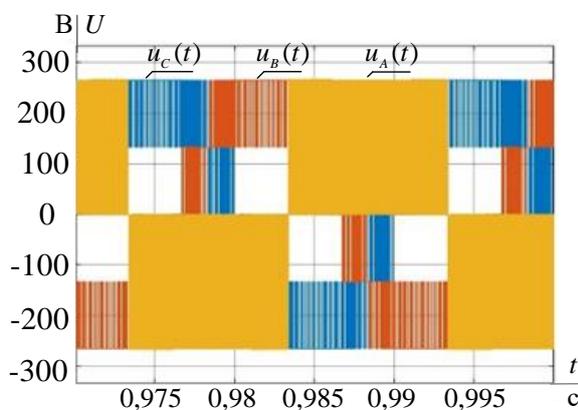


Рис. 17. Фазные напряжения при безаварийном варианте работы и однополярном алгоритме управления
 Fig. 17. Phase voltages during fault-tolerant operation and unipolar control algorithm

Fig. 17. Phase voltages during fault-tolerant operation and unipolar control algorithm

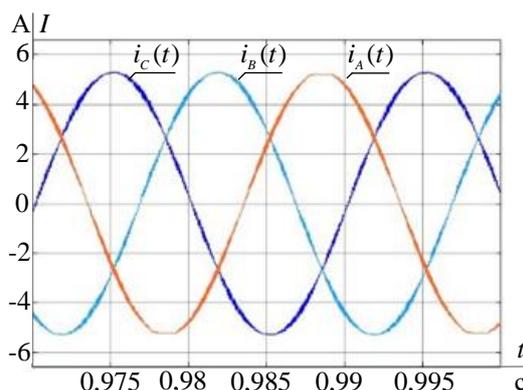


Рис. 18. Фазные токи при безаварийном варианте работы и однополярном алгоритме управления
 Fig. 18. Phase currents during fault-tolerant operation and unipolar control algorithm

Fig. 18. Phase currents during fault-tolerant operation and unipolar control algorithm

В случае аварии возможен алгоритм управления в однополярном или двухполярном режиме (рис. 11, 12). При использовании однополярной ШИМ (рис. 11) для безаварийной системы управления коэффициенты искажения тока и напряжения лучше, чем для двухполярной ШИМ (рис. 12), что подтверждают графики на рис. 19, 20.

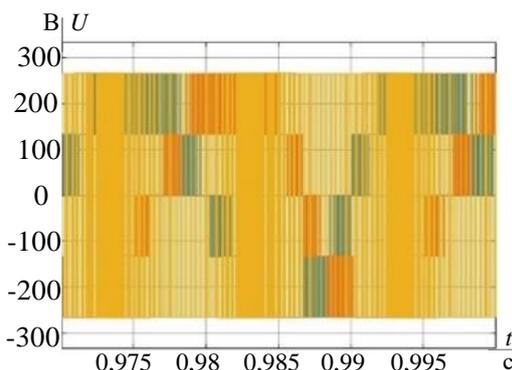


Рис. 19. Фазные напряжения при безаварийном варианте работы и двухполярном алгоритме управления
 Fig. 19. Phase voltages during fault-tolerant operation and bipolar control algorithm

Fig. 19. Phase voltages during fault-tolerant operation and bipolar control algorithm

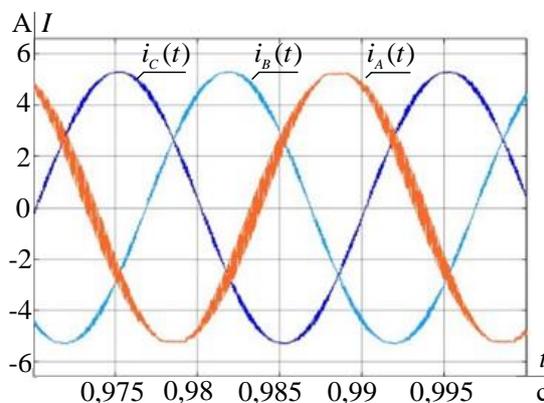


Рис. 20. Фазные токи при безаварийном варианте работы и двухполярном алгоритме управления
 Fig. 20. Phase currents during fault-tolerant operation and bipolar control algorithm

Fig. 20. Phase currents during fault-tolerant operation and bipolar control algorithm

Наличие двух алгоритмов позволяет с большой гибкостью управлять коммутацией силовых ключей преобразователя в зависимости от того, какой вид аварии силового элемента произошел (короткое замыкание, разрыв). Это позволяет повысить показатели надежности силового преобразователя.

Рассмотрим вероятность безотказной работы силового преобразователя с учетом использования многоуровневых структур в качестве резервных. Исходя из технических документаций и научных трудов по силовым ключам [36–38] принимаем вероятность безотказной работы одного транзисторного ключа $P_T(t) = 48,68\%$ в течение 15000 ч. Тогда данный показатель для одной фазы последовательно включенных силовых транзисторов (вариант классической ШИМ, рис. 1) составит $P(t) = P_T^2(t) = 23,70\%$. В предполагаемом безаварийном управлении для пятиуровневого инвертора ячейки рассматриваются как взаиморезервирующие друг друга, поэтому вероятность одновременного выхода двух ячеек на одной фазе будет ниже, а вероятность безотказной работы выше $P(t) = 66,10\%$ вследствие послеаварийного изменения топологии схемы (рис. 10), т. е. повысится в 2,79 раза.

Результаты данной работы позволяют спрогнозировать следующие пути увеличения показателей надежности. Они связаны с обеспечением возможности подключения к аварийной фазе ячеек с других безаварийных фаз. При выходе из строя всех ячеек одной фазы возможности резервирования в режиме реального времени отсутствуют в рассмотренном безаварийном алгоритме управления. Выходом при такой неполадке является использование силового мо-

дуля с другой фазы. В этой ситуации две из трех фаз должны работать по безаварийному алгоритму.

Заключение

1. Высокочастотная коммутация с резко возрастающими фронтами в инверторе напряжения оказывает негативное влияние на обмотки двигателя и непосредственно силовую кабель, что приводит к ускоренному старению изоляции и выходу из строя оборудования. Анализ многоуровневых ШИМ показал, что увеличение количества уровней напряжения позволяет существенно улучшить коэффициент гармонических искажений токов и напряжений и таким образом снизить негативное влияние силового преобразователя на кабель и двигатель.
2. При использовании многоуровневой широтно-импульсной модуляции можно существенно снизить частоту коммутации ключей при обеспечении оптимальных показателей коэффициентов искажения токов и напряжений.
3. Регулирование частоты коммутации в зависимости от режимов работы в многоуровневых инверторах позволит рационально управлять динамическими потерями и нагрузками на силовые ключи.
4. Многоячейчатая структура инвертора напряжения допускает увеличение показателей надежности, к примеру, вероятность безотказной работы по сравнению с классической с 23,70 до 66,10 %, и обеспечивает работу оборудования на срок устранения неисправности с удовлетворительными показателями качества токов и напряжений, но ухудшает гармонический состав при работе в безаварийном режиме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сажин В.В., Селдинас И., Сажин В.Б. Трудноизвлекаемые запасы и «Тяжелые нефти» России // *Успехи в химии и химической технологии*. – 2008. – Т. 92. – № 12. – С. 56–68.
2. Шарф И.В., Борзенкова Д.Н. Трудноизвлекаемые запасы нефти: понятие, классификационные подходы и стимулирование разработки // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – Т. 16. – № 2. – С. 3593–3597.
3. Ал-Нашар Р.А. Формирование себестоимости добычи нефти // *Вестник науки и образования*. – 2021. – Т. 114. – № 11. – С. 49–53.
4. Мамедова М.Б. Многофакторная модель оценки и прогнозирования себестоимости добычи нефти для длительно разрабатываемых месторождений // *Актуальные проблемы гуманитарных наук и естественных наук*. – 2009. – № 9. – С. 89–95.
5. Модорская Г.Г., Исаева М.А., Сичинава Ю.В. Внешние факторы, влияющие на себестоимость добычи нефти // *Скиф. Вопросы студенческой науки*. – 2020. – Т. 52. – № 12. – С. 95–105.
6. Влияние преобразователей частоты на изоляцию силовых кабелей нефтедобывающих станций / Д.И. Зализный, О.Г. Широков, С.Н. Кухаренко, Е.Ю. Устименко // *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. – 2011. – № 1. – С. 17–23.
7. Коробцов А.А., Леонов А.П., Похолков Ю.П. Применение эмалированных проводов в обмотках асинхронных двигателей с частотным управлением // *Наука и техника*. – 2013. – Т. 340. – № 3. – С. 16–18.
8. A method for endurance testing of enameled round and rectangular wires for motors controlled by SiC-based inverters / V. Gavrilenko, A. Leonov, A. Bukharin, S. Hlioui, S. Lefebvre // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. – 2021. – V. 28. – Iss. 6. – P. 2091–2098.
9. Молодых А.В., Старокожев А.И. Проблема «Длинного кабеля» в частотно-регулируемом электроприводе и возможные способы ее решения // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2015. – № 8. – С. 323–327.
10. Бородин А.В. Особенности исследования работы системы ПЧ с ШИМ-кабель-АД // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. – 2005. – № 2. – С. 36–38.
11. Improving the heat resistance of polymer electrical insulation systems for the modernization of induction motors / A. Leonov, T. Usacheva, D. Lyapunov, N. Voronina, O. Galtseva, A. Rogachev // *Eurasian Physical Technical Journal*. – 2021. – V. 18. – Iss. 1. – P. 34–42.
12. Определение погонных электротехнических параметров нефтепогружного кабеля / А.С. Глазырин, Ю.Н. Исаев, С.Н. Кладиев, А.П. Леонов, И.В. Раков, С.В. Колесников, С.В. Ланграф, А.А. Филипас, В.А. Копырин, Р.Н. Хамитов, А.В. Лавринович // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 6. – С. 186–197.
13. Стариков А.В., Лисин С.Л., Рокало Д.Ю. Влияние широтно-импульсной модуляции на гармонический состав выходного напряжения частотного преобразователя // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. – 2019. – Т. 61. – № 1. – С. 153–166.
14. Хакимьянов М.И. Повышение энергоэффективности и оптимизация режимов работы электроприводов в нефтедобывающей промышленности: дис. ... д-ра техн. наук. – Уфа, 2018. – 355 с.
15. Система управления с синусоидальной широтно-импульсной модуляцией трехфазного инвертора при частотном скалярном управлении асинхронным двигателем / Ю.Н. Дементьев, К.Н. Негодин, Н.В. Кояин, Л.С. Удут // *Известия вузов. Электромеханика*. – 2016. – Т. 546. – № 4. – С. 49–54.

16. Бифуркационные явления в преобразователе напряжения с частотно-импульсным управлением для ветрогенераторной установки / С.Г. Михальченко, Г.Я. Михальченко, С.М. Семенов, П.С. Мешеряков, Н.А. Воронина, А.М. Зюзев // Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 12. – С. 215–225.
17. Метод коммутационно-разрывных и модуляционных функций при анализе процессов в преобразователях частоты / А.В. Кобзев, Г.Я. Михальченко, С.Г. Михальченко, Д.С. Муликов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2017. – Т. 20. – № 3. – С. 203–209.
18. Оптимизация порядка редуцированной динамической модели ненагруженного нефтепогружного кабеля на основе аппроксимации амплитудно-частотной характеристики / А.С. Глазырин, Ю.Н. Исаев, С.Н. Кладиев, А.П. Леонов, И.В. Раков, С.В. Колесников, С.В. Ланграф, А.А. Филипас, В.А. Копырин, Р.Н. Хамитов, А.В. Лавринович // Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 9. – С. 154–167.
19. ГОСТ ИЕС 62040-3-2018 Системы бесперебойного энергоснабжения. Ч. 3. Метод установления эксплуатационных характеристик и требования к испытаниям. – М.: Стандартинформ, 2018. – 90 с.
20. Виноградов А.Б., Коротков А.А. Алгоритмы управления высоковольтным многоуровневым преобразователем частоты. – Иваново: ФГБОУВО Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2018. – 184 с.
21. Баховцев И.А. Анализ и синтез энергооптимальных способов управления инверторами с ШИМ: дис. ... д-ра техн. наук. – Новосибирск, 2017. – 452 с.
22. Анисимова Т.В., Данилина А.Н. Инверторы с многозонной модуляцией // Труды Московского авиационного института. – 2012. – № 52. – С. 26–41.
23. McGrath B.P., Holmes D.G. Multicarrier PWM strategies for multilevel inverters // IEEE Transactions of industrial electronics. – 2002. – V. 49. – Iss. 4. – P. 858–867.
24. Rodriguez J., Lai J.S., Peng F.G. Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications // IEEE Transactions of industrial electronics. – 2002. – V. 49. – Iss. 4. – P. 724–738.
25. Rathore S., Kirar M.K., Bhardwaj S.K. Simulation of cascaded H-bridge multilevel inverter using PD, POD, APOD techniques // Electrical & Computer Engineering: an International Journal. – 2015. – V. 4. – Iss. 3. – P. 27–41.
26. Improved modulation strategy for single-phase cascaded H-Bridge multilevel inverter / X. Guo, X. Wang, C. Wang, Z. Lu, C. Hua, F. Blaabjerg // IEEE Transactions of power electronics. – 2002. – V. 49. – Iss. 4. – P. 724–738.
27. Speeravathy L. Cascaded multilevel inverter with developed H bridge units // International Journal of Science and Research. – 2015. – V. 4. – Iss. 9. – P. 952–957.
28. Closed-loop power supply for an autonomous object with a DC power transmission line and voltage drop compensation / V. Chekh, V. Rulevskiy, A. Pravikova, D. Lyapunov // 16th International Conference on Electronic Devices and Control Systems. Journal of Physics: Conference series. – 2020. – V. 1862. – Iss. 1. – P. 1–6.
29. Проблемы обеспечения безопасности силовых ключей в аварийных режимах / А. Винтрич, Н. Ульрих, Т. Вернер, Р. Тобиас // Силовая электроника. – 2013. – № 4. – С. 50–58.
30. Трегуб Д.Р., Доброскок Н.А. Исследование работы каскадного преобразователя в несимметричном режиме // Наука настоящего и будущего. – 2019. – Т. 1. – С. 248–252.
31. Трегуб Д.Р. Исследование аварийных режимов работы каскадного преобразователя частоты частотно-регулируемого электропривода // Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2020. – С. 126–135.
32. Narasimha Rao M., Karthick N., Madhukar Rao A. Fault tolerant ability of a multilevel inverter fed three phase induction motor for water pumping application // 2021 7th International conference on electrical energy systems. – Chennai, 2021. – P. 212–216.
33. Fault-tolerant asymmetrical multilevel inverter with preserved output power under post-fault operation / A. Chappa, S. Gupta, L. Kumar Sahu, K. Kumar Gupta, H. Vahedi // IEEE Transactions of industrial electronics. – 2022. – V. 69. – Iss. 7. – P. 6764–6773.
34. Nos O.V., Dybko M.A., Nos N.I. Control algorithms for a multilevel voltage inverter with cascading H-bridges during emergency operation // Russian Electrical Engineering. – 2021. – V. 92. – Iss. 12. – P. 755–760.
35. Определение параметров схемы замещения погружного электродвигателя на основании данных испытаний / С.С. Шубин, В.У. Ямалиев, А.С. Глазырин, Д.С. Буньков, С.Н. Кладиев, И.В. Раков, Е.В. Боловин, В.З. Ковалев, Р.Н. Хамитов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 1. – С. 204–214.
36. Behrooz M. Survey of fault-tolerance techniques for three-phase voltage source inverters // IEEE Transactions of industrial electronics. – 2014. – V. 61. – Iss. 10. – P. 5192–5202.
37. Julian A.L., Orti G. A comparison of redundant inverter topologies to improve voltage source inverter reliability // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2007. – V. 43. – Iss. 5. – P. 1674–1678.
38. A multilevel converter topology with fault-tolerant ability // A. Chen, L. Hu, L. Chen, Y. Deng, X. He // IEEE Transactions of power electronics. – 2005. – V. 20. – Iss. 2. – P. 405–415.

Поступила 29.06.2022 г.

Информация об авторах

Михальченко С.Г., доктор технических наук, заведующий кафедрой промышленной электроники Томского университета систем управления и радиоэлектроники.

Тимошкин В.В., кандидат технических наук, доцент Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Воронина Н.А., кандидат технических наук, доцент Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Семенов С.М., старший преподаватель Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Попов С.С., магистрант Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Афанасьев К.С., кандидат технических наук, инженер-конструктор II категории АО «НПЦ «Полнос».

UDC 62-533.7

SUPPLY MODES OF ELECTRIC SUBMERSIBLE PUMPS WITH MULTILEVEL PULSE-WIDTH MODULATION

Sergey G. Mikhailchenko¹,
msg@ie.tusur.ru

Vadim V. Timoshkin²,
timoshkinvv@tpu.ru

Nataliya A. Voronina²,
voronina@tpu.ru

Sergey M. Semenov²,
ssm@tpu.ru

Semen S. Popov²,
ssp14@tpu.ru

Kirill S. Afanasiev³,
afanks@tpu.ru

¹ Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
40, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

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

³ JSC «Scientific & Industrial Centre «Polyus»,
56v, Kirov avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to improve the quality factors of output voltage and current of voltage inverters in electric submersible pumps, used in oil production. The main aspects, which allow improving these quality factors are: usage of perspective topologies of power part and modern power semiconductor keys, implementation of new control algorithms. In electric drives, where frequency converters are used, there are negative factors, affecting oil-submersible cable and submersible induction motor functioning. Non-sinusoidal voltages at the frequency converter output lead to increased wear and tear of the supply cable insulation, and also negatively affect the insulation of induction motor windings and reduce the quality indicators of electric drive control systems. Consequently, the search for ways to improve the quality of the output voltage and current of the voltage inverters in electric submersible pumps is a critical task.

The main aim of the research is to develop the algorithms to improve the reliability indicators of multilevel converters and upgrade the quality of harmonic composition of the output voltage and current of voltage inverters as part of the electric drive of a submersible oil-producing pump.

Object: voltage inverters as a part of electric drive of submersible oil producing pump.

Methods and tools: reliability theory, harmonic analysis, functional diagrams, switching functions, topology of electric circuits of power converters, numerical methods for solving differential equations, fast Fourier transform, Matlab Simulink.

Results. Significant improvement of current and voltage quality factors in multilevel converters as a part of electric drive of submersible oil-producing pump has been demonstrated. Possible ways to improve reliability indicators by changing the layout option of the circuit topology have been considered, with the probability of no-failure operation increasing from 23,70 to 66,10 % as compared to the classical layout. It is established that regulation of switching frequency depending on operating modes in multilevel inverters will allow controlling rationally dynamic losses and loads on power keys.

Key words:

Oil production, submersible motor, frequency converter, pulse-width modulation, harmonic components, multilevel inverter.

REFERENCES

- Sazhin V.V., Seldinas I., Sazhin V.B. Trudnoizvlekaemye zapasy i «Zapasy nefiti» Rossii [Hard-to-recover reserves and Russia's Heavy Oil]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*, 2008, vol. 92, no. 12, pp. 56–68.
- Sharf I.V., Borzenkova D.N. Unconventional oil: definition, classification approaches and development stimulation. *Fundamental Research*, 2015, vol. 16, no. 2, pp. 3593–3597. In Rus.
- Al-Nashar R.A. The formation of the cost price of petrol. *Herald of Science and Education*, 2021, vol. 114, no. 11, pp. 49–53. In Rus.
- Mamedova M.B. Multifactor model of evaluation and forecasting of oil production cost for the long-term development fields. *Actual problems of humanities and natural sciences*, 2009, no. 9, pp. 89–95. In Rus.
- Modorskaya G.G., Isaeva M.A., Sichinava Y.V. External factors affecting the cost of oil production. *Skiff. Questions of Students Science*, 2020, vol. 52, no. 12, pp. 95–105. In Rus.
- Zaluzniy D.I., Shirokov O.G., Kukharenskiy S.N., Ustimenko E.Yu. Vliyanie preobrazovateley chastoty na izolyatsiy silovikh kabeley nefteobryvayushchikh stantsiy [Effect of frequency converters on the insulation of power cables of oil production stations] *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh obedineniy SNG*, 2011, no. 1, pp. 17–23.
- Korobtsev A.A., Leonov A.P., Pokholkov Yu.P. Primenenie emalirovannykh provodov v obmotkakh asinkhronnykh dvigateley s chastoym upravleniem [Application of enameled wires in the windings of frequency-controlled induction motors]. *Kabeli i provoda*, 2013, vol. 340, no. 3, pp. 16–18.
- A method for endurance testing of enameled round and rectangular wires for motors controlled by SiC-based inverters. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2021, vol. 28, no. 6, pp. 2091–2098.
- Molodykh A.V., Starokozhev A.I. «Long cable» problem in variable frequency electric drives and possible ways to solve it. *Mining information and analytical bulletin*, 2015, no. 8, pp. 323–327. In Rus.
- Borodin A.V. Osobennosti issledovaniya raboty sistemy PCH s SHIM-kabel-AD [Peculiarities of research of frequency converter system operation with PWM-cable-ID]. *Vesntik Kuzvasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2005, no. 2, pp. 36–38.
- Leonov A., Usacheva T., Lyapunov D., Voronina N., Galtseva O., Rogachev A. Improving the heat resistance of polymer electrical insulation systems for the modernization of induction motors. *Eurasian Physical Technical Journal*, 2021, vol. 18, no. 1, pp. 34–42.
- Glazyrin A.S., Langraf S.V., Isaev Y.N., Filipas A.A., Kladiyev S.N., Kopyrin V.A., Leonov A.P., Khamitov R.N., Rakov I.V., Kovalev V.Z., Kolesnikov S.V., Lavrinovich A.V. Determination of running electrical characteristics of oil submersible cable. *Bulle-*

- tin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 1, pp. 204–214. In Rus.
13. Starikov A.V., Lisin S.L., Rokalo D.Yu. Influence of the pulse-width modulation on the harmonic composition of the output voltage of a frequency converter. *Bulletin of Samara state technical university, Series: «Engineering science»*, 2019, vol. 61, no. 1, pp. 153–166. In Rus.
 14. Hakimyanov M.I. *Povyshenie energoeffektivnosti i optimizatsiya rezhimov raboty elektroprivodov v nefteobivayushey promishlennosti*. Diss. Dokt. nauk [Improvement of energy efficiency and optimization of operation modes of electric drives in oil production industry. Dr. Diss.]. Ufa, 2018. 355 p.
 15. Dementyev Yu.N., Negodin K.N., Koyain N.V., Uduv L.S. Control system with sinusoidal PWM three-phase inverter with a frequency scalar control of induction motor. *Russian electromechanics*, 2016, vol. 546, no. 4, pp. 49–54. In Rus.
 16. Mikhailchenko S.G., Semenov S.M., Meshcheryakov P.S., Voronina N.A., Ziuzev A.M. Bifurcation phenomena in voltage converter with frequency-pulse control for a wind generator. *Bulletin of the Tomsk polytechnic university. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 12, pp. 215–225. In Rus.
 17. Kobzev A.V., Mikhailchenko G.Ya., Mikhailchenko S.G., Mulikov D.S. Method of switching-discontinuous and modulation function in the analysis of processes in frequency converters. *Proceedings of TUSUR University*, 2017, vol. 20, no. 3, pp. 203–209. In Rus.
 18. Glazyrin A.S., Isaev Y.N., Kladiyev S.N., Leonov A.P., Rakov I.V., Kolesnikov S.V., Langraf S.V., Filipas A.A., Kopyrin V.A., Khamitov R.N., Kovalev V.Z. Unloaded oil-submersible cable reduced dynamic model order optimization based on the frequency response approximation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 9, pp. 154–167. In Rus.
 19. GOST IEC 62040-3-2018. *Sistemy bespereboynogo energosnabzheniya. Chast 3. Metod ustanovleniya ekspluatatsionnykh kharakteristik i trebovaniya k ispytaniyam* [State Standart 62040-3-2018. Uninterruptible power systems. P. 3. Method of specifying the performance and test requirements]. Moscow, StandardInform Publ., 2018. 90 p.
 20. Vinogradov V.B., Korotkov A.A. *Algoritmy upravleniya vysokovoltным mnogourovnevnyim preobrazovatelem chastoty* [Control algorithms for a high-voltage multilevel frequency converter]. Ivanovo, Ivanovo energy state university Publ., 2018. 184 p.
 21. Bahovtsev I.A. *Analiz i sintez energooptimalnykh sposobov upravleniya invertorami s ShIM*. Diss. Dokt. nauk [Analysis and synthesis of energy-optimal control methods for PWM inverters. Dr. Diss.]. Novosibirsk, 2017. 452 p.
 22. Anisimova T.V., Danilina A.N. *Inventory s mnogozonnoy modulyatsiyey* [Inverter with multilevel modulation]. *Trudy Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2012, no. 52, pp. 26–41.
 23. McGrath B.P., Holmes D.G. Multicarrier PWM Strategies for Multilevel Inverters. *IEEE Transactions of industrial electronics*, 2002, vol. 49, no. 4, pp. 858–867.
 24. Rodriguez J., Lai J.S., Peng F.G. Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications. *IEEE Transactions of industrial electronics*, 2002, vol. 49, no. 4, pp. 724–738.
 25. Rathore S., Kirar M.K., Bhardwaj S.K. Simulation of cascaded H-bridge multilevel inverter using PD, POD, APOD techniques. *Electrical & Computer Engineering: an International Journal*, 2015, vol. 4, no. 3, pp. 27–41.
 26. Guo X., Wang X., Wang C., Lu Z., Hua C., Blaabjerg F. Improved modulation strategy for single-phase cascaded H-Bridge multilevel inverter. *IEEE Transactions of power electronics*, 2002, vol. 49, no. 4, pp. 724–738.
 27. Speeravathy L. Cascaded multilevel inverter with developed H bridge units. *International Journal of Science and Research*, 2015, vol. 4, no. 9, pp. 952–957.
 28. Chekh V., Rulevskiy V., Pravikova A., Lyapunov D. Closed-loop power supply for an autonomous object with a DC power transmission line and voltage drop compensation. *16th International Conference on Electronic Devices and Control Systems. Journal of Physics: Conference series*, 2020, vol. 1862, no. 1, pp. 1–6.
 29. Wintrich A., Ulrich N., Werner T., Tobias R. Problemy obespecheniya bezopasnosti silovyykh klyuchey v avariynnykh rezhimakh [Problems of ensuring the safety of power switches in emergency modes]. *Silovaya elektronika*, 2013, no. 4, pp. 50–58.
 30. Tregub D.R., Dobroskok N.A. Issledovanie raboty kaskadnogo preobrazovatelya v nesimetrichnom rezhime [Study of cascade converter operation in asymmetric mode]. *Nauka nastoyashego i buduschego*, 2019, vol. 1, pp. 248–252.
 31. Tregub D.R. Issledovanie avariynnykh rezhimov raboty kaskadnogo preobrazovatelya chastoty chastotnogo-reguliruемого elektroprivoda [Study of emergency modes of cascade frequency converter of variable frequency drive]. *Problemy i perspektivy razvitiya elektroenergetiki i elektrotekhniki* [Problems and prospects of development of electric power and electrical engineering]. Kazan, Kazan state energy university Publ., 2019. pp. 126–135.
 32. Narasimha Rao M., Karthick N., Madhukar Rao A. Fault tolerant ability of a multilevel inverter fed three phase induction motor for water pumping application. *2021 7th International conference on electrical energy systems*. Chennai, 2021. pp. 212–216.
 33. Chappa A., Gupta S., Kumar Sahu L., Kumar Gupta K., Vahedi H. Fault-tolerant asymmetrical multilevel inverter with preserved output power under post-fault operation. *IEEE Transactions of industrial electronics*, 2022, vol. 69, no. 7, pp. 6764–6773.
 34. Nos O.V., Dybko M.A., Nos N.I. Control algorithms for a multilevel voltage inverter with cascading H-Bridges during emergency operation. *Russian Electrical Engineering*, 2021, vol. 92, no. 12, pp. 755–760.
 35. Shubin S.S., Yamaliev V.U., Glazyrin A.S., Bunkov D.S., Kladiyev S.N., Rakov I.V., Bolovin E.V., Kovalev V.Z., Khamitov R.N. Estimation of submersible induction motor equivalent circuit parameters based on test data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 6, pp. 186–197. In Rus.
 36. Behrooz M. Survey of fault-tolerance techniques for three-phase voltage source inverters. *IEEE Transactions of industrial electronics*, 2014, vol. 61, no. 10, pp. 5192–5202.
 37. Julian A. L., Orti G. A comparison of redundant inverter topologies to improve voltage source inverter reliability. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2006, vol. 43, no. 5, pp. 1674–1678.
 38. Chen A., Hu L., Chen L., Deng Y., He X. A multilevel converter topology with fault-tolerant ability. *IEEE Transactions of power electronics*, 2005, vol. 20, no. 2, pp. 405–415.

Received: 29 June 2022.

Information about the authors

Sergey G. Mikhailchenko, Dr. Sc., head of Industry Electronics Department, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.

Vadim V. Timoshkin, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Nataliya A. Voronina, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Sergey M. Semenov, senior lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Semen S. Popov, graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Kirill S. Afanasiev, Cand. Sc., design engineer, JSC «Scientific & Industrial Centre «Polyus».

УДК 551.4.04

АНТРОПОГЕННЫЙ ФАКТОР В УСИЛЕНИИ ОПОЛЗНЕВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В САХАЛИНСКОЙ ОБЛАСТИ НА ПРИМЕРЕ СХОДА ОПОЛЗНЯ И РАЗРУШЕНИЯ ИНФРАСТРУКТУРЫ РЕЗЕРВУАРА ЧИСТОЙ ВОДЫ В П. СИНЕГОРСК

Сахаров Валерий Александрович¹,
sakhsakh@yandex.ru

Ильин Владимир Вениаминович¹,
vladimirilyin7@gmail.com

Ильин Николай Владимирович¹,
Zieqed@gmail.com

Строкин Константин Борисович¹,
strokin07@rambler.ru

Новиков Денис Геннадьевич¹,
Denis.G.Novikov@gmail.com

¹ Сахалинский государственный университет,
Россия, 693008, г. Южно-Сахалинск, ул. Пограничная, 2

Актуальность исследования обусловлена активизацией оползневых процессов в результате инженерной деятельности человека, приводящей к разрушению инфраструктурных объектов жизнеобеспечения городов и поселков Сахалинской области на примере схода оползня в районе резервуара чистой воды в п. Синегорск в июле 2017 г. В настоящее время в Сахалинской области ведется интенсивное освоение склонов горных отрогов и участков подножий, прилегающих непосредственно к склонам. К примеру, развитие спортивного комплекса «Горный воздух» и строительство горнолыжных трасс охватывает склоны, которые входят в состав территории города Южно-Сахалинска, и, соответственно, находятся в непосредственной близости не только к инфраструктурным объектам, но и к жилым районам города. Другие склоны с построенными трассами спускаются в долины рек с обустроенными водохранилищами (реки Рогатка и Еланка). Развитие неблагоприятных процессов в виде оползней на данных участках может привести к формированию селевых потоков катастрофических масштабов, направленных также в районы города.

Цель: изучить условия формирования оползня, оценить его параметры, выявить причины схода и дать прогноз на развитие аналогичных катастрофических процессов в будущем.

Объект: резервуар чистой воды в п. Синегорск, южный склон.

Методы: маршрутные рекогносцировочные обследования, бурение скважин до 10 м глубиной с отбором проб через 0,3...0,5 м, геофизические исследования георадарной установкой ОКО-2, лабораторные испытания физико-механических свойств грунтов.

Результаты. По данным исследований выполнено изучение инженерно-геологического строения участка развития оползня в районе резервуара чистой воды. Изучены параметры сошедшего оползня, выявлены условия и причины его формирования. Дана ретроспективная оценка устойчивости склона до схода оползня и оценка возможного развития опасных геологических процессов изученного участка в будущем.

Ключевые слова:

Оползневые процессы, склоновые процессы, склон, сейсмичность территории, делювиальные отложения, тело оползня, элювий, объемный вес грунта, угол внутреннего трения, уклон поверхности скольжения, коэффициент устойчивости склона, грунтовые воды.

Введение

Объект исследования находится на юге Сахалинской области, в п. Синегорск. Резервуар чистой воды (далее – резервуар) расположен на южном склоне сопки, на расстоянии 0,5 км севернее ближайшего жилого дома с разностью в отметках порядка 90 м. Резервуар представляет собой заглубленную емкость объемом 1000 м³ (10*20*5 м) из сборного железобетона. В зоне расположения резервуара находится также его инфраструктура – здание хлораторной, система трубопроводов со смотровыми колодцами и камерами переключений, сторожка, подъездные пути.

Сход оползня произошел в районе инфраструктурных коммуникаций резервуара в июле 2017 г. В результате схода были повреждены и разрушены

трубопроводы, колодцы, задвижки, обваловка резервуара и прилегающий ландшафт, был частично перекрыт стекающий по дну оврага ручей.

После схода оползня ООО «Геоэксперт» выполнило инженерно-геологические изыскания до глубины 10 м. В лабораторных условиях были определены физико-механические характеристики грунтов в естественном состоянии. Авторы статьи выполнили ретроспективную оценку коэффициента устойчивости склона для восстановленной поверхности до его обрушения.

Исходные данные

В качестве исходных данных были оценены общие сведения о строении района, а также результаты современных исследований по данному направлению [1–11].

Геологическое строение. В геологическом строении участка исследований принимают участие верхнемеловые образования красноярковской (K_2kr) и быковской (K_2bk) свит [12]. Краснояркоковская свита представлена туфопесчаниками, туффитами, туфоалевролитами, песчаниками, алевролитами, аргиллитами, с прослоями туфов дациандезитов и линзами конгломератов. Мощность пород свиты составляет 400–900 м. Быковская свита сложена алевролитами, редко туфоалевролитами, аргиллитами с прослоями песчаников и мергелистыми конкрециями. Мощность образований достигает 1600 м.

Верхнемеловые породы практически повсеместно перекрыты четвертичными отложениями мощностью до 6 м. Породы представлены делювием и элювием. Отличаются от коренных пород коричневым цветом.

Почвенно-растительный слой выделяется практически повсеместно на исследуемой территории, за исключением участков склона, подверженных антропогенным изменениям и гравитационным процессам. Мощность почвенно-растительного слоя составляет 0,10...0,15 м.

Тектоническое строение. В тектоническом отношении исследуемый участок расположен в пределах верхнепалеозойского-нижнекайнозойского структурного этажа, мелового-нижнепалеоценового структурного яруса, на Синегорском блоке Сусунайского блокового складчато-надвигового поднятия [13]. Район характеризуется интенсивной складчатостью и обилием дизъюнктивных нарушений. Углы падения крыльев складок составляют 20–60°. Смещение блоков горных пород по разрывным нарушениям, как правило, близко к вертикальному.

Гидрогеологические условия. Согласно гидрогеологическому районированию, район и участок работ расположен в пределах Западно-Сахалинского гидрогеологического массива [14]. Сложность гидрогеологических условий обусловлена сильной расчлененностью рельефа, значительной дислоцированностью пород и соответствующим развитием трещин и разломов. В гидрогеологическом разрезе преобладают безнапорные трещинные подземные воды, менее развиты трещинно-жилные подземные воды. Питание приурочено к водораздельным участкам, разгрузка – в долины рек. Вне зон развития трещиноватости фильтрационные свойства горных пород весьма низкие. Скважины практически безводные. Непосредственно на участке исследований до глубины бурения 10 м подземные воды не встречены. Экспресс-наливы в скважины показали весьма низкую проницаемость пород. После наливов положение уровня в течение часа наблюдений практически не изменилось. Грунты отнесены к слабоводопроницаемым (K_f от 0,005 до 0,3 м/сут).

Свойства грунтов. По результатам лабораторного тестирования грунтов в инженерно-геологическом разрезе выделено пять элементов (ИГЭ – инженерно-геологический элемент):

1. Слой почвенно-растительный, мощность 0,1...0,16 м. На склоне отсутствует.
2. Суглинок делювиальный, полутвердый, коричневый. Развита на глубине от 1,8 до 5,9 м, мощность слоя составляет 0,85...3,5 м.

3. Суглинок делювиальный, тугопластичный, коричневый. Развита на глубине от 0,15 до 1,4 м, мощность слоя составляет 0,5...0,7 м.
4. Суглинок делювиальный, мягкопластичный, коричневый. Вскрыт тремя скважинами (2–4), мощность слоя составляет 1,0...3,45 м. Развита на глубине от 0,16 до 3,6 м.
5. Суглинок элювиальный, твердый серый специфический грунт, аргиллит в зоне гипергенеза. Развита на всей площади работ. Кровля элемента вскрыта на глубине от 2,8 до 6,0 м. Мощность слоя более семи метров. Имеет характерный серый цвет. В забойной части скважин, на глубине 10 м, вскрываются грунты близкие к аргиллиту. (Физико-химическое выветривание специфического грунта связано с взаимным воздействием горных пород, воды и атмосферы).

Геологические и инженерно-геологические процессы

Эндогенные процессы. К неблагоприятным физико-геологическим явлениям на площади исследований относится ее высокая сейсмичность [15]. Согласно СП 14.13330.2018, по средним грунтовым условиям (второй категории) сейсмичность территории по карте «А» составляет восемь (8) баллов, по карте «В» – девять (9) баллов.

Экзогенные процессы. В июле 2017 г. на склоне юго-западной экспозиции сошел оползень срезавшего-консеквентного типа. Глубина захвата грунтов составила 3–4 м, ширина – до 20 м, длина тела оползня – до 46 м. В результате верхняя оползневая терраса сформировалась в районе отметки 289 м, а подошва оползня частично перекрыла стекающий по дну долины мелкий ручей. Бровка срыва находилась на отметке 300 м. Смещение тела составило 11 м. Угол наклона поверхности скольжения – от 19 до 38 градусов. Были повреждены колодцы, задвижки и трубопроводы, разрушена обваловка резервуара и природный ландшафт (рис. 1–6). Инженерно-геологический разрез склона представлен на рис. 7.

В результате выполненных обследований объекта были выявлены причины возникновения и активизации опасного геологического процесса.

Резервуар полностью установлен в четвертичных делювиальных грунтах – от его нижней части до кровли аргиллитов (находящихся в стадии гипергенеза, но имеющих высокие физико-механические характеристики) от 1 до 3 м. В бетонном отстойнике емкости появилась трещина с зиянием до 3 см и протяженностью около метра. Грунт, по результатам выполненных работ, слабоводопроницаемый, потому небольшой дополнительный расход воды в емкости не был заметным. Но процесс замачивания грунта, при постоянном водопитоке, получал все большее развитие. Кроме того, на склоне (отметка 289,72 м) наблюдается слабый источник воды, соответственно, по его водопитокам также формируются ослабленные зоны, впоследствии – поверхности скольжения. В результате совместного воздействия природного источника и искусственного притока из резервуара сформировалась обобщенная водная система, которая

и стала поверхностью скольжения тела оползня. Судя по возрасту изогнутых стволов деревьев (рис. 2), процесс формирования длился 5–7 лет. Когда момент

сдвигающих усилий превысил момент удерживающих сил, произошло оползание грунтового массива и его частичное обрушение.



Рис. 1. Поверхность отрыва и скольжения
Fig. 1. Landslide tear-off and sliding surface



Рис. 2. Тело оползня
Fig. 2. Landslide body



Рис. 3. Водоток под телом оползня
Fig. 3. Watercourse under the landslide body



Рис. 4. Повреждения производственной инфраструктуры
Fig. 4. Damage to production infrastructure



Рис. 5. Смещение колец колодца
Fig. 5. Offset of the well rings



Рис. 6. Разрушение обваловки резервуара
Fig. 6. Destruction of the tank embankment

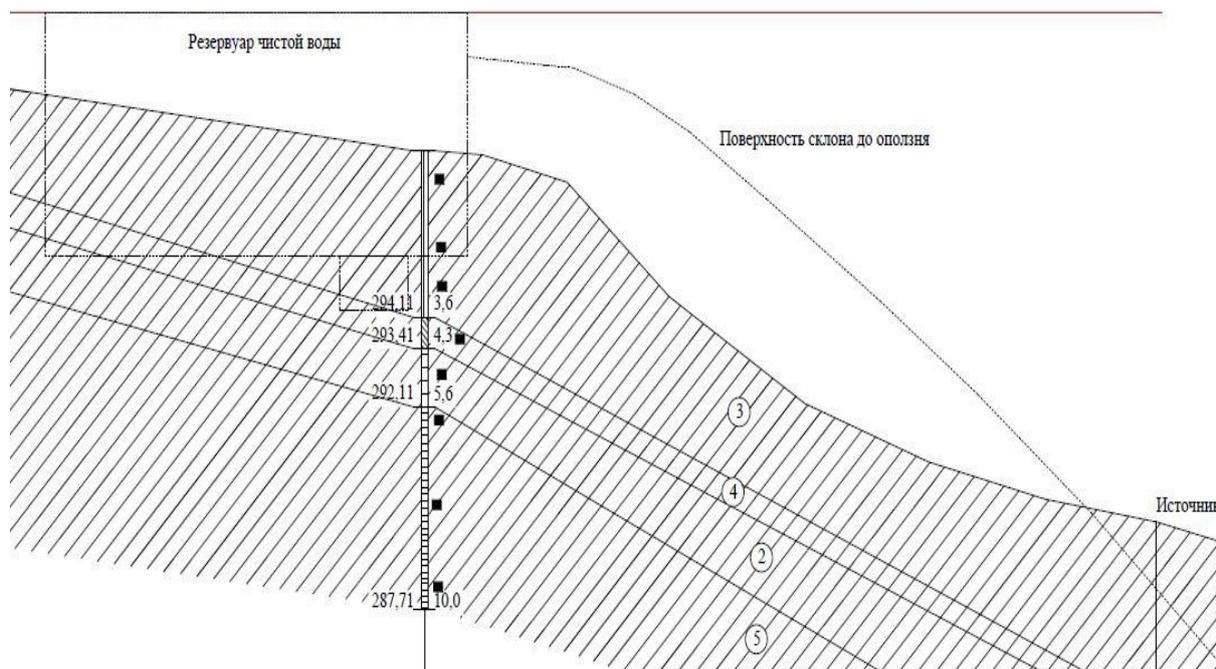


Рис. 7. Инженерно-геологический разрез склона
Fig. 7. Engineering-geological section of the slope

Как было отмечено выше, вся емкость стоит на делювиальных грунтах. На территории объекта в виде прослоев и линз вскрыт делювиальный суглинок мягкопластичной консистенции. Его залегание отмечается на уровне подошвы сооружения. Природные грунты в результате длительного замачивания также претерпели значительные изменения в сторону ослабления их физико-механических характеристик. Их улучшение непосредственно под зданием в естественных условиях не может произойти в ближайшее десятилетие. Кроме того, в разработанные ослабленные зоны вода будет поступать естественным путем – из атмосферных осадков, и, соответственно, будет сохраняться опасность формирования новых оползней, которые могут вовлекать в процесс уже и здание резервуара.

Заключение Расчеты коэффициентов устойчивости склона

Расчеты коэффициентов устойчивости склона были выполнены тремя методами:

- 1) метод расчета касательных сил прислоненного откоса;
- 2) суммированный расчет отдельных призм;
- 3) метод круглоцилиндрической поверхности скольжения.

Ретроспективная оценка устойчивости склона. Расчеты выполнены для восстановленной поверхности склона до обрушения (без учета формирования поверхности скольжения высачивающейся водой из резервуара). Соответственно: $K_y=1,04; 1,07; 1,03$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конюшков В.В., Веселов А.А., Кондратьева Л.Н. Комплексный анализ результатов инженерных изысканий для проектирования, строительства и эксплуатации сооружений на территориях со склоновыми процессами // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 11. – С. 111–125.

Низкие значения коэффициента устойчивости обусловлены крутизной склона и залеганием мягкопластичных грунтов в основании разреза. Дополнительный приток воды из резервуара создал условия для схода оползня.

Сход оползня обусловлен сочетанием множества факторов, включая антропогенный [16–18]. В бетонном отстойнике резервуара появилась трещина с шириной до 3 см и протяженностью до метра. Ее появление связано с высокой сейсмичностью района и техническим состоянием отстойника резервуара. На склоне (8 м ниже резервуара) находится малодебитный нисходящий родник, следовательно, по системе его водосбора формируются ослабленные зоны. Дополнительный приток воды из трещины отстойника резервуара, прослой мягкопластичных суглинков и система локального водосбора сформировали поверхность скольжения тела оползня.

Необходимо учитывать, что при наличии обводненной потенциальной поверхности скольжения и повышенной сейсмичности района сход оползня может произойти и при положительных показателях коэффициента устойчивости [19].

При строительстве объектов и развитии инфраструктуры Сахалина следует учитывать комплексное сочетание неблагоприятных природных и антропогенных факторов [20–24], так как появление одного процесса может спровоцировать развитие другого (оползни и сели).

2. Осипов В.И., Мамаев А.А., Ястребов А.А. Оценка и ранжирование по степени оползневой опасности участков строительства олимпийских объектов в г. Сочи // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2013. – № 6. – С. 530–537.
3. Семикина С.С., Сотников П.В. Оценка оползневой опасности береговых склонов на территории города Барнаул // Известия

- Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 7. – С. 67–75.
4. Строкова Л.А., Ермолаева А.В. Природные особенности строительства участка газопровода «Сила Сибири» на участке Чаяндинское нефтегазоконденсатное месторождение – Ленск // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 4. – С. 41–55.
 5. Landslide management in the UK – the problem of managing hazards in a «low-risk» environment / A.D. Gibson, M.G. Culshaw, C. Dashwood, C.V.L. Pennington // Landslides. – 2013. – V. 10 (5). – P. 599–610.
 6. Effects of bedrock anisotropy on hillslope failure in the Darjeeling-Sikkim Himalaya: an insight from physical and numerical models / S. Roy, A. Baruah, S. Misra, N. Mandal // Landslides. – 2015. – V. 12 (5). – P. 927–941.
 7. Strokova L.A. Methods of estimating surface settlement during driving of urban tunnels // Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 2010. – V. 47. – № 3. – P. 92–95.
 8. Strokova L.A., Ermolaeva A.V., Golubeva V.V. The investigation of dangerous geological processes resulting in land subsidence while designing the main gas pipeline in South Yakutia // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – № 43. – 6 p.
 9. Geometrical characteristics of earthquake-induced landslides and correlations with control factors: a case study of the 2013 Minxian, Gansu, China, Mw 5.9 event / Y. Tian, C. Xu, J. Chen, Q. Zhou, L. Shen // Landslides. – 2017. – V. 14 (6). – P. 1915–1927.
 10. Coupling fluvial processes and landslide distribution toward geomorphological hazard assessment: a case study in a transient landscape in Japan / C.-Y. Tsou, M. Chigira, Y. Matsushi, N. Hiraishi, N. Arai // Landslides. – 2017. – V. 14 (6). – P. 1901–1914.
 11. Walsby J.C. Geosure: a bridge between geology and decision making // Communicating Environmental Geoscience. – London, UK: Geological Society, 2008. – P. 81–87.
 12. Геология СССР. Т. 33. Остров Сахалин. – М.: Недра, 1970. – 431 с.
 13. Мелкий В.А., Осипенко А.Б., Ильин В.В. К вопросу о первичной природе метаморфических пород острова Сахалина // Тез. докл. конф. молодых ученых-вулканологов. – Петропавловск-Камчатский, 1985. – С. 23.
 14. Гидрогеология СССР. Т. XXIV. Остров Сахалин. – М.: Недра, 1972. – 344 с.
 15. Левин Б.В., Ким Ч.У., Соловьев В.Н. Оценка сейсмической опасности и результаты детального сейсмического районирования для городов о. Сахалин // Тихоокеанская геология. – 2012. – Т. 31. – № 5. – С. 93–103.
 16. Understanding of landslide risk through learning by doing: case study of Koroška Bela community, Slovenia / M.J. Auflic, S. Kumelj, T. Peternel, J. Jez // Landslides. – 2019. – V. 16 (9). – P. 1623–1628.
 17. Chen D., Wei W., Chen L. Effects of terracing practices on water erosion control in China: a meta-analysis // Earth-Science Review. – 2017. – V. 173. – P. 109–121.
 18. A dynamic model for rapid startup of high-speed landslides based on the mechanism of friction-induced thermal pressurization considering vaporization / N. Zhao, R. Zhang, E. Yan, X. He, J. Liu // Landslides. – 2020. – V. 17 (7). – P. 1545–1560.
 19. Castellanos B.A., Brandon T.L., VandenBerge D.R. Use of fully softened shear strength in slope stability analysis // Landslides. – 2016. – V. 13 (4). – P. 697–709.
 20. Ильин В.В., Сахаров В.А. Расчет устойчивости склонов на участках строительства объектов спортивно-туристического комплекса «Горный воздух» (Гора Большевик, г. Южно-Сахалинск) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 4. – С. 208–216. DOI: 10.18799/24131830/2019/4/227 (РИНЦ, Scopus, WoS).
 21. Сахаров В.А., Ильин В.В. Динамика экзогенных процессов на участках строительства объектов спортивно-туристического комплекса «Горный воздух» // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 9. – С. 32–41. DOI: 10.18799/24131830/2019/9/2253 (РИНЦ, Scopus, WoS).
 22. Landslides across the USA: occurrence, susceptibility, and data limitations / B.B. Mirus, E.S. Jones, R.L. Baum, J.W. Godt // Landslides. – 2020. – V. 17 (10). – P. 2271–2285.
 23. Mulargia F., Visconti G., Geller R.J. Scientific principles and public policy // Earth-Science Review. – 2018. – V. 176. – P. 214–221.
 24. A multidisciplinary approach for landslide residual risk assessment: the Pomarico landslide (Basilicata Region, Southern Italy) case study Landslides / A. Perrone, F. Canora, G. Calamita, J. Bellanova, V. Serlenga, S. Panebianco // Landslides. – 2021. – V. 18 (1). – P. 353–365.

Поступила 25.01.2022 г.

Информация об авторах

Сахаров В.А., кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией Технического нефтегазового института Сахалинского государственного университета.

Ильин В.В., старший преподаватель кафедры строительства Технического нефтегазового института Сахалинского государственного университета.

Ильин Н.В., студент Технического нефтегазового института Сахалинского государственного университета.

Строкин К.Б., доктор экономических наук, директор Технического нефтегазового института Сахалинского государственного университета.

Новиков Д.Г., научный сотрудник лаборатории Технического нефтегазового института Сахалинского государственного университета.

UDC 551.4.04

ANTHROPOGENIC FACTOR IN ENHANCING LANDSLIDE ACTIVITY IN SAKHALIN REGION ON THE EXAMPLE OF A LANDSLIDES AND DESTRUCTION OF THE INFRASTRUCTURE OF A PURE WATER RESERVOIR IN SINEGORSK

Valeriy A. Sakharov¹,
sakhsakh@yandex.ru

Vladimir V. Ilin¹,
sakhsakh@yandex.ru

Nikolay V. Ilin¹,
Zieqed@gmail.com

Konstantin B. Strokin¹,
strokin07@rambler.ru

Denis G. Novikov¹,
Denis.G.Novikov@gmail.com

¹ Sakhalin State University,
2, Pogranichnaya street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693008, Russia.

The relevance of the study is caused by the activation of landslide processes as a result of human engineering activities, leading to the destruction of infrastructure facilities for the life support of cities and settlements in the Sakhalin Region, as exemplified by a landslide in the area of the clean water reservoir in the village of Sinegorsk in July 2017. At present, the Sakhalin Region is intensively developing the slopes of mountain spurs and sections of the foothills adjacent directly to the slopes. For example, the development of the «Mountain Air» sports complex and the construction of ski slopes cover the slopes that are part of the territory of the city of Yuzhno-Sakhalinsk, and, accordingly, are in close proximity not only to infrastructure facilities, but also to residential areas of the city. Other slopes with built tracks descend into river valleys with equipped reservoirs (the Rogatka and Elanka rivers). The development of unfavorable processes in the form of landslides in these areas can lead to the formation of debris flows of catastrophic proportions, directed also to the districts of the city.

Purpose: to study the conditions for the formation of a landslide, evaluate its parameters, identify the reasons for the descent and give a forecast for the development of similar catastrophic processes in the future.

Object: reservoir of clean water in the village of Sinegorsk, southern slope.

Methods: route reconnaissance surveys, drilling of wells up to 10 m deep with sampling every 0,3 ... 0,5 m, geophysical studies by an OKO-2 GPR installation, laboratory tests of the physical and mechanical properties of soils.

Results. According to the research data, the study of the engineering-geological structure of the landslide development site in the clean water reservoir area was carried out. The parameters of the descended landslide were studied, the conditions and reasons for its formation were revealed. A retrospective assessment of the stability of the slope before the descent of a landslide and assessment of the possible development of dangerous geological processes in the studied area in the future are given.

Key words:

Landslide processes, slope processes, slope, seismicity of the territory, deluvial deposits, landslide body, eluvium, bulk density of soil, angle of internal friction, slope of the sliding surface, slope stability coefficient, groundwater.

REFERENCES

- Konyushkov V.V., Veselov A.A., Kondratyeva L.N. Complex analysis of the results of engineering surveys for the design, construction and operation of structures in areas with slope processes]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 11, pp. 111–125. In Rus.
- Osipov V.I., Mamaev A.A., Yastrebov A.A. Otsenka i ranzhirovanie po stepeni opolznevoy opasnosti uchastkov stroitelstva olimpiyskikh ob'yektov v g. Sochi [Assessment and ranking by the degree of landslide hazard of sites for construction of Olympic facilities in the city of Sochi]. *Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*, 2013, vol. 6, pp. 530–537.
- Semikina S.S., Sotnikov P.V. Assessment of landslide hazard of the coastal slopes in the city of Barnaul. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 7, pp. 67–75. In Rus.
- Strokova L.A., Ermolaeva A.V. Natural features of construction of the main gas pipeline «The Power of Siberia» on a site Chayandinskoe oil and gas field – Lensk. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 4, pp. 41–55. In Rus.
- Gibson A.D., Culshaw M.G., Dashwood C., Pennington C. V.L. Landslide management in the UK – the problem of managing hazards in a «low-risk» environment. *Landslides*, 2013, vol. 10, no. 5, pp. 599–610.
- Roy S., Baruah A., Misra S., Mandal N. Effects of bedrock anisotropy on hillslope failure in the Darjeeling-Sikkim Himalaya: an insight from physical and numerical models. *Landslides*, 2015, vol. 12, no. 5, pp. 927–941.
- Strokova L.A. Methods of estimating surface settlement during driving of urban tunnels. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2010, vol. 47, no. 3, pp. 92–95.
- Strokova L.A., Ermolaeva A.V., Golubeva V.V. The investigation of dangerous geological processes resulting in land subsidence while designing the main gas pipeline in South Yakutia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, no. 43, 6 p.
- Tian Y., Xu C., Chen J., Zhou Q., Shen L. Geometrical characteristics of earthquake-induced landslides and correlations with control factors: a case study of the 2013 Minxian, Gansu, China, Mw 5.9 event. *Landslides*, 2017, vol. 14, no. 6, pp. 1915–1927.
- Tsou C.-Y., Chigira M., Matsushi Y., Hiraishi N., Arai N. Coupling fluvial processes and landslide distribution toward geomorphological hazard assessment: a case study in a transient landscape in Japan. *Landslides*, 2017, vol. 14, no. 6, pp. 1901–1914.

11. Walsby J.C. *Geosure: a bridge between geology and decision making. Communicating Environmental Geoscience*. London, UK, Geological Society, 2008. pp. 81–87.
12. *Geologiya SSSR. T.33. Ostrov Sakhalin* [Geology of the USSR. Vol. 33. Sakhalin Island]. Moscow, Nedra Publ., 1970. 431 p.
13. Melkiy V.A., Osipenko A.B., Ilin V.V. K voprosu o pervichnoy prirode metamorficheskikh porod ostrova Sakhalina [To the issue of the primary nature of the metamorphic rocks of the island of Sakhalin]. *Tezisy dokladov konferentsii molodykh uchenykh-vulkanologov* [Proc. of the Conference of young scientists-volcanologists]. Petropavlovsk-Kamchatsky, 1985. pp. 23.
14. *Gidrogeologiya SSSR. T.XXIV. Ostrov Sakhalin* [Hydrogeology of the USSR. Vol. XXIV. Sakhalin island]. Moscow, Nedra Publ., 1972. 344 p.
15. Levin B.V., Kim Ch.U., Solovyev V.N. Otsenka seismicheskoy opasnosti i rezultaty detalnogo seismicheskogo rayonirovaniya dlya gorodov o. Sakhalin [Seismic hazard assessment and results of detailed seismic zoning for cities is. Sakhalin]. *Pacific Geology*, 2012, vol. 31, no. 5, pp. 93–103.
16. Auflic M.J., Kumelj S., Peternel T., Jez J. Understanding of landslide risk through learning by doing: case study of Koroška Bela community, Slovenia. *Landslides*, 2019, vol. 16, no. 9, pp. 1623–1628.
17. Chen D., Wei W., Chen L. Effects of terracing practices on water erosion control in China: a meta-analysis. *Earth-Science Review*, 2017, vol. 173, pp. 109–121.
18. Zhao N., Zhang R., Yan E., He X., Liu J. A dynamic model for rapid startup of high-speed landslides based on the mechanism of friction-induced thermal pressurization considering vaporization. *Landslides*, 2020, vol. 17, no. 7, pp. 1545–1560.
19. Castellanos B.A., Brandon T.L., VandenBerge D.R. Use of fully softened shear strength in slope stability analysis. *Landslides*, 2016, vol. 13, no. 4, pp. 697–709.
20. Ilin V.V., Sakharov V.A. Calculation of the stability of slopes on the construction sites of the objects of the sports and tourist complex «Mountain Air» (Mount Bolshevik, Yuzhno-Sakhalinsk). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 4, pp. 208–216. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2019/4/227
21. Saharov V.A., Ilin V.V. Dynamics of exogenous processes at the construction sites of the sports and tourist complex «Mountain Air». *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 9, pp. 32–41. DOI: 10.18799/24131830/2019/9/2253.
22. Mirus B.B., Jones E.S., Baum R.L., Godt J.W. Landslides across the USA: occurrence, susceptibility, and data limitations. *Landslides*, 2020, vol. 17, no. 10, pp. 2271–2285.
23. Mulargia F., Visconti G., Geller R.J. Scientific principles and public policy. *Earth-Science Review*, 2018, vol. 176, pp. 214–221.
24. Perrone A., Canora F., Calamita G., Bellanova J., Serlenga V., Panebianco S. A multidisciplinary approach for landslide residual risk assessment: the Pomarico landslide (Basilicata Region, Southern Italy) case study. *Landslides*, 2021, vol. 18, no. 1, pp. 353–365.

Received: 25 Jan 2022

Information about the authors

Valeriy A. Sakharov, Cand. Sc., head of the laboratory of physical and chemical research, Sakhalin State University.

Vladimir V. Ilin, senior teacher, Sakhalin State University.

Nikolay V. Ilin, student, Sakhalin State University.

Konstantin B. Strokin, Dr. Sc., director, Oil and Gas Technical Institute, Sakhalin State University.

Denis G. Novikov, laboratory researcher, Sakhalin State University.

УДК 622.276.76

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЛУШЕНИЯ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ВОЛГО-УРАЛЬСКОЙ НЕФТЕГАЗОНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ С АНОМАЛЬНО НИЗКИМИ ПЛАСТОВЫМИ ДАВЛЕНИЯМИ

Мардашов Дмитрий Владимирович¹,
Mardashov_DV@pers.spmi.ru

Лиманов Максим Николаевич¹,
LimanovMaxim@yandex.ru

¹ Санкт-Петербургский горный университет,
Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2.

Актуальность исследования обусловлена недостаточной технологической эффективностью применяемых на месторождениях Волго-Уральской нефтегазоносной провинции составов глушения для подземного ремонта скважин. Вязкость растворов на забое скважины не является достаточной и пропускает фильтрат жидкости глушения сквозь пласт, что приводит к поглощению технологической жидкости и кольматации призабойной зоны пласта. Недостаточные показатели критического напряжения сдвига также влияют на эффективность операций глушения, поскольку малые значения напряжения сдвига говорят об излишней подвижности технологической жидкости в стволе скважины.

Цель: сравнить свойства разработанного полимерного состава глушения со свойствами уже применяемого состава с аналогичным принципом действия, а также сравнить свойства разработанного нефтяного геля со свойствами инвертно-эмульсионного раствора, применяемого на месторождениях. Сделать вывод о полученных данных для новых композиций в сравнении со старыми.

Методы: имитация пластовых процессов, помещение существующих составов глушения в установки, создающие пластовые условия, и дальнейшее измерение их свойств. Проведение аналогичных операций с новыми составами для проверки сходимости результатов. Анализ полученных данных, сравнение свойств различных составов между собой.

Объекты: жидкости глушения скважин, применяемые на месторождениях Волго-уральской нефтегазоносной провинции, а также разработанные полимерные составы и жидкости на углеводородной основе.

Результаты. Получены сравнительные характеристики основных свойств блокирующих составов, такие как: скорость коррозии, эффективная вязкость, комплексная вязкость, статическое напряжение сдвига, предельное напряжение сдвига, а также время деструкции. Полученные результаты позволяют рекомендовать разработанные составы для применения на месторождениях Волго-Уральской нефтегазоносной провинции.

Ключевые слова:

Глушение скважин, аномально низкие пластовые давления, блокирующий состав; нефтяной гель, водонабухающий кольматант, Волго-Уральская нефтегазоносная провинция.

Введение

Операции по ремонту проводятся на каждой скважине и являются неизбежным следствием ее эксплуатации. Перед непосредственным проведением ремонта скважину необходимо заглушить. Таким образом, осложнения, возникающие при глушении скважин, являются актуальной проблемой для каждой нефтегазодобывающей компании [1, 2].

Причины осложнений при глушении скважин можно условно разделить на две части. В первую часть выделяют естественные причины, такие как: сложная структура порового пространства, наличие в пустотах породы несмешивающихся жидкостей, низкая пористость и проницаемость. Вторую часть составляют искусственные причины – то есть те, которые проявляются в процессе эксплуатации скважин: уменьшение пластового давления, увеличение обводненности продукции из-за использования продавочных и промысловых жидкостей на водной основе, попадание в пласт которых приводит к снижению фазовой проницаемости призабойной зоны пласта (ПЗП) по нефти [3]. Как итог, коэффициент аномальности таких месторождений будет снижаться, а обводненность продукции расти. Для решения этих проблем применяются жидкости глушения скважин (ЖГС) по-

ниженной плотности, а также составы на углеводородной основе [4, 5].

Месторождениям Волго-Уральской нефтегазоносной провинции [6] свойственны различные свойства. Данная статья посвящена совершенствованию ЖГС, применяемых на Оренбургском нефтегазоконденсатном месторождении, и решению проблем, характерных для карбонатных коллекторов [7–9].

В рамках написания данного исследования были проведены испытания ЖГС для условий карбонатного коллектора, высокого газосодержания, низкого пластового давления, а также протяженного горизонтального продуктивного участка.

В рамках данной работы было проведено исследование физико-химических свойств новых блокирующих составов – описаны способ приготовления блокирующих составов, методики определения плотности, скорости коррозии, оценка термостабильности. Также проведено исследование реологических свойств и деструкции.

Общие теоретические сведения

Методы так называемого «сходящего» глушения скважин [10] направлены на минимизацию негативных эффектов при проведении операции глушения.

Они позволяют продлить срок эксплуатации скважин, снизить время выхода на режим. К методам щадящего глушения относят применение:

- высокочистых солевых систем;
- гидрофобизаторов;
- блокирующих составов;
- эмульсионных составов;
- солевых составов.

В рамках данной статьи были рассмотрены блокирующие составы и инвертно-эмульсионные растворы. Последние применяются в операциях глушения для сохранения водонасыщенности призабойной зоны пласта, предотвращения выпадения нерастворимых солей и набухания глин [11].

При щадящем глушении применяются временные блокирующие составы, так называемые «блок-пачки». Такие составы представляют собой подобранный для конкретных пластовых условий водо-солевой раствор с применением фракционного водонабухающего кольматанта, который также был протестирован в рамках данных исследований. Такой раствор формирует на границе скважины непроницаемую для водных составов корку [12]. По окончании срока жизни корки она удаляется без применения дополнительных разрыхлителей и разрушителей. Такие композиции позволяют:

- уменьшить количество жидкости, проникающей в пласт в процессе проведения подземного ремонта скважин;
- сохранить фильтрационно-ёмкостные свойства (ФЕС) пласта;
- минимизировать риски по контролю скважины;
- сократить время выхода скважины на режим.

Описание проводимых исследований

Исследовались следующие блокирующие композиции:

- полимерный блокирующий состав (БС) (в сравнении с применяемым на месторождениях блокирующей композицией (БК));
- нефтяной гель (НГ) (в сравнении с применяемым составом инвертно-эмульсионного раствора (ИЭР));
- водонабухающий кольматант (ВК).

Для приготовления БС использовались следующие реагенты:

- загеливатель БС-1 (водорастворимый органический полимер);
- неорганический сшивающий реагент БС-2;
- регулятор сшивки БС-3.

Состав готовится следующим образом – к 100 см³ пресной воды последовательно добавлялось 0,8 г БС-1, 0,2 г БС-2 и 0,12 см³ БС-3. После добавления каждого реагента получившийся раствор перемешивается до полного гидратирования. При этом максимальное вязкоупругое состояние достигается по истечении 30 минут после приготовления.

Для сравнения БС использовалась БК, применяемая на эксплуатационных объектах [13]. Рецепт композиции (в пересчете на 100 см³ пресной воды) представляет собой:

- БК-1 (полимер) – 0,5 г;
- БК-2 (сшиватель) – 0,15 г;

- БК-3 (регулятор сшивки) – 0,125 см³ (0,133 г).
Для приготовления НГ использовались следующие реагенты:

- углеводородная основа (дизельное топливо);
- загеливатель НГ-1 – жидкость, разделенная на 2 фазы: верхняя фаза (80 % об.) – жидкость черного цвета, а нижняя фаза (20 % об.) – жидкость темно-коричневого цвета;
- активатор сшивки НГ-2.

Здесь на 100 см³ раствора нефтяного геля приходится 15 см³ загеливателя НГ-1 и 12 см³ активатора сшивки НГ-2. Максимальный набор вязкости наступал в течение 1 часа после полного перемешивания. В качестве деструктора выступала соляная кислота (концентрацией 15 %), облагороженная деэмульгатором. При необходимости утяжеления в раствор может добавляться СаСО₃.

Был приготовлен применяемый на месторождениях ИЭР [14] для сравнения с ним НГ. В 100 см³ ИЭР содержится 2 см³ эмульгатора «Нефтонол НЗБ», 20 см³ нефти и 78 см³ раствора СаСl₂ (ρ=1,318 г/см³). В свою очередь раствор ВК представляет собой 4%-й раствор водонабухающего кольматанта в воде. На рис. 1 представлен процесс набухания состава. Для определения времени набухания к 50 см³ воды добавлялся кольматант [15] в количестве 2 г, затем визуально фиксировалось положение верхнего края кольматанта.

В результате наблюдений установлено, что в первые 30 мин происходит интенсивное поглощение воды кольматантами и их набухание. При этом ВК изменил занимаемый объем в мерном цилиндре в 15 раз (с 5 до 75 мл) после добавления 50 мл дистиллированной воды. Отдельно взятые гранулы ВК после набухания увеличились в длину примерно в 2–2,5 раза (рис. 2). Время полного набухания ВК составило 2 ч 50 мин.

Плотность составов была измерена с помощью плотномера DE-40 при температуре 20 °С. Плотность состава БС составила 0,97 г/см³, поскольку он состоит преимущественно из пресной дистиллированной воды. НГ состоит в основном из дизельного топлива – его плотность составляет 0,89 г/см³. Плотность водонабухающего кольматанта не определялась в связи с его раздробленностью.

Коррозионная активность исследуемых ЖГС проводилась по методике, описанной в ГОСТ 9.502-82. Перед проведением эксперимента, согласно ГОСТ 2789-73, поверхность металлических пластин с размерами 5×1,2×0,025 см подготавливалась для воздействия на нее исследуемыми составами

Средняя температура рассматриваемого участка месторождения составляет 37 °С. Именно при этой температуре в статическом режиме проводились исследования. Образцы металла выдерживались в составах глушения на протяжении 24 часов, после чего измерялась потеря массы образцов. Скорость коррозии вычислялась по формуле [16]:

$$V_c = \frac{m_1 - m_2}{S \cdot t},$$

где m_1 – масса пластины до испытания, г; m_2 – масса пластины после испытания, г; S – площадь пластины, м²; t – время проведения опыта, ч.

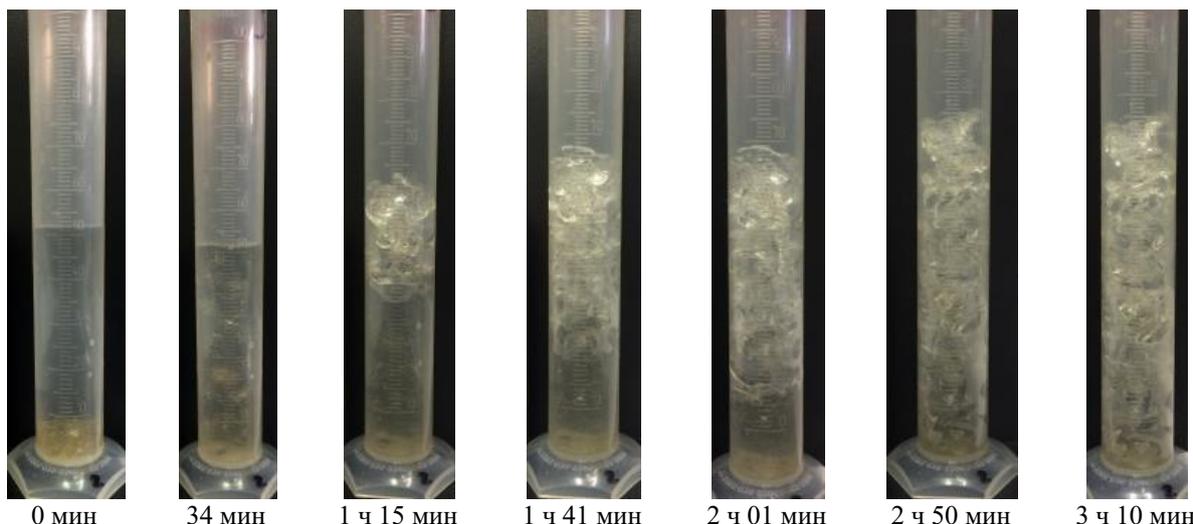


Рис. 1. Определение времени набухания ВК
 Fig. 1. Measurement of «BK» swelling time



Рис. 2. Изменение линейных размеров ВК после набухания
 Fig. 2. Change in the linear dimensions of the «BK» after swelling

По полученным результатам составлена табл. 1.

Таблица 1. Результаты коррозионных исследований блокирующих композиций

Table 1. Results of corrosion studies of blocking compositions

Блокирующий состав Blocking compound	Скорость коррозии/Corrosion rate	
	г/м ² ·час/г/м ² ·h	мм/год/мм/year
«БС»	0,147	0,164
«БК»	0,128	0,143
«НГ»	0,073	0,082
«ИЭР»	0,046	0,052
«ВК»	–	–

Согласно требованиям РД 153-39-023-97, скорость коррозии стали не превышает 0,10–0,12 мм/год.

Как и в случае определения коррозионной активности блокирующей композиции БК, скорость коррозии состава БС обладает значениями, незначительно превышающими (примерно на 0,04–0,06 мм/год) установленные нормы 0,10–0,12 мм/год, что можно объяснить контактом содержащихся в составах пузырьков воздуха с металлической пластиной [17]. Данное превышение скорости коррозии несущественно, т. к. блокирующий состав контактирует с металлом подземного оборудования только в процессе его закачки в скважину.

Исследование реологических свойств

Основные свойства геля, на которые необходимо обращать внимание при подборе состава, – это время гелеобразования, стабильность его технологических свойств во времени и механическая прочность геля на

сдвиг [18]. В связи с вышесказанным определялись следующие реологические параметры блокирующих композиций, характеризующие условия проведения закачки составов в скважину:

- 1) «Кривая течения» – зависимость напряжения сдвига (эффективной вязкости) БК от скорости сдвига до сшивки полимерной композиции, определяет вязкость состава при различных скоростях его закачки в скважину.
- 2) Время гелеобразования – зависимость эффективной и комплексной вязкости БК от времени. Этот параметр важен для оценки свойств БК при его начальном этапе фильтрации в ПЗП.
- 3) Предельное напряжение сдвига (ПНС) показывает разрушаемость ЖГС. Является зависимостью скорости сдвига от напряжения сдвига.
- 4) Критическое напряжение сдвига (КНС) показывает, под воздействием какой силы начинается движение состава в пласте. Этот параметр показывает, насколько интенсивно фильтруется ЖГС из ствола скважины в призабойную зону пласта

Для расчета скорости сдвига использовалась следующая формула [19]:

$$\gamma = \frac{4 \cdot v_{cp}}{R},$$

где R – внутренний радиус колонны насосно-компрессорной труб (НКТ) или эксплуатационной колонной (ЭК), м; v_{cp} – средняя скорость потока, м/с:

$$v_{cp} = \frac{Q}{\pi \cdot R^2},$$

где Q – расход раствора, м³/с.

Исходные данные и результаты расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 2. Исходные данные и результаты расчетов скорости сдвига при закачке БК в колонну НКТ и ЭК

Table 2. Initial data and results of calculations of the shear rate when pumping the «БК» into the tubing string

Параметр Parameter	Значение Value
Внутренний диаметр насосно-компрессорной трубы, мм Inner diameter of tubing, mm	62
Внутренний диаметр эксплуатационной колонны, мм Inner diameter of production string, mm	216
Площадь сечения насосно-компрессорной трубы, м ² Tubing cross-sectional area, m ²	0,003
Площадь сечения эксплуатационной колонны, м ² Production string cross-sectional area, m ²	0,037
Расход БК, м ³ /с «БК» flow rate, m ³ /s	0,004
Скорость закачки БК в НКТ, м/с Injection rate of «БК» compound into tubing, m/s	1,325
Скорость закачки БК в ЭК, м/с Injection rate of «БК» compound into production string, m/s	0,109
Скорость сдвига БК в НКТ, 1/с Shear rate of «БК» inside tubing, 1/s	171
Скорость сдвига БК в ЭК, 1/с Shear rate of «БК» inside production string, 1/s	4

Построение кривой течения

Для более комфортного сравнения результатов полученных «кривых течения» разработанных блокирующих композиций с применяемыми составами БК и ИЭР строится зависимость эффективной вязкости от числа оборотов цилиндра [20].

Результаты исследований «кривых течений» блокирующих композиций БС и БК представлены на рис. 3.

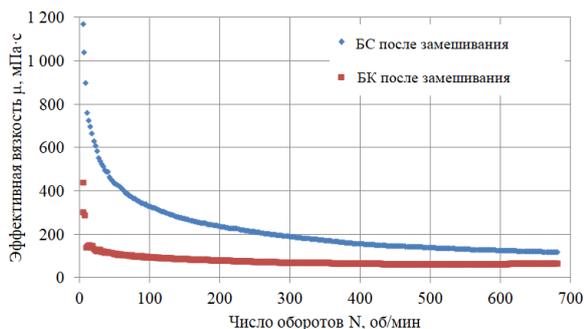


Рис. 3. Сравнение «кривых течений» составов БС и БК
Fig. 3. Dependence of the effective viscosity of «БС» and «БК» on the number of cylinder revolutions

При частоте оборотов $N=300$ об/мин вязкость состава БС в 2,7 раза превышает эффективную вязкость состава БК.

По результатам исследования «кривых течений» НГ и эмульсионного состава ИЭР установлено, что нефтяной гель после приготовления обладает эффективной вязкостью ниже в 2–2,5 раза, чем эффективная вязкость ИЭР, приготовленного в лаборатории, и ИЭР, взятого на промысле, при $N=300$ об/мин (рис. 4).

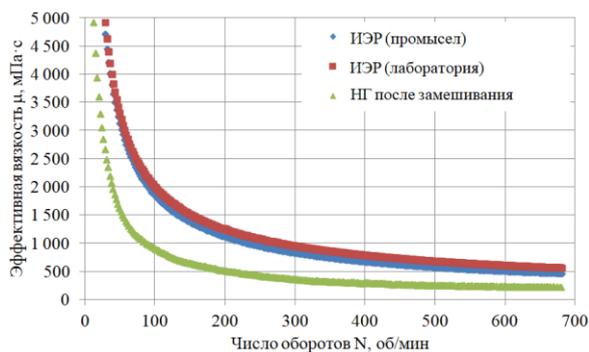


Рис. 4. Зависимость эффективной вязкости НГ и ИЭР от числа оборотов цилиндра

Fig. 4. Dependence of the «НГ» and «ИЭР» effective viscosity on the number of cylinder revolutions

Эффективная вязкость водонабухающего кольмантанта ВК определялась после окончания процесса набухания (после 3 ч). Высокая эффективная вязкость данного состава обуславливает его высокие блокирующие свойства после набухания (рис. 5).

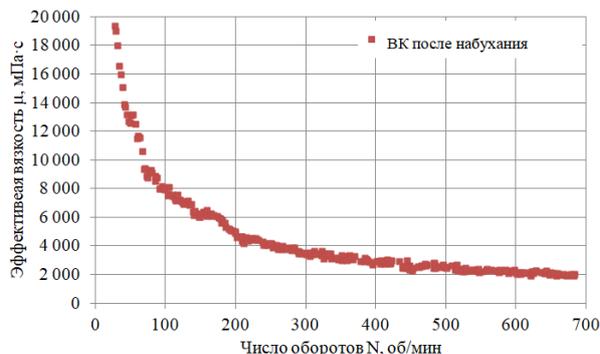


Рис. 5. Зависимость эффективной вязкости ВК от числа оборотов цилиндра

Fig. 5. Dependence of the «ВК» effective viscosity on the number of cylinder revolutions

Результаты исследований кривых течения блокирующих составов при частоте оборотов цилиндра 300 об/мин сведены в табл. 3.

Таблица 3. Эффективная вязкость блокирующих композиций при 300 об/мин

Table 3. Blocking compositions effective viscosity at 300 rpm

Название блокирующего состава Compound name	Эффективная вязкость, мПа·с Effective viscosity, mPa·s
«БС»	192
«БК»	70,8
«НГ»	359
«ИЭР» (лаборатория/laboratory)	949
ИЭР (промысел/oil field)	829
ВК (после набухания/after swelling)	3530

Как видно из приведенных данных, блокирующая композиция БС обладает в 2,5 раза меньшей подвижностью по сравнению с составом БК. Нефтяной гель же на момент приготовления обладает в 2,3 раза большей подвижностью, чем у инвертно-эмульсионного раствора, обогороженного эмульгатором «Нефтенол НЗб»

Определение времени гелеобразования

На рис. 6 представлены зависимости эффективной вязкости составов БС и БК от времени.

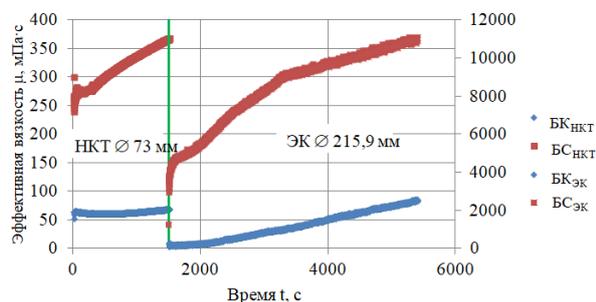


Рис. 6. Зависимость эффективной вязкости БС и БК от времени

Fig. 6. Time dependence of the effective viscosity of «БС» and «БК»

Эффективная вязкость блокирующей композиции БС при скорости сдвига $D=171 \text{ c}^{-1}$ в 4–6 раз выше, чем аналогичный параметр у состава БК. При переходе состава БС из колонны НКТ в эксплуатационную колонну значение его эффективной вязкости увеличивается в 8 раз; у состава БК же происходит рост эффективной вязкости в 3 раза. Этот процесс связан с увеличением проходного сечения трубы и, как следствие, уменьшением скорости сдвига. На конечном этапе закачки раствора эффективная вязкость БС была больше вязкости БК в 6,5 раз.

После окончания шивки блокирующие составы подвергались осциллирующим напряжениям при динамических испытаниях. Результаты определения комплексной вязкости композиций БС и БК представлены на рис. 7.

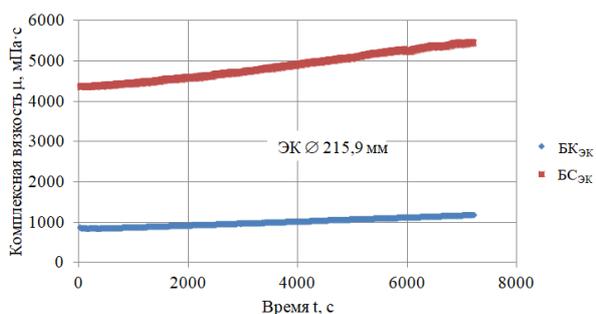


Рис. 7. Зависимость комплексной вязкости БС и БК от времени

Fig. 7. Dependence of the complex viscosity of «БС» and «БК» on time

Комплексная вязкость БС превышает вязкость БК примерно в 5 раз.

В сравнении с представленными выше составами НГ обладает невысокими значениями вязкости. Кривую комплексной вязкости условно можно разделить на два участка: на первом набор вязкости происходит быстро и нелинейно; на втором вязкость возрастает линейно и не столь интенсивно. Конец первого участка определяется как время окончания гелеобразования. И в данном случае (рис. 8) составляет 50 минут.

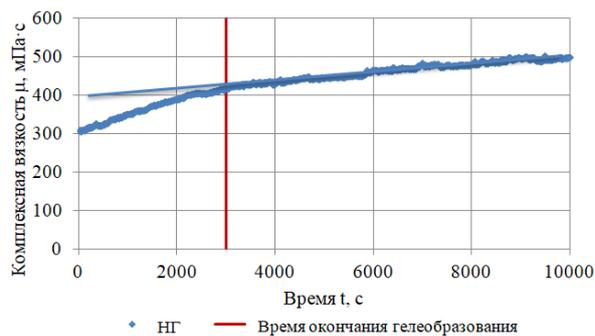


Рис. 8. Зависимость комплексной вязкости НГ от времени

Fig. 8. Time dependence of the complex «НГ» viscosity

Таким образом, блокирующая композиция БС отличается от состава БК тем, что обладает:

- большей эффективной вязкостью (в 4–6 раз) при движении в колонне НКТ во время закачки (при скорости сдвига $D=171 \text{ c}^{-1}$ в первые 25 мин);
- большей эффективной вязкостью (в 6,5 раз) при движении в эксплуатационной колонне во время закачки (при скорости сдвига $D=4 \text{ c}^{-1}$ в оставшиеся 65 мин);
- большей комплексной вязкостью (в 5 раз) во время выжидания момента окончания шивки.

Таким образом, блокирующая композиция БС менее подвижна и обладает большей блокирующей способностью, чем БК.

Блокирующая композиция НГ характеризуется как нелинейный гель, комплексная вязкость увеличивается за 2,5–3 ч примерно в 1,7 раз.

Критическое напряжение сдвига

Результаты по определению КНС в режиме контролируемого напряжения сдвига представлены на рис. 9.

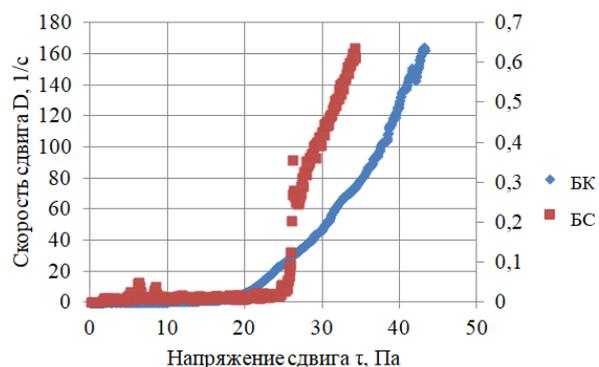


Рис. 9. Зависимость скорости сдвига БК и БС от напряжения сдвига

Fig. 9. Dependence of «БК» and «БС» shear rate on the shear stress

Проведены исследования по определению КНС растворов БК и БС после закачки их в скважину (90 минут после приготовления), в результате которых выявлены значения напряжения сдвига, при которых происходит «разрыв сплошности», и в приза-

бойную зону скважины начинает фильтроваться блокирующая жидкость. По мере уменьшения напряжения сдвига уменьшается также и градиент давления, при котором ЖГС фильтруется в продуктивный пласт.

Результаты по определению критического напряжения сдвига блокирующих составов БК и БС сведены в табл. 4.

Таблица 4. Критическое напряжение сдвига БК и БС

Table 4. Critical shear stress of «БК» and «БС»

Название состава Compound name	Критическое напряжение сдвига, Па Critical shear stress, Pa
«БК»	18,5
«БС»	25,5

БС после закачки в скважину обладает более низкой фильтруемостью в ПЗП, чем композиция БК (КНС состава БС примерно на 30 % больше, чем КНС состава БК).

Предельное напряжение сдвига

Исследования по определению предельного напряжения сдвига (ПНС) в режиме контролируемой скорости сдвига представлены на рис. 10.

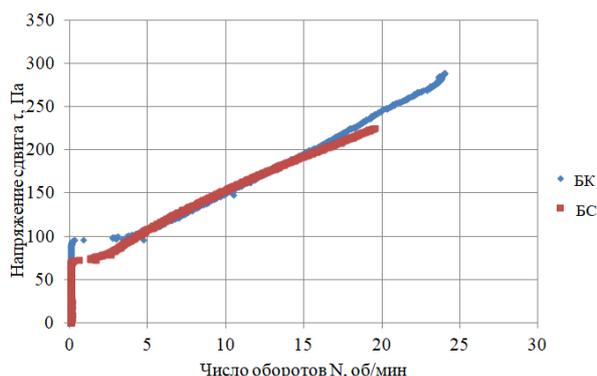


Рис. 10. Зависимость напряжения сдвига БК и БС от числа оборотов (N)

Fig. 10. Dependence of the «БК» and «БС» shear stress on the number of revolutions (N)

После сшивки показатель ПНС состава БС на 22 % меньше, чем аналогичный показатель у БК.

Результаты аналогичного определения ПНС блокирующих составов ИЭР и НГ представлены на рис. 11.

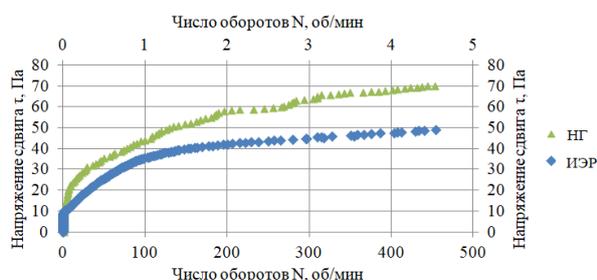


Рис. 11. Зависимость напряжения сдвига НГ и ИЭР от числа оборотов (N)

Fig. 11. Dependence of the «НГ» and «ИЭР» shear stress on the number of revolutions (N)

В результате исследований напряжения сдвига НГ и ИЭР в режиме контролируемой скорости сдвига установлено, что предельное напряжение сдвига блокирующего состава НГ в 2 раза выше, чем у ИЭР.

Результаты определения предельного напряжения сдвига водонабухающего кольматанта ВК представлены на рис. 12.

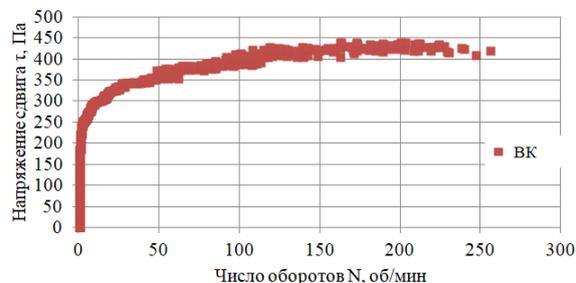


Рис. 12. Зависимость напряжения сдвига ВК от числа оборотов (N)

Fig. 12. Dependence of the «ВК» shear stress on the number of revolutions (N)

Результаты исследований по определению предельного напряжения сдвига исследуемых блокирующих составов сведены в табл. 5.

Таблица 5. Предельное напряжение сдвига исследуемых блокирующих составов в сравнении с БК и ИЭР

Table 5. Blocking compounds ultimate shear stress in comparison with «БК» and «ИЭР»

Название состава Compound name	Предельное напряжение сдвига, Па Ultimate shear stress, Pa
«БС»	73
«БК»	94
«НГ»	20,9
«ИЭР»	10,3
ВК (после набухания/ after swelling)	252

Согласно полученным данным, в случае глушения скважины новым составом БС для вызова притока в ней требуется создание меньших депрессий, чем у применяемого на месторождениях состава БК. Это происходит из-за разных значений предельного напряжения сдвига, которое для состава БС меньше на 25 %.

Разработанный НГ более устойчив к депрессии, чем применяемый ИЭР, поскольку предельное напряжение сдвига НГ в 2 раза больше. Это означает, что для удаления состава НГ необходимо создать больший перепад давления.

Для исследования процесса химической деструкции блокирующих составов БС и НГ использовался 15%-й (мас.) раствор соляной кислоты, а для композиции ВК – деструктор на спиртовой основе.

Процесс деструкции для каждого из составов исследовался одинаково: в емкости с составами массой 10 г добавлялось по 50 г 15 %-ного раствора соляной кислоты (деструктора на спиртовой основе для ВК). После чего пробы помещали в термошкаф при температуре в 37 °С (пластовые условия), и визуально оце-

нивалось состояние составов. Помимо этого, степень разрушаемости составов определялась при помощи «синей ленты» (ГОСТ 12026-76). Содержимое емкостей выливалось на нее и промывалось водой аналогичной температуры.

Результаты определения деструкции составов представлены в табл. 6.

Таблица 6. Результаты по оценке деструкции блокирующих композиций

Table 6. Evaluation blocking compounds destruction

Название состава Compound name	Время, мин Time, min	Степень разрушения, % Destruction degree, %
«БС»	120	100
«НГ»	30	66
	60	71
	120	74
	240	75
	1440	75
«ВК»	360	81

Исследования показали, что блокирующая композиция БС полностью разрушается в 15%-м растворе соляной кислоты в течение 2 ч. Для разрушения НГ в 15%-й раствор соляной кислоты дополнительно дозировался деэмульгатор OSC DM-1 (ЗАО «Специальная нефтепромысловая химия») с концентрацией 1 % мас. Данный состав разрушился частично, и максимальная деструкция составила 75 % после 4 ч воздействия. Водонабухающий коагулянт ВК после 6 ч воздействия визуально свои размеры не изменил, при этом степень разрушения составила 81 %.

Заключение

Для повышения эффективности глушения нефтяных скважин на месторождениях Волго-Уральской нефтегазональной провинции рекомендуется применение блокирующих составов БС, НГ и ВК. Результаты сравнения этих составов с базовыми составами аналогичного характера, применяющимися на месторождениях, показали следующее:

1. Блокирующий состав БС в сравнении с ВК (блокирующей композицией) обладает:
 - большей эффективной вязкостью (в 4–6 раз) при движении в колонне НКТ во время закачки (при скорости сдвига $D=171 \text{ c}^{-1}$ в первые 25 мин);
 - большей эффективной вязкостью (в 6,5 раз) при движении в эксплуатационной колонне во

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Legkokonets V.A., Islamov S.R., Mardashov D.V. Multifactor analysis of well killing operations on oil and gas condensate field with a fractured reservoir // Proc. of the International Forum-Contest of Young Researchers: Topical Issues of Rational Use of Mineral Resources; Taylor & Francis. – London: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2019. – P. 111–118.
2. Developing nanocomposite gels from biopolymers for leakage control in oil and gas wells / A. Yudhowijoyo, R. Rafati, A. Haddad, D. Pokrajac, M. Manzari // SPE Offshore Europe Conference and Exhibition. – OnePetro. – Aberdeen, UK, September, 2019. – 12 p.

- время закачки (при скорости сдвига $D=4 \text{ c}^{-1}$ в оставшиеся 65 мин);
 - большими комплексной вязкостью (в 5 раз) и критическим напряжением сдвига (на 30 %), характеризующими интенсивность фильтрации состава в призабойной зоне пласта;
 - меньшим предельным напряжением сдвига (на 22 %), характеризующим более благоприятные условия для разрушения блокирующего состава и освоения скважины;
 - меньшей подвижностью и большей блокирующей способностью.
2. Блокирующая композиция НГ характеризуется как нелинейный гель, комплексная вязкость увеличивается за 2,5–3 ч примерно в 1,7 раз. Также состав НГ обладает вязкоупругими свойствами в отличие от инвертно-эмульсионного раствора, комплексную вязкость которого при условиях, что исследовалась композиция НГ, определить не удалось.
 3. Блокирующие составы НГ и ИЭР обладают невысокими значениями предельного напряжения сдвига, при этом нефтяной гель более устойчив к депрессии (предельное напряжение сдвига НГ в 2 раза больше, чем у ИЭР). Для удаления блокирующего состава НГ из призабойной зоны пласта необходимо создать большой перепад давления.
 4. ВК обладает высокой эффективной вязкостью после набухания (вязкость выше в 17,5 раз, чем у БС), что свидетельствует о его высоких блокирующих свойствах и возможности применения для изоляции зон с катастрофическими поглощениями.
 5. В результате исследований по химической деструкции установлено, что блокирующая композиция БС полностью разрушается в 15%-м растворе соляной кислоты в течение 2 ч. Для разрушения НГ в 15%-й раствор соляной кислоты дополнительно дозировался деэмульгатор OSC DM-1 с концентрацией 1 % мас. Данный состав разрушился частично, и максимальная деструкция составила 75 % после 4 ч воздействия. Степень разрушения ВК после 6 ч воздействия составила 81 %.
 6. Таким образом, новые блокирующие композиции БС, НГ и ВК могут повысить эффективность глушения скважин Волго-Уральской нефтегазональной провинции в условиях аномально низких пластовых давлений, трещинного коллектора и высокого газового фактора.

3. Van T.N., Aleksandrov A.N., Rogachev M.K. An extensive solution to prevent wax deposition formation in gas-lift wells // Journal of Applied Engineering Science. – 2022. – V. 20. – № 1. – P. 264–275.
4. Аманов М.А., Ишангулыев Г.А. Применение облепченных технологических жидкостей для глушения и капитального ремонта скважин в условиях аномально низких пластовых давлений (АНПД) // Молодой ученый. – 2016. – № 10. – С. 117–123.
5. Bondarenko A.V., Islamov S.R., Mardashov D.V. Features of oil well killing in abnormal carbonate reservoirs operating conditions. // Proc. of the 15th Conference and Exhibition Engineering and Mining Geophysics; European Association of Geoscientists and Engineers. – Gelendzhik, Russia, 2019. – P. 629–633.
6. Research risk factors in monitoring well drilling – a case study using machine learning methods / S. Islamov, A. Grigoriev, I. Belo-

- glazov, S. Savchenkov, O.T. Gudmestad // Symmetry. – 2021. – № 13 (7). – 1293. – 19 p.
7. Dvoynikov M.V., Budovskaya M.E. Development of a hydrocarbon completion system for wells with low bottomhole temperatures for conditions of oil and gas fields in Eastern Siberia // Journal of Mining Institute. – 2022. – № 253 (1). – С. 12–22.
 8. Research of formation protection technology in complex fault block oilfield / S. Fan, X. Wang, J. Dong, Q. You, X. Yang // International Petroleum Technology Conference. – OnePetro. – Beijing, China, 2019. – 8 p.
 9. Preparations for foam gas shut off in carbonate reservoirs / A. Skauge, M. Aarra, P. Ormehaug, J. Solbakken, K. Mogenssen, S. Masalmeh // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference. – OnePetro. – Abu Dhabi, UAE, 2019. – 13 p.
 10. Демахин С.А., Меркулов А.П., Касьянов Д.Н. Щадящее глушение скважин как основа сохранения коллекторских свойств пласта // Нефтегазовая вертикаль. – 2016. – № 6. – С. 94–96.
 11. Бондаренко В.П., Надиров К.С., Голубев В.Г. Исследования свойств водонефтяных обратных эмульсий, применяемых для глушения скважин // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 01. – С. 58–60.
 12. Mardashov D., Duryagin V., Islamov S. Technology for improving the efficiency of fractured reservoir development using gel-forming compositions // Energies. – 2021. – V. 14. – № 24. – 8254. – 14 p.
 13. Exploring of the incompatibility of marine residual fuel: a case study using machine learning methods / R. Sultanbekov, I. Beloglazov, S. Islamov, M.C. Ong // Energies. – 2021. – № 14. – 8422. – 16 p.
 14. Jia H., Yang X.Y., Zhao J.Z. Development of a novel in-situ-generated foamed gel as temporary plugging agent used for well workover: affecting factors and working performance // SPE Journal. – 2019. – V. 24. – № 04. – P. 1757–1776.
 15. A novel foamy well killing fluid for low-pressure gas reservoirs in Tarim Basin, China / L. Pan, H. Liu, W. Long, J. Li, Q. Liu // International Petroleum Technology Conference. – OnePetro. – Virtual, March 2021. – 12 p.
 16. An integrated solution to repair multiple shallow leaks in production tubing – a unique single trip well intervention technique / S. Al Zayani, M. Munir, N. Hooper, K. Thian, M. Johan, M. Hussein, R. Wibisono, A. Arifin, M. Kadir, S. Shahril, C. Ogueri // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference. – OnePetro. – Abu Dhabi, UAE, 2019. – 15 p.
 17. Aramendiz J., Imqam A., Fakher S. Design and evaluation of a water-based drilling fluid formulation using SiO and graphene oxide nanoparticles for unconventional shales // International petroleum technology conference. – OnePetro. – Beijing, China, 2019. – 17 p.
 18. Study of gel plug for temporary blocking and well-killing technology in low-pressure, leakage-prone gas well / X. Ying, X. Yuan, Z. Yadong, F. Ziyi // SPE Production & Operations. – 2021. – V. 36. – № 01. – P. 234–244.
 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. DOI: 10.31897/PMI.2022.16
 20. Раупов И.Р., Кондрашева Н.К., Раупов Р.Р. Разработка полимерных составов для внутрипластовой водоизоляции теригенных коллекторов нефтяных месторождений // Нефтегазовое дело. – 2016. – Т. 14. – № 1. – С. 80–87.

Поступила 15.06.2022 г.

Информация об авторах

Мардашов Д.В., кандидат технических наук, заведующий кафедрой разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Санкт-Петербургского горного университета.

Лиманов М.Н., аспирант кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Санкт-Петербургского горного университета.

UDC 622.276.76

IMPROVING THE EFFICIENCY OF OIL WELL KILLING AT THE FIELDS OF THE VOLGA-URAL OIL AND GAS PROVINCE WITH ABNORMALLY LOW RESERVOIR PRESSURE

Dmitriy V. Mardashov¹,
Mardashov_DV@pers.spmi.ru

Maxim N. Limanov¹,
LimanovMaxim@yandex.ru

¹ St. Petersburg Mining University,
2, 21 line, Vasilievsky Island, St. Petersburg, 199106, Russia.

The relevance of the research is caused by the insufficient technological efficiency of the killing compositions used in the fields of the Volga-Ural oil and gas province for underground workover of wells. The solutions' viscosity at the bottom of the well is not sufficient and passes the killing fluid filtrate through reservoir, which leads to the absorption of the process fluid and clogging of the bottomhole formation zone. Insufficient values of critical shear stress also affect the efficiency of killing operations. Low values of shear stress indicate excessive mobility of the process fluid in the wellbore.

The main aim of the research is to compare the properties of the developed polymer killing composition with the properties of the already used composition with a similar mode of action, as well as compare the properties of the developed oil gel with the properties of invert emulsion solution used in the fields. Another aim is making a conclusion about the data obtained for new compositions in comparison with the old ones.

Objects: well killing fluids used in the fields of the Volga-Ural oil and gas province, as well as developed polymer compositions and hydrocarbon-based fluids.

Methods: imitation of reservoir processes, placement of existing killing compounds in installations that create reservoir conditions and further measurement of their properties; carrying out similar operations with new compositions to check the convergence of the results; analysis of the data obtained, comparison of the properties of various compositions with each other.

Results. The authors have obtained the comparative characteristics of the main properties of blocking compositions, such as: corrosion rate, effective viscosity, complex viscosity, static shear stress, ultimate shear stress, and degradation time. The results obtained allow us to recommend the developed compositions for use in the fields of the Volga-Ural oil and gas province.

Key words:

Well killing, abnormally low reservoir pressure, blocking compound, oil gel, water-swallowable bridging agent, Volga-Ural oil and gas province.

REFERENCES

- Legkokonets V.A., Islamov S.R., Mardashov D.V. Multifactor analysis of well killing operations on oil and gas condensate field with a fractured reservoir. *Proceedings of the International Forum-Contest of Young Researchers: Topical Issues of Rational Use of Mineral Resources*; Taylor & Francis. London, CRC Press/Taylor & Francis Group, 2019. pp. 111–118.
- Yudhowijoyo A., Rafati R., Haddad A., Pokrajac D., Manzari M. Developing nanocomposite gels from biopolymers for leakage control in oil and gas wells. *SPE Offshore Europe Conference and Exhibition*. OnePetro, Aberdeen, UK, September, 2019. 12 p.
- Van T.N., Aleksandrov A.N., Rogachev M.K. An extensive solution to prevent wax deposition formation in gas-lift wells. *Journal of Applied Engineering Science*, 2022, vol. 20, no. 1, pp. 264–275.
- Amanov M.A., Ishanguliev G.A. Application of lightweight process fluids for killing and workover of wells in conditions abnormally low reservoir pressure. *Young Scientist*, 2016, no. 10 (114), pp. 117–123. In Rus.
- Bondarenko A.V., Islamov S.R., Mardashov D.V. Features of oil well killing in abnormal carbonate reservoirs operating conditions. *Proc. of the 15th Conference and Exhibition Engineering and Mining Geophysics*; European Association of Geoscientists and Engineers, Gelendzhik, Russia, 2019. pp. 629–633.
- Islamov S., Grigoriev A., Beloglazov I., Savchenkov S., Gudmestad O.T. Research risk factors in monitoring well drilling – A case study using machine learning methods. *Symmetry*, 2021, no. 13, 1293, 19 p.
- Dvoynikov M.V., Budovskaya M.E. Development of a hydrocarbon completion system for wells with low bottomhole temperatures for conditions of oil and gas fields in Eastern Siberia. *Journal of Mining Institute*, 2022, no. 253 (1), pp. 12–22.
- Fan S., Wang X., Dong J., You Q., Yang X. Research of formation protection technology in complex fault block oilfield. *International Petroleum Technology Conference*, OnePetro, Beijing, China, 2019. 8 p.
- Skauge A., Aarra M., Ormehaug P., Solbakken J., Mogensen K., Masalmeh S. Preparations for foam gas shut off in carbonate reservoirs. *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*. OnePetro, Abu Dhabi, UAE, 2019. 13 p.
- Demakhin S.A., Merkulov A.P., Kasyanov D.N. Gentle killing of wells as the basis for maintaining the reservoir properties. *Oil and Gas Vertical*, 2016, no. 6, pp. 94–96. In Rus.
- Bondarenko V.P., Nadirov K.S., Golubev V.G., Kolesnikov A.S., Sadyrbaeva A.S. Study of a reagent-emulsifier for the preparation of reverse water-oil emulsions used for well-killing. *Oil industry*, 2017, no. 01, pp. 58–60. In Rus.
- Mardashov D., Duryagin V., Islamov S. Technology for improving the efficiency of fractured reservoir development using gel-forming compositions. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 24, 8254, 14 p.
- Sultanbekov R., Beloglazov I., Islamov S., Ong M.C. Exploring of the incompatibility of marine residual fuel: a case study using machine learning methods. *Energies*, 2021, no. 14, 8422, 14 p.
- Jia H., Yang X.Y., Zhao J.Z. Development of a novel in-situ-generated foamed gel as temporary plugging agent used for well workover: affecting factors and working performance. *SPE Journal*, 2019, vol. 24, no. 04, pp. 1757–1776.
- Pan L., Liu H., Long W., Li J., Liu Q. A novel foamy well killing fluid for low-pressure gas reservoirs in Tarim Basin. *China International Petroleum Technology Conference*. OnePetro, Virtual, March 2021. 12 p.
- Al Zayani S., Munir M., Hooper N., Thian K., Johan M., Hussein M., Wibisono R., Arifin A., Kadir M., Shahril S., Ogueri C. An integrated solution to repair multiple shallow leaks in production tubing – a unique single trip well intervention technique. *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*, OnePetro, Abu Dhabi, UAE, 2019. 15 p.
- Aramendiz J., Imqam A., Fakher S. Design and evaluation of a water-based drilling fluid formulation using SiO and graphene oxide nanoparticles for unconventional shales. *International petroleum technology conference*. OnePetro, Beijing, China, 2019. 17 p.

18. Ying X., Yuan X., Yadong Z., Ziyi F. Study of gel plug for temporary blocking and well-killing technology in low-pressure, leakage-prone gas well. *SPE Production & Operations*, 2021, vol. 36, pp. 234–244.
19. Mardashov D.V., Bondarenko A.V., Raupov I.R. Design procedure of technological parameters of non-Newtonian fluids injection into an oil well during workover operation. *Journal of Mining Institute*. 2022. DOI: 10.31897/PMI.2022.16
20. Raupov I.R., Konnrasheva N.K., Raupov R.R. Development polymeric compositions for in-situ water shutoff of terrigenous deposits of oil field development. *Oil and gas business*, 2016, vol. 14, no. 1, pp. 80–87.

Received: 15 June 2022.

Information about the authors

Dmitriy V. Mardashov, Cand. Sc., head of the department, St. Petersburg Mining University.

Maxim N. Limanov, postgraduate student, St. Petersburg Mining University.

УДК 556.314:556.535.8

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ РОДНИКОВ КАК ИНДИКАТОР ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННОЙ ЭВОЛЮЦИИ ГОРОДСКОЙ ЭКОСИСТЕМЫ (НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА ТОМСКА, ЮГО-ВОСТОК ЗАПАДНОЙ СИБИРИ)

Пасечник Елена Юрьевна¹,
paseyu@yandex.ru

Льготин Виктор Александрович²,
mail@sfo.geomonitoring.ru

Савичев Олег Геннадьевич¹,
OSavichev@mail.ru

Чилингер Лилия Наримановна¹,
lilichilinger@gmail.com

Хващевская Альбина Анатольевна¹,
hvashevskaya@tpu.ru

Чжоу Даны¹,
929177582@qq.com

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

² филиал «Сибирский региональный центр Государственного мониторинга состояния недр», «Гидроспецгеология»,
Россия, 634061, г. Томск, ул. Никитина, 99.

Актуальность исследования определяется необходимостью комплексного использования родников в городской среде и целесообразностью их использования как индикатора изменений ее природно-техногенных изменений. Такие исследования актуальны для территории г. Томска в условиях ограниченности имеющихся наблюдательных и эксплуатационных скважин, но большого количества родников в разных частях города, отражающих состояние зон питания и транзита подземных вод, формирующихся в различных условиях антропогенной нагрузки.

Цель исследования заключается в выявлении природно-антропогенных изменений химического состава родниковых вод как индикатора соответствующих изменений городской среды.

Объекты: родники на территории г. Томска (Западная Сибирь).

Методы: современные методы определения химического состава подземных вод, статистические методы.

Результаты. Выполнен анализ эколого-геохимического состояния родниковых вод на территории г. Томска (Западная Сибирь) в 2020–2021 гг. Показано, что самые высокие содержания растворенных солей обнаружены в родниковых водах на участке ниже по течению от устья р. Ушайки и в ее долине в результате антропогенных факторов и разгрузки подземных вод с минерализацией более 1 г/дм³, в том числе, с большой вероятностью, из меловых отложений Обь-Томского междуречья. На основе анализа выявлено, что к оказывающим влияние антропогенным факторам эволюции водных экосистем относятся не только загрязнение поверхности на промышленных площадях или инфильтрация поверхностного стока, включая продукты растворения и трансформации песко-соляной смеси для улучшения условий эксплуатации городских дорог, но и изменение интенсивности и структуры подземного водообмена вследствие строительства и эксплуатации свайных фундаментов, систем водоотведения и водоснабжения. Сделаны выводы о необходимости создания и анализа математической модели формирования подземного стока в г. Томске и на прилегающих территориях для проектирования и повышения эффективности существующих систем ливневой канализации, канализации хозяйственно-бытовых стоков, водо- и теплоснабжения, а также нецелесообразности использования родников г. Томска в качестве альтернативных источников водоснабжения вследствие особенностей химического состава их вод и факторов их формирования.

Ключевые слова:

Химический состав, родники, город Томск, Западная Сибирь, природно-антропогенные изменения городской среды.

Введение

Согласно [1], родники относятся к поверхностным водным объектам, но, по сути, они являются своеобразными природными сооружениями выхода на поверхность подземных вод в области их разгрузки [2–9]. Поэтому их можно рассматривать как индикаторы различных процессов, протекающих в пределах экосистем различного порядка, а если эти экосистемы пространственно совпадают с городами, то и в городской среде.

При этом нельзя не отметить и важный ландшафтно-архитектурный аспект функционирования родников в городах – создание либо положительного, либо негативного фона при оценке городской среды. Все это определяет актуальность изучения городских родников в целом, в том числе, и в г. Томске – крупном научно-промышленном центре Сибири. Летопись г. Томска, именно как города, ведет исчисление с 1604 г., но фактическая история поселения в границах современного

Томска гораздо древнее [10], что в какой-то мере отразилось в топонимике города и пригородной территории (Тахтамышево, Эушта, Киргизка и т. д.).

На протяжении всей истории поселения население (во всем его этническом разнообразии) весьма активно использовало родники. Однако определенные изменения химического состава родниковых вод наблюдаются из информации в первых опубликованных сведениях, например, в публикациях Томского императорского университета [11]. В XX в. и начале XXI в. исследованиями родников г. Томска и прилегающих территорий активно занимались сотрудники кафедры гидрогеологии и инженерной геологии (впоследствии кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии) Томского политехнического института – ТПИ (впоследствии ТПУ). Прежде всего, это доцент, к.г.-м.н. А.Д. Назаров, приложивший максимум усилий не только к изучению, но и к обустройству родников г. Томска [12]. Значительный вклад в научные исследования родниковых и в целом подземных вод Томска также внесли Ю.Г. Копылова, Н.Г. Наливайко, К.И. Кузеванов, Н.А. Ермашова, Д.С. Покровский, Е.Ю. Пасечник, А.А. Хвашевская, Е.М. Дутова, Н.М. Шварцева, Е.Г. Вертман, О.Е. Лепкурова и целый ряд других сотрудников, аспирантов и студентов ТПУ, а также Томского государственного (ТГУ) и архитектурно-строительного (ТГАСУ) университетов [13–19]. Исключительно важное значение в изучении химического состава и качества подземных вод района исследований имеют работы в составе государственного мониторинга геологической среды на территории Сибирского федерального округа, осуществляемого сотрудниками Сибирского регионального центра (СРЦ) ФГБУ «Гидроспецгеология», ранее – АО «Томскгеомониторинг», а еще ранее – Томской геолого-разведочной экспедиции (В.А. Лыготин, Ю.В. Макушин, Г.Л. Плевако, В.П. Шинкаренко, А.А. Балобаненко и многие другие) [20].

Благодаря такому вниманию получена общая картина изменения химического и микробиологического состава воды родников на территории Томска и пригорода, причем во многих случаях отмечена связь между повышенными значениями гидрогеохимических и микробиологических показателей и антропогенными факторами [15, 16, 18, 20]. Однако остается не совсем понятным характер пространственно-временных изменений по территории минерализации и химического состава родниковых вод, их сопряженности с потенциальными источниками загрязнения. Например, в районе ул. Дальне-Ключевской (северная часть г. Томска, пер. Тихий (точка 4а, рис. 1) и Островского (6а), ул. Чехова (5а) на относительно небольшой территории отмечаются заметные различия минерализации родниковых вод (более 300 мг/дм³), а значения сухого остатка более 1 г/дм³, по данным проф. Лемана [11], в пределах современных Октябрьского и Кировского районов г. Томска были отмечены еще в 1889 г.

С учетом этого авторами в 2021 г. предпринята попытка рассмотреть химический состав родниковых вод как индикатора не только антропогенных, но и природных процессов, а точнее – природно-антропогенных,

поскольку в настоящее время различия между ними в условиях крупного города минимальны.

Исходная информация и методика исследования

В соответствии с указанной выше целью были поставлены две основные задачи – выявление закономерностей и факторов пространственного изменения химического состава подземных вод территории г. Томска. Для их решения были собраны материалы о химическом составе подземных вод на территории г. Томска и прилегающих территорий [15, 16, 18–24], в 2020–2021 гг. отобраны пробы родниковых вод в пунктах, приведенных на рис. 1 (отбор проб выполняли Е.Ю. Пасечник, Л.Н. Чилингер), в аккредитованной гидрогеохимической лаборатории ТПУ проведено определение химического состава: рН – потенциометрический метод; перманганатная (РО) и бихроматная (ВО) окисляемость; содержания Ca²⁺, Mg²⁺, HCO₃⁻, Cl⁻, CO₂ – титриметрический; SO₄²⁻ – турбидиметрический; NH₄⁺, NO₂⁻, NO₃⁻, Fe^{общ}, Si – фотометрический, ионная хроматография; Na⁺, K⁺ – пламенно-эмиссионный, ионная хроматография; нефтепродукты (НП) – флуориметрический. При отборе проб были учтены требования [6, 9, 25, 26]. Полученные данные сопоставлялись с дебитами (расходами) воды родников, измеренными объемным способом, проводился их статистический анализ и термодинамические расчеты.

Статистический анализ включал расчет статистических параметров и погрешностей их определения, включая погрешности определения среднего арифметического (1) и коэффициентов корреляции (2), а также выявление регрессионных зависимостей. Корреляционные связи считались значимыми (с уровнем значимости 5 %) при выполнении условия (3), а регрессионные зависимости – при одновременном выполнении условий (4) и $R^2 > 0,36$ (R – корреляционное отношение, связанное с критерием Росгидромета: $R^2 = 1 - \left(\frac{SS}{\sigma}\right)^2$, где SS – среднее квадратическое отклонение вычисленных значений от измеренных; σ – среднее квадратическое отклонение):

$$\delta_A \approx \frac{\sigma}{\sqrt{N}}, \quad (1)$$

$$\delta_r \approx \frac{1-r^2}{\sqrt{N-1}}, \quad (2)$$

$$|r| \geq 2 \cdot \delta_r, \quad (3)$$

$$|k_{r,j}| \geq 2 \cdot \delta_{k,j}, \quad (4)$$

где δ_A , δ_r и $\delta_{k,j}$ – погрешности определения среднего арифметического A , коэффициента корреляции r и коэффициента регрессии $k_{r,j}$; N – объем выборки; σ – среднее квадратическое отклонение.

Термодинамические расчеты заключались в расчете индексов насыщения SI родниковых вод относительно ряда минералов (5) методом констант с использованием уравнения Дэвиса для определения коэффициентов активности частиц согласно [28]:

$$SI = \lg \text{ПА} - \lg K_{neq}, \quad (5)$$

где ПА – произведение активностей группы веществ; K_{neq} – константа неустойчивости.

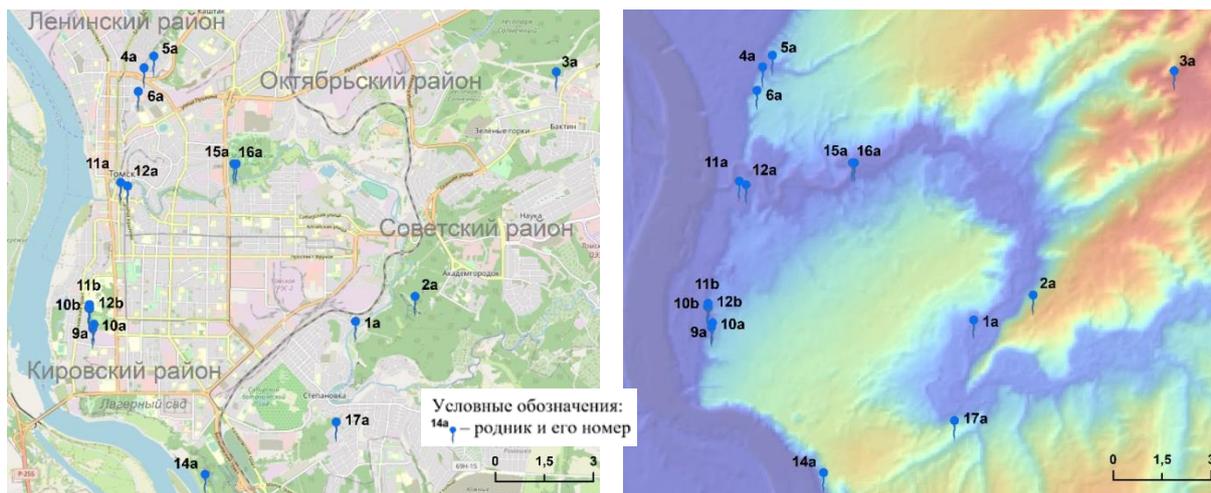


Рис. 1. Схема размещения пунктов отбора проб родников г. Томска (номера пунктов приведены в табл. 1); использован градостроительный атлас города Томска [27]

Fig. 1. Layout of sampling points of springs in Tomsk (numbers of points are given in Table 1); urban atlas of the city of Tomsk is used [27]

Результаты исследования и их обсуждение

Рассматриваемая территория расположена на границе гидрогеологических структур I порядка – Западно-Сибирского артезианского бассейна (ЗСАБ) и Алтае-Саянской гидрогеологической складчатой области (АСГСО), причем в общих чертах эта граница соответствует долине р. Томи. Гидрогеологические условия в пределах обеих структур характеризуются наличием двух гидрогеологических этажей. В границах г. Томска верхний этаж в обоих случаях представляет собой толщу отложений четвертичного, неогенового, палеогенового и мелового возраста, к которым приурочены безнапорные и напорные подземные воды. На левом берегу р. Томи (со стороны ЗСАБ) в основании этой толщи расположен региональный водоупор верхнемелового-палеогенового возраста, на правом – палеозойские образования.

Рассмотренные авторами родники на территории г. Томска расположены на правом берегу р. Томи. Родники 1а, 2а, 11а, 12а, 15а, 16а, 17а приурочены к долине р. Ушайки, родник 3а – к долине притока р. Ушайки, что позволяет их сгруппировать в комплекс № 1 (табл. 1). Прочие родники – в долине р. Томи, в том числе: 14а – на участке от р. Басандайки до территории Лагерного сада, к которому приурочен выход палеозойских (карбоновых) образований на поверхность в русле и пойме р. Томи (мыс «Боец»), выше по течению от противоположных сооружений (комплекс № 2); 9а, 10а, 11а, 10б, 11б, 12б – на участке от Лагерного сада до устья р. Ушайки, вблизи озера Университетского (комплекс № 3); 4а, 5а, 6а – на участке от устья р. Ушайки до устья р. Киргизки (комплекс № 4). На двух последних участках (комплексы №№ 3, 4) ряд водоемов и водотоков были на протяжении XX в. засыпаны грунтом (например, водоток в районе Томского государственного университета или водотоки и водоемы в районе родников 4а, 5а, 6а).

По минерализации и химическому составу (согласно [29]) воды комплекса родников № 1 по состо-

янию на 2020–2021 гг. солоноватые и пресные с повышенной минерализацией, гидрокарбонатные кальциевые первого, второго и третьего типов, по рН (согласно [30]) – нейтральные; воды комплекса № 2 без явного загрязнения – пресные с повышенной минерализацией, гидрокарбонатные кальциевые I типа, нейтральные; воды комплекса № 3 – солоноватые и пресные с повышенной минерализацией, гидрокарбонатные кальциевые II и III типов, нейтральные и слабощелочные; воды комплекса № 4 – солоноватые, гидрокарбонатные кальциевые III типа, нейтральные. Все изученные родниковые воды способны растворять альбит и анортит, но близки к равновесию или пересыщены относительно кварца, кальцита, доломита и ряда глинистых минералов (рис. 2).

В сравнении с подземными водами прилегающих территорий изученные родники в составе комплекса № 4 ближе всего по составу к водам верхнемеловых отложений Обь-Томского междуречья (с учетом значений общей минерализации более 1,0–1,5 г/дм³ [20, 21, 23]). В прочих случаях имеет место смешение верховодки, грунтовых вод четвертичных отложений, подземных вод в отложениях палеогена и зоны трещиноватости в палеозойских образованиях (табл. 1, 2). Загрязнение подземных вод, с учетом данных [20, 21], проявляется в повышении значений перманганатной и бихроматной окисляемости, суммы главных ионов и концентраций SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , фосфатов (табл. 1). По сочетанию этих признаков (например, концентраций $\text{NO}_3^- > 40$ мг/дм³, $\text{BO} > 5$ мгО/дм³, $\text{SO}_4^{2-} > 60$ мг/дм³ и др.) к явно загрязненным можно отнести родники комплекса № 4 в северной части г. Томска (4а, 5а, 6а) и часть родников комплекса № 1 в долине р. Ушайки (11а, 12а, 1а).

Согласно [19, 20, 24, 31] и с учетом указанных выше особенностей химического состава вод г. Томска и прилегающих территорий, все изученные родники могут соответствовать зонам разгрузки техногенной верховодки, безнапорных и слабонапорных грунтовых вод из отложений неоген-четвертичного

возраста, напорных вод палеогеновых отложений и подземных вод зоны трещиноватости. Кроме того, судя по опубликованным геологическим и гидрогеологическим разрезам [14, 31], в районе размещения комплекса родников № 4, где наблюдается заметное расширение правобережной части поймы р. Томи, предположительно, возможна разгрузка напорных вод из палеогеновых и верхнемеловых отложений с областью питания, в том числе, на левом берегу р. Томи. Области питания подземных вод в родниках комплексов № 1–3 находятся на правом берегу р. Томи, причем их границы с определенной вероятностью выходят за пределы административных границ г. Томска.

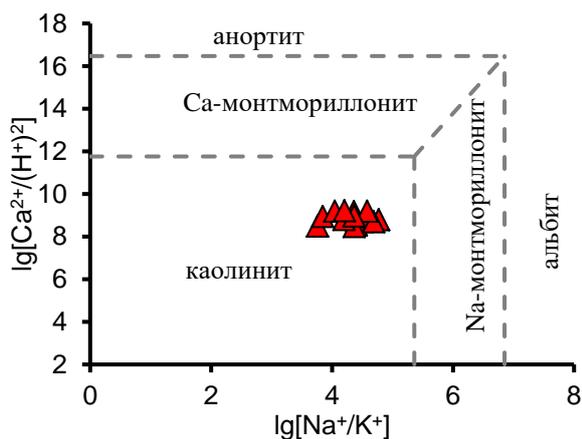


Рис. 2. Система $HCl-H_2O-Al_2O_3-CO_2-CaO-SiO_2-Na_2O$ при $25\text{ }^\circ\text{C}$, $lg[H_4SiO_4] = -3,5$ и $P_{CO_2}=101,5\text{ Па}$ с нанесением данных по составу вод (табл. 1)

Fig. 2. System $HCl-H_2O-Al_2O_3-CO_2-CaO-SiO_2-Na_2O$ at $25\text{ }^\circ\text{C}$, $lg[H_4SiO_4] = -3,5$ and $P_{CO_2}=101,5\text{ Pa}$ with drawing data of waters (Table 1)

Особо следует отметить комплекс на участке от устья р. Басандайки до территории Лагерного сада, где общий расход источников и дренажных сооружений противооползневого комплекса, по данным АО «Томскгеомониторинг», в 2004 г. составлял в среднем за апрель–октябрь 9,2 л/с при максимальном среднемесячном расходе 11,7 л/с в мае. Если предположить, что в марте расход воды исчезающе мал (приравнен к нулю), то средний годовой расход может быть оценен в размере 6,4 л/с. По данным [32], среднепогодное значение подземной составляющей водного стока р. Басандайки составляет 0,6 м³/с, или 1,49 л/(с·км²). Если предположить (с учетом высотных отметок и ливневой канализации), что водосбор дренажных сооружений в районе Лагерного сада ограничен ул. Нахимова и площадью Южной, то тогда его площадь составляет примерно 1,2 км². Но при модуле подземного стока 1,49 л/(с·км²) это соответствует расходу 1,8 л/с, а не 6,4 л/с. Если использовать данные по р. Ушайке (модуль подземного стока 0,95 л/(с·км²) [32]), то разница будет еще больше – 5,2 л/с.

Следовательно, либо на данной территории (в Кировском районе г. Томска) расположен дополнительный источник питания подземных вод (около 400 м³/сут), либо фактическая площадь области питания составляет более 4 км², а ее границы достигают поселка Зональная

станция, расположенного на юго-востоке от представленной на рис. 1 территории, либо имеют место оба варианта (дополнительное водное питание менее 400 м³/сут при площади более 1,2 км²). Поскольку измеренный общий сток в Лагерном Саду (от 11,7 л/с в июле до 5,9 л/с в октябре) имеет ярко выраженное сезонное изменение, связанное, скорее, не с утечками из водоводов, а с таянием сезонных снегов, и вряд ли существует переток из Томи (с учетом геологического строения и рельефа), то более вероятной представляется гипотеза о подземном водосборе (сочетании области питания и распространения), вытянутом вдоль р. Томи до пос. Зональная станция, возможно, до пос. Предтеченск. Хотя, безусловно, нельзя исключать и влияние потерь при водоснабжении и водоотведении [33].

Безусловно, оптимальным способом достижения поставленной выше цели и сопряженных с ней задач было бы составление и анализ гидрогеологической модели г. Томска. К сожалению, имеющаяся гидрогеологическая информация, ввиду сложного геологического строения городской территории и специфики ее застройки, сопровождавшейся перестраиванием гидрографической сети, пока не позволяет построить такую модель в целом и достоверно количественно оценить границы областей питания подземных вод в частности. С учетом этого авторами (принимая во внимание требования [34]) предпринята попытка определить площади хотя бы поверхностных водосборов родников (табл. 1) и сопоставить их с наблюдаемыми значениями гидрогеохимических показателей.

Полученные при этом результаты анализа многолетних данных по составу вод в целом позволяют говорить о статистически значимом увеличении суммарного содержания растворенных солей, бихроматной окисляемости и нитратов в родниковых водах при росте площади поверхностного водосбора А (табл. 3). С большой вероятностью, в условиях северо-западной части АСГСО это указывает на увеличение дренированности территории при увеличении величины А в случае суммы главных ионов, концентраций Ca^{2+} , Mg^{2+} , а в случае Na^+ , SO_4^{2-} , Cl^- , BO^- – предположительно, на вынос с городской территории песко-соляной смеси, органических остатков и продуктов их трансформации после дождей и в период снеготаяния.

Менее очевидна связь гидрогеохимических показателей с дебитами родников, хотя, согласно [22, 29, 35, 36], обычно наблюдается обратная связь вследствие увеличения времени взаимодействия горных пород с водой и, как следствие, роста минерализации вод при снижении интенсивности водообмена. Тем не менее отмеченный выше факт имеет вполне понятные объяснения, приведенные в [37], в соответствии с которыми изменение концентрации C в зависимости от расхода воды Q описывается следующим образом в формулах (6), (7):

$$\frac{dC}{dQ} = k_Q \cdot \frac{C}{Q}, \quad (6)$$

$$k_Q = k_0 + k_1 \cdot \left(\frac{Q}{Q_0}\right)^{k_2}, \quad (7)$$

$$Y = X^{k_0} \cdot \exp\left(\frac{k_1}{k_2} \cdot (X^{k_2} - 1)\right), \quad (8)$$

где k_Q , k_0 , k_1 , k_2 – эмпирические коэффициенты; центрации и расхода воды; C_0 и Q_0 – математическое
 $Y=C/C_0$ и $X=Q/Q_0$ – модульные коэффициенты кон- ожидание концентрации вещества и расхода воды.

Таблица 1. Площади поверхностных водосборов (A), дебиты родников (q), рН и химический состав родниковых вод в г. Томске 01.10.2020 г. (10b, 11b, 12b) и 23.06.2021 г. (1a, 2a, 3a, 4a, 5a, 6a, 11a, 12a, 9a, 10a, 14a, 15a, 16a, 17a)

Table 1. Surface catchment areas (A), flow rates of springs (q), pH and chemical composition of spring waters in Tomsk 01.10. 2020 (10b, 11b, 12b) and 23.06.2021 (1a, 2a, 3a, 4a, 5a, 6a, 11a, 12a, 9a, 10a, 14a, 15a, 16a, 17a)

Комплекс/Complex	Номер (рис. 1) Number (Fig. 1)	Наименование родника, привязка Spring name, binding	A , км ² /km ²	q , л/с/l/s	рН, ед. pH/un.	CO ₂	S(mi)	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	Фосфаты Phosphates	Si	Fe	НП	ПО	БО	Классификация* Classification*
						мг/дм ³ mg/dm ³										мгО/дм ³ mgO/dm ³	
1	1a	Без названия, ул. Михаила Сычева, 40 Untitled, st. Mikhail Sychev, 40	0,90	0,39	7,36	15,8	887,4	81,0	29,0	37,00	0,03	8,13	0,015	0,007	0,84	8,43	C-Ca-III
1	2a	Родник Ближний, Академгородок Spring Blizhny, Akademgorodok	0,10	0,05	7,20	7,0	350,7	14,0	1,7	0,84	0,03	6,40	0,058	0,003	0,54	1,73	C-Ca-I
1	3a	Без названия, ул. Ивановского Untitled, st. Ivanovsky	0,50	0,14	7,27	10,6	594,3	7,2	43,0	39,20	0,23	7,84	0,010	0,004	0,72	3,01	C-Ca-III
1	17a	Родник «Весенний» Spring «Vesenny»	0,17	нд	7,43	8,8	630,3	5,1	5,3	0,20	0,12	7,55	0,045	0,002	0,94	2,99	C-Ca-II
1	15a	Родник Ключевской, Михайловская роща 1 Spring «Klyuchevskoy», Mikhailovskaya Roscha 1	0,52	0,06	7,12	31,7	981,3	56,0	74,7	40,90	0,06	10,16	1,810	0,004	0,88	2,10	C-Ca-II
1	16a	Родник Ключевской, Михайловская роща 2 Spring «Klyuchevskoy», Mikhailovskaya Roscha 2	0,52	0,09	7,22	17,6	922,1	67,0	53,0	56,00	0,03	9,88	0,040	0,004	0,72	2,39	C-Ca-III C
1	11a	Родник «Магистратский» Spring «Magistratsky»	0,87	0,11	7,12	35,0	1250,4	68,0	121,0	132,00	0,20	10,30	0,130	0,008	2,36	8,33	C-Ca-III
1	12a	Родник «Святой ключ» Spring «Svyatoy klyuch»	0,87	0,15	7,09	31,7	1205,2	91,0	73,0	167,00	0,05	9,02	0,021	0,003	1,68	5,38	C-Ca-III
2	14a	Родник «Людмила ключ», Буревестник Spring «Lyudmila Klyuch», Burevestnik	0,10	нд	7,47	7,0	501,1	5,1	21,8	27,30	0,26	8,43	0,330	0,003	0,38	1,45	C-Ca-I
3	9a	Родник «Университетский» Spring «Universitetsky»	0,15	0,72	7,06	14,0	750,0	62,0	35,0	39,00	0,33	10,10	0,120	0,022	1,14	1,52	C-Ca-II
3	10a	Родник «Ренкуль», Ботанический Spring «Renkul», Botanical	0,14	нд	7,38	17,6	796,2	68,0	40,0	25,50	0,50	9,87	0,260	0,004	0,82	1,68	C-Ca-II
3	10b	Родник «Флоринский» Spring «Florinsky»	0,12	нд	8,10	1,5	743,9	59,0	45,0	5,20	нд	нд	0,550	нд	3,28	нд	C-Ca-III
3	11b	Родник «Святой Анны» Spring «St. Anna»	0,20	нд	7,95	5,3	764,3	56,0	60,0	9,30	нд	нд	0,170	нд	1,42	нд	C-Ca-III
3	12b	Родник «Дионисия» Spring «Dionisiya»	0,07	нд	7,50	40,1	674,0	53,0	23,0	22,80	нд	нд	0,210	нд	1,88	нд	C-Ca-III
4	4a	Родник «Дальний ключ», пер. Тихий Spring «Dalny Klyuch», Lane Tikhiy	2,00	1,15	7,04	19,4	1533,7	130,0	95,0	59,50	0,09	9,38	0,035	0,005	1,92	12,40	C-Ca-III
4	5a	Без названия, пер. Чехова Untitled, Chekhov Lane	0,40	1,18	7,09	22,9	1192,3	77,0	179,0	82,00	0,07	11,06	0,068	0,004	0,82	1,04	C-Ca-III
4	6a	Божья роса, пер. Островского God's dew, Ostrovsky lane	0,20	0,28	7,02	22,9	1066,1	69,0	60,0	94,60	0,13	10,10	0,081	0,003	1,18	7,85	C-Ca-III

Примечание: S(mi) – сумма главных ионов (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, CO₃²⁻, SO₄²⁻, Cl⁻); ПО и БО – перманганатная и бихроматная окисляемость; НП – нефтепродукты; «нд» – отсутствие данных; * классификация по О.А. Алекину [29].
 Note: S(mi) – sum of the main ions (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, CO₃²⁻, SO₄²⁻, Cl⁻); PO and BO – permanganate and bi-chromate oxidizability; NP – petroleum products; «nd» – no data; * classification by O.A. Alekin [29].

Таблица 2. Средние арифметические значения (*A*) концентраций главных ионов, *Fe* и погрешности их определения (δ_A) в подземных водах АСГСО и прилегающих районов ЗСАБ, мг/дм³

Table 2. Arithmetic mean values (*A*) of the concentrations of the main ions, *Fe* and the errors of their determination (*A*) in the groundwater of the Altai-Sayan hydrogeological fold region and adjacent regions of the West Siberian artesian basin, mg / dm³

Возраст Age	Показатель Indicator	S(mi)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Fe
Бассейн Верхней Оби/Upper Ob basin [24]									
Q	A δ_A	371,3 37,7	59,1 6,7	19,4 4,9	22,3 5,0	247,4 23,0	13,7 3,5	20,9 7,0	1,666 0,384
P	A δ_A	555,4 46,4	79,4 9,6	20,8 2,9	32,8 11,0	365,9 25,1	19,5 5,2	38,3 16,9	0,830 0,297
K	A δ_A	410,7 49,8	58,0 13,1	8,1 1,6	42,0 5,9	301,3 31,4	5,7 1,7	7,2 2,2	– –
C	A δ_A	477,7 38,9	77,7 5,4	20,2 4,4	11,0 2,4	350,8 26,5	3,7 0,7	10,2 2,6	0,293 0,108
D	A δ_A	398,0 94,4	64,9 12,5	15,7 4,1	28,0 10,8	242,1 38,9	15,1 7,6	64,4 37,9	0,588 0,230
Водосбор р. Томи/Catchment of the Tom river [19]									
верховодка top water	A δ_A	60,3 12,5	7,3 1,5	2,3 0,4	4,1 0,5	42,4 12,4	0,5 0,02	3,7 0,3	0,155 0,038
аллювиальные воды alluvial waters	A δ_A	149,0 30,1	19,8 6,0	5,3 0,9	9,2 2,4	92,4 28,5	10,1 4,7	12,2 5,6	0,542 0,170
Q	A δ_A	266,0 34,7	44,8 10,1	5,1 1,0	19,9 7,3	173,2 32,0	12,4 3,6	10,6 3,7	1,194 0,475
зона трещиноватости fractured zone	A δ_A	733,9 22,0	56,6 6,0	11,5 1,0	19,4 1,0	318,5 20,3	318,5 4,9	9,4 1,8	0,593 0,197
Томское месторождение пресных подземных вод/Tomsk fresh groundwater deposit [23]									
верховодка top water	A	371,2	63,3	9,4	29,8	244,2	19,5	5,0	2,200
N+Q	A	397,6	69,0	10,2	9,4	304,8	3,8	0,4	4,200
P	A	457,1	75,8	14,5	15,6	345,0	6,2	nd	4,400
K (без anomalно высоких значений) K (no abnormally high values)	A	725,7	50,1	28,8	138,9	302,9	205,0	0,0	4,800

Таблица 3. Значимые коэффициенты корреляции между площадью поверхностных водосборов и гидрогеохимическими показателями родников и погрешности их определения

Table 3. Significant coefficients of correlation between the area of surface watersheds and hydrogeochemical indicators of springs and errors in their determination

Показатель Index	Коэффициент корреляции <i>r</i> Correlation coefficient <i>r</i>	Погрешность определения коэффициента корреляции δ_r Correlation coefficient determination error δ_r
ЕС	0,65	0,15
S(mi)	0,77	0,10
Ca ²⁺	0,74	0,11
Mg ²⁺	0,62	0,16
Na ⁺	0,50	0,19
HCO ₃ ⁻	0,82	0,08
SO ₄ ²⁻	0,69	0,13
Cl ⁻	0,43	0,20
NO ₃ ⁻	0,45	0,20
БО*/ВО*	0,81	0,09

Примечание: S(mi) – сумма главных ионов; ЕС – удельная электропроводность; БО* – бихроматная окисляемость в 14 пробах в 2021 г.; для прочих показателей использовались данные 17 измерений в 2020 и 2021 гг.

Note: S (mi) is the sum of the main ions; ЕС – electrical conductivity; ВО * – dichromate oxidizability in 14 samples in 2021; for other indicators, data from 17 measurements in 2020 and 2021 were used.

Общий смысл зависимости (8) заключается в том, что наиболее значительные изменения химического

состава речных вод приурочены к очень малым значениям модулей водного стока, характерным для начальных стадий формирования склонового, подповерхностного и подземного стока. В частности, для родников г. Томска этот диапазон ограничен значениями дебитов до 0,10–0,15 л/с, свыше которых связь с суммой главных ионов приобретает достаточно привычный характер обратной степенной зависимости (рис. 3).

Некоторое исключение при этом составляют только два родника из комплекса № 4, данные по которым, тем не менее, укладываются в общую зависимость увеличения с ростом площади поверхностного водосбора (рис. 3). Наиболее очевидное объяснение указанных выше фактов заключается в увязке повышенных содержаний растворенных солей с загрязнением подземных вод, особенно с учетом данных [11] за 1889 г. о сухом остатке родника «Дальний» (родник 4а на пер. Тихом, рис. 1, табл. 1) в 511 и 514 мг/дм³ (21.01.1889 и 25.06.1889 гг. по старому стилю). Сумма главных ионов S(mi) связана с величиной сухого остатка СО регрессионной зависимостью S(mi)=1,44·СО–21,52 (корреляционное отношение R²=0,79), что соответствует значениям S(mi), равным 714,3 и 718,6 мг/дм³, соответственно. Но все это означает, что за последние 132 года (при условии неизменного дебита 1,15 л/с) ионный сток увеличился более чем на 29 тыс. т, а при равномерном увеличении выноса – на 224 т ежегодно. В водосбор родника № 4а возможно поступление сточных вод ливневой кана-

лизации и ряда предприятий, но на территории г. Томска не зафиксированы источники загрязнения подобной интенсивности. Обычно среднегодовая ми-

нерализация сточных вод, поступающих в водные объекты в бассейне р. Томи, не превышает 800 мг/дм^3 [38].

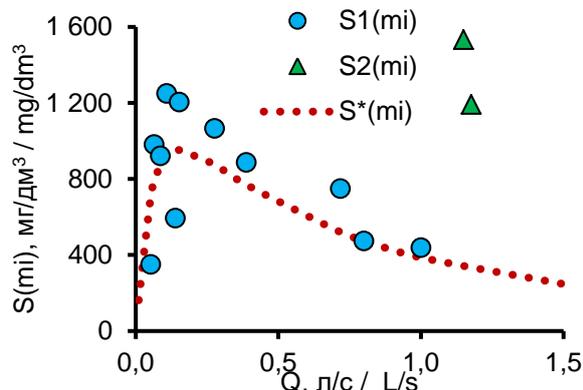


Рис. 3. Изменение суммы главных ионов $S(mi)$ в пробах родниковых вод в зависимости от дебита родников Q : $S2$ – пробы из родников 4а и 5а; $S1$ – пробы из прочих родников; $S^*(mi)$ – расчет по модели (8) с параметрами: $C_0=811,0 \text{ мг/дм}^3$; $Q_0=0,34 \text{ л/с}$; $k_0=7,515$; $k_1=-7,922$; $k_2=0,066$; $R^2=0,46$

Fig. 3. Change in the sum of the main ions $S(mi)$ in samples of spring waters depending on the flow rate of springs Q : $S2$ – samples from springs 4a and 5a; $S1$ – samples from other springs; $S^*(mi)$ – calculation according to model (8) with parameters: $C_0=811,0 \text{ mg/dm}^3$; $Q_0=0,34 \text{ l/s}$; $k_0=7,515$; $k_1=-7,922$; $k_2=0,066$; $R_2=0,46$

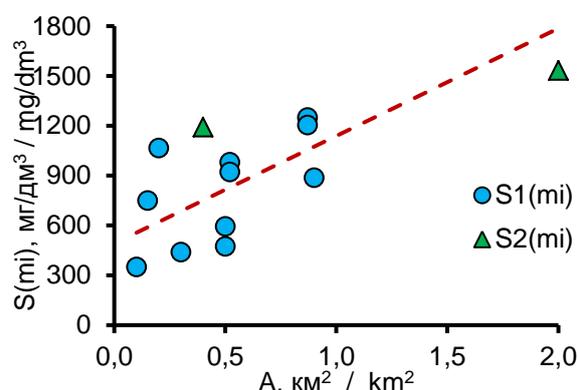


Рис. 4. Изменение суммы главных ионов $S(mi)$ в пробах родниковых вод в зависимости от площади поверхностного водосбора A : $S2$ – пробы из родников 4а и 5а; $S1$ – пробы из прочих родников; пунктиром показано уравнение регрессии: $S(mi)=(491,54\pm 161,56)+(647,11\pm 285,32)\cdot A$; $R^2=0,36$; $N=11$ (без родников 4а и 5а); с родниками 4а и 5а ($N=13$): $S(mi)=(595,70\pm 121,11)+(498,42\pm 157,50)\cdot A$; $R^2=0,48$

Fig. 4. Change in the sum of the main ions $S(mi)$ in the samples of spring waters depending on the area of the surface catchment A : $S2$ – samples from springs 4a and 5a; $S1$ – samples from other springs; the dotted line shows the regression equation: $S(mi)=(491,54\pm 161,56)+(647,11\pm 285,32)\cdot A$; $R^2=0,36$; $N=11$ (without springs 4a and 5a); with springs 4a and 5a ($N=13$): $S(mi)=(595,70\pm 121,11)+(498,42\pm 157,50)\cdot A$; $R^2=0,48$

Более обоснованной, на наш взгляд, является гипотеза о перераспределении поверхностных и подземных потоков при строительстве и эксплуатации свайных фундаментов, дорожной сети, систем водоотведения и водоснабжения, в результате чего существующий родник стал местом разгрузки подземных вод с большей территории и более глубоких горизонтов с соленатыми подземными водами. Прямых доказательств нет, но еще в 1889 г. в родниках и колодцах в долине рек Томи и Ушайки отмечены значения сухого остатка $1267,0$ и $1792,5 \text{ мг/дм}^3$. При этом окисляемость воды в первом случае составила $10,8 \text{ мгО/дм}^3$, а во втором – «следы» [11]. В качестве косвенного доказательства можно указать на точку с суммой главных ионов $1533,7 \text{ мг/дм}^3$, соответствующую на рис. 4 роднику 4а. Также следует добавить, что в долине р. Ушайки обнаружены выходы радона и ряд других достаточно важных геохимических показателей [14, 39], свидетельствующих о возможности антропогенного изменения системы подземного водообмена на фоне, безусловно, имеющего место загрязнения подземных вод [40, 41].

Заключение

Самые высокие содержания растворенных солей обнаружены в родниковых водах на участке ниже по течению от устья р. Ушайки и, собственно, в долине

р. Ушайки в результате совместного влияния антропогенных факторов и разгрузки подземных вод с минерализацией более 1 г/дм^3 , в том числе, с большой вероятностью, – из меловых отложений Обь-Томского междуречья. Антропогенные факторы эволюции водных экосистем – не только загрязнение поверхности на промышленных площадях или инфильтрация поверхностного стока, включая продукты растворения и трансформации песко-соляной смеси для улучшения условий эксплуатации городских дорог, но и изменение интенсивности и структуры подземного водообмена вследствие строительства и эксплуатации свайных фундаментов, систем водоотведения и водоснабжения. В частности, судя по полученным данным, в XX в. произошло вовлечение в разгрузку подземных вод в северной части г. Томска в районе ул. Дальне-Ключевской с большей площади и из более глубоких горизонтов. В долине р. Ушайки всегда существовали выходы подземных вод с повышенным содержанием ряда химических элементов, но за последние 100–150 лет очевидно поступление в подземные водоносные горизонты органических и биогенных веществ с коммунально-бытовыми стоками. Весьма неоднозначная ситуация выявлена в районе Лагерного сада, где функционирует система противоползневых сооружений. Представляется, что на

склоне Лагерного Сада вероятно разгрузка большого объема стока с водосбора, границы которого могут достигать поселка Предтеченск, а также потерь из систем водоснабжения и водоотведения.

Для предотвращения и снижения негативного антропогенного воздействия на подземные воды на территории г. Томска необходимо создание и анализ математической модели [42, 43] формирования подземного стока самого города и прилегающих территорий, соответствующих областям питания водоносных горизонтов. Такая модель поможет при проектировании и повышении эффективности существующих систем

ливневой канализации, канализации хозяйственно-бытовых стоков, водо- и теплоснабжения. Использование родников для питьевого водоснабжения, вследствие особенностей химического состава их вод и факторов их формирования, невозможно. Целесообразно, вполне логично и эффективно для решения культурно-бытовых задач города [12] применять решения с включением родников в проекты благоустройства территории.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-55-80015.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Водный кодекс Российской Федерации: федеральный закон от 03.06.2006 № 74-ФЗ. С изменениями на 02.07.2021 г. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_60683/ (дата обращения 15.01.2022).
2. Шварцев С.Л. Общая гидрогеология. – М.: Альянс, 2012. – 600 с.
3. Hölting B., Coldewey W.G. Hydrogeology. – Berlin, Germany: Springer, 2019. – 357 p.
4. Hiscock K.M., Bense V.F. Hydrogeology: principles and practice. – New York City: John Wiley & Sons, 2021. – 768 p.
5. Handbook of vadose zone characterization & monitoring / L. Gray Wilson, Lorne G. Everett, Stephen J. Cullen. – Oxfordshire: Routledge, 2018. – 752 p.
6. Weight W.D. Hydrogeology field manual. 2nd ed. – USA: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008. – 751 p.
7. Hendriks M.R. Introduction to physical hydrology. – Oxford, New York: Oxford University Press, 2010. – 331 p.
8. Szymkiewicz A. Modelling water flow in unsaturated porous media accounting for nonlinear permeability and material heterogeneity. – Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer (Heidelberg), 2013. – 254 p. DOI: 10.1007/978-3-642-23559-7
9. Coldewey W.G., Gobel P. Hydrogeologische Gelände- und Kartiermethoden. – Berlin: Springer Spektrum, 2015. – 221 p. DOI: 10.1007/978-3-8274-2728-1.
10. Томск: история города в иллюстрациях. 1604–2004 / под ред. Э.И. Черняк. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 2004. – 600 с.
11. Леман Э.А. Химический анализ воды, употребляемой в г. Томске для питья и различных хозяйственных надобностей // Томский университетский вестник. – 1889. – С. 125–136.
12. Назаров А.Д. Родники г. Томска – распространение, состав, возможности использования и аквапаркового обустройства // Известия Томского политехнического университета. – 2002. – Т. 305. – № 8. – С. 236–256.
13. Кузеванов К.И. Гидрогеологическая основа экологических исследований города Томска // Обской вестник. – 1999. – № 1–2. – С. 53–58.
14. Мананков А.В., Парначев В.П. Геоэкологические аспекты состояния поверхностных и подземных вод города Томска // Обской вестник. – 1999. – № 1–2. – С. 105–116.
15. Наливайко Н.Г. Микрофлора подземных вод города Томска как критерий их экологического состояния: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2003. – 21 с.
16. Наливайко Н.Г., Кузеванов К.И., Копылова Ю.Г. Атлас бактериальных пейзажей родников г. Томска. – Томск: SST, 2002. – 52 с.
17. Hydrogeological conditions changes of Tomsk, Russia / V.D. Pokrovsky, E.M. Dutova, K.I. Kuzevanov, D.S. Pokrovsky, N.G. Nalivaiko // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – № 27 (1). – P. 012031.
18. Пасечник Е.Ю. Эколого-геохимическое состояние природных вод территории города Томска (правобережной части р. Томь): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2010. – 22 с.
19. Shvartsev S.L., Rasskazov N.M., Savichev O.G. Contents and migration forms of elements in natural waters of the mid-Tom' basin // Geologiya i Geofizika. – 1997. – V. 38. – № 12. – P. 1955–1961.
20. Состояние геологической среды (недр) на территории Томской области в 2000 г. Вып. 6 / под ред. В.А. Лыгина. – Томск: Территориальный центр «Томскгеомониторинг», 2001. – 180 с.
21. Ермашова Н.А. Геохимия подземных вод зоны активного водообмена Томской области в связи с решением вопросов водоснабжения и охраны: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 1998. – 44 с.
22. Шварцев С.Л., Савичев О.Г. Базовые пункты гидрогеохимических наблюдений – новая методическая основа для решения водно-экологических проблем (на примере бассейна верхней и Средней Оби) // Обской вестник. – 1999. – № 3–4. – С. 27–32.
23. Колоколова О.В. Геохимия подземных вод района Томского водозабора: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2003. – 21 с.
24. Микроэлементный состав подземных вод верхней гидрогеодинамической зоны в бассейне Верхней Оби как фактор формирования их эколого-геохимического состояния / Е.Ю. Пасечник, Н.В. Гусева, О.Г. Савичев, В.А. Лыгин, А.А. Балобаненко, В.А. Домаренко, О.Н. Владимирова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 4. – С. 54–63. DOI: 10.18799/24131830/2020/4/2593.
25. Manual on stream gauging. V. I. Fieldwork. WMO. No. 1044. – Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2010. – 252 p.
26. Manual on stream gauging. Vol. II. Computation of Discharge. WMO. No. 1044. – Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2010. – 198 p.
27. Градостроительный атлас г. Томска // Департамент архитектуры и градостроительства администрации Города Томска. URL: <https://map.admtomsk.ru> (дата обращения 15.01.2022).
28. Савичев О.Г., Колоколова О.В., Жуковская Е.А. Состав и равновесие донных отложений р. Томь с речными водами // Геоэкология. – 2003. – № 2. – С. 108–119.
29. Алексин О.А. Основы гидрохимии. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 444 с.
30. Гидрохимические показатели состояния окружающей среды / Я.П. Молчанова, Е.А. Заика, Э.И. Бабкина, В.А. Сурнин / под ред. Т.В. Гусевой. – М.: ФОРУМ, ИНФРА-М, 2007. – 192 с.
31. Гидрогеология СССР. Т. 16. Западно-Сибирская равнина (Тюменская, Омская, Новосибирская и Томская области) / под ред. В.А. Нуднера. – М.: Недра, 1970. – 368 с.
32. Владимирова О.Н., Савичев О.Г. Взаимосвязи между речными и подземными водами в нижнем течении реки Томь (Томская область, Российская федерация) // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2021. – № 4. – С. 41–52. DOI: 10.31857/S0869780921040111.
33. Рогов Г.М., Попов В.К., Осипова Е.Ю. Проблемы использования природных вод бассейна реки Томи для хозяйственно-питьевого водоснабжения. – Томск: Изд-во ТГСАУ, 2003. – 218 с.
34. СП 33-101-2003. Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М.: Госстрой России, 2004. – 72 с.
35. Kresic N. Types and classifications of springs // Groundwater hydrology of springs. – Amsterdam: Elsevier Inc, 2010. – С. 31–85.

36. Stevens L.E., Jenness J., Ledbetter J.D. Springs and springs-dependent taxa of the Colorado River basin, southwestern North America: geography, ecology and human impacts // *Water* (Switzerland). – 2020. – № 12 (5). – P. 1501. DOI: 10.3390/w12051501
37. Savichev O.G., Zemtsov V.A., Pasechnik E.Y. Hydrologic conditions for chemical composition of the Siberian river waters // *Aktru: IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – № 232. – P. 1–6. DOI: 10.1088/1755-1315/232/1/012012.
38. Лыготин В.А., Савичев О.Г., Нигороженко В.Я. Состояние поверхностных водных объектов, водохозяйственных систем и сооружений на территории Томской области в 2000-2005 гг. – Томск: ОАО «Томскгеомониторинг», 2006. – 88 с.
39. Исследование и охрана радоновых источников в окрестностях г. Томска / Н.М. Семенова, А.Д. Назаров, Н.Г. Сидорина, П.А. Тишин // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2016. – Т. 327. – № 7. – С. 22–34.
40. *Natural groundwater quality* / Eds. W.M. Edmunds, P. Shand. – Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons, 2009. – 488 p.
41. Appelo C.A.J., Postma D. *Geochemistry, groundwater and pollution*. – London: CRC press, 2004. – 672 p.
42. McLean M.I. et al. Statistical modelling of groundwater contamination monitoring data: a comparison of spatial and spatiotemporal methods // *Science of the Total Environment*. – 2019. – V. 652. – P. 1339–1346.
43. Kresic N. *Hydrogeology and groundwater modeling*. – Bosa Roca, United States: CRC press, 2006. – 828 p.

Поступила 02.02.2022 г.

Информация об авторах

Пасечник Е.Ю., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Лыготин В.А., кандидат геолого-минералогических наук, директор филиала «Сибирский региональный центр Государственного мониторинга состояния недр» Федерального государственного бюджетного учреждения «Гидроспецгеология».

Савичев О.Г., доктор географических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Чилингер Л.Н., кандидат технических наук, старший преподаватель отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Хвощевская А.А., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Чжоу Дань, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 556.314:556.535.8

CHEMICAL COMPOSITION OF SPRINGS AS AN INDICATOR OF NATURAL-TECHNOGENIC EVOLUTION OF THE URBAN ECOSYSTEM (ON THE EXAMPLE OF TOMSK CITY, SOUTH-EAST OF WESTERN SIBERIA)

Elena Yu. Pasechnik¹,
paseyu@yandex.ru

Oleg G. Savichev¹,
OSavichev@mail.ru

Victor A. Lgotin²,
tgm@tgm.ru

Liliya N. Chilinger¹,
lilichilinger@gmail.com

Albina A. Khvashchevskaya¹,
hvashevskaya@tpu.ru

Zhou Dan¹,
929177582@qq.com

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

² Hydrospetsgeologiya, branch of the Siberian Regional Center of the GMNS,
99, Nikitin street, Tomsk, 634061, Russia.

The relevance of the study is determined by the need for the integrated use of springs in the urban environment and the expediency of their use as an indicator of changes in its natural and man-made changes. Such studies are relevant for the territory of Tomsk in the context of the limited availability of observation and production wells, but a large number of springs in different parts of the city, reflecting the state of the feeding and transit zones of groundwater formed under various conditions of anthropogenic load.

The main aim is to identify natural and anthropogenic changes in the chemical composition of spring waters as an indicator of the corresponding changes in the urban environment.

Objects: springs on the territory of Tomsk (Western Siberia).

Methods: modern methods for determining the chemical composition of groundwater, statistical methods.

Results. The analysis of the ecological and geochemical state of spring waters on the territory of Tomsk (Western Siberia) in 2020–2021 has been carried out. It was shown that the highest concentrations of dissolved salts were found in spring waters in the area downstream of the mouth of the river Ushaika and in its valley as a result of anthropogenic factors and unloading of groundwater with a salinity of more than 1 g/dm³, including, most likely, from the Cretaceous deposits of the Ob-Tomsk interfluvium. Based on the analysis, it was revealed that the anthropogenic influencing factors include not only surface pollution in industrial areas or infiltration of surface runoff, including the products of dissolution and transformation of the sand-salt mixture to improve the operating conditions of urban roads, but also changes in the intensity and structure of underground water exchange due to construction and operation of pile foundations, drainage and water supply systems. Conclusions are drawn about the need to create and analyze a mathematical model for the formation of underground runoff in the city of Tomsk and in the adjacent territories to design and improve the efficiency of existing storm sewage systems, sewage of household wastewater, water and heat supply, as well as the inexpediency of using the springs of the city of Tomsk as alternative sources of water supply due to the peculiarities of the chemical composition of their waters and the factors of their formation.

Key words:

Chemical composition, springs, the city of Tomsk, Western Siberia, natural and anthropogenic changes in the urban environment.

The research was financially supported by the RFBR within the scientific project no. 18-55-80015.

REFERENCES

1. Vodny kodeks Rossiyskoy Federatsii Federalny zakon ot 03.06.2006 № 74-FZ. S izmeneniyami na 02.07.2021 g. [Water Code of the Russian Federation. Federal law dated 03.06.2006. no. 74-FZ]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_60683/ (accessed 15 January 2022).
2. Shvarcev S.L. *Obshchaya gidrogeologiya* [General hydrogeology]. Moscow, Alyans Publ., 2012. 600 p.
3. Hölting B., Coldewey W.G. *Hydrogeology*. Berlin, Germany, Springer, 2019. 357 p.
4. Hiscock K.M., Bense V.F. *Hydrogeology: principles and practice*. New York City, John Wiley & Sons, 2021. 768 p.
5. *Handbook of vadose zone characterization & monitoring*. L. Gray Wilson, Lorne G. Everett, Stephen J. Cullen. Routledge, 2018. 752 p.
6. Weight W.D. *Hydrogeology field manual*. 2nd ed. USA, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008. 751 p.
7. Hendriks M.R. *Introduction to physical hydrology*. Oxford, New York, Oxford University Press, 2010. 331 p.
8. Szymkiewicz A. *Modelling water flow in unsaturated porous media accounting for nonlinear permeability and material heterogeneity*.

- neity. Heidelberg, New York, Dordrecht, London, Springer (Heidelberg), 2013. 254 p. DOI: 10.1007/978-3-642-23559-7
9. Coldewey W.G., Gobel P. *Hydrogeologische Gelände- und Kartiermethoden*. Berlin, Springer Spektrum, 2015. 221 p. DOI: 10.1007/978-3-8274-2728-1.
 10. *Tomsk: istoriya goroda v illyustratsiyakh. 1604–2004* [Tomsk: the history of the city in illustrations. 1604–2004]. Ed. by E.I. Chernyak, Tomsk, Tomsk University Publ. House, 2004. 600 p.
 11. Leman E.A. Khimicheskiy analiz vody, upotrebyaemoy v g. Tomsk dlya pitya i razlichnykh khozyaystvennykh nadobnostey [Chemical analysis of water used in Tomsk for drinking and various household needs]. *Tomsk University Bulletin*, 1889, pp. 125–136.
 12. Nazarov A.D. Springs of the city of Tomsk – distribution, composition, possibilities of use and water park arrangement. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2002, vol. 305, no. 8, pp. 236–256.
 13. Kuzevanov K.I. Hidrogeologicheskaya osnova ekologicheskikh issledovaniy goroda Tomsk [Hydrogeological basis of ecological research of the city of Tomsk]. *Obskoy vestnik*, 1999, no. 1–2, pp. 53–58.
 14. Manankov A.V., Parnachev V.P. Geoekologicheskie aspekty sostoyaniya poverhnostnykh i podzemnykh vod goroda Tomsk [Geoeological aspects of the state of surface and underground waters of the city of Tomsk]. *Obskoy vestnik*, 1999, no. 1–2, pp. 105–116.
 15. Nalivayko N.G. *Mikroflora podzemnykh vod goroda Tomsk kak kritery ikh ekologicheskogo sostoyaniya*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Microflora of underground waters of the city of Tomsk as a criterion for their ecological state. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2003. 21 p.
 16. Nalivayko N.G., Kuzevanov K.I., Kopylova Yu.G. *Atlas bakteri-alnykh peyzazhey rodnikov g. Tomsk* [Atlas of bacterial landscapes of springs in Tomsk]. Tomsk, SST Publ., 2002. 52 p.
 17. Pokrovsky V.D., Dutova E.M., Kuzevanov K.I., Pokrovsky D.S., Nalivaiko N.G. Hydrogeological conditions changes of Tomsk, Russia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, no. 27 (1), pp. 012031.
 18. Pasechnik E.Yu. *Ekologo-geokhimicheskoe sostoyanie prirodnykh vod territorii goroda Tomsk (pravoberezhnoy chasti r. Tom*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Ecological and geochemical state of natural waters in the territory of the city of Tomsk (right-bank part of the Tom River)]. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2010. 22 p.
 19. Shvartsev S.L., Rasskazov N.M., Savichev O.G. Contents and migration forms of elements in natural waters of the mid-Tom' basin. *Geologiya i Geofizika*, 1997, vol. 38, no. 12, pp. 1955–1961.
 20. *Sostoyanie geologicheskoy sredy (nedr) na territorii Tomskoy oblasti v 2000 g.* [The state of the geological environment (subsoil) on the territory of the Tomsk region in 2000]. Ed. by V.A. Lgotin. Tomsk, Tomskgeomonitring Publ., 2001. No. 6, 180 p.
 21. Ermashova N.A. *Geokhimiya podzemnykh vod zony aktivnogo vodobmena Tomskoy oblasti v svyazi s resheniem voprosov vodost-nabzheniya i okhrany*. Avtoreferat Dis. kand. nauk [Geochemistry of groundwater in the zone of active water exchange in the Tomsk region in connection with the solution of issues of water supply and protection. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 1998. 44 p.
 22. Shvartsev S.L., Savichev O.G. Bazovye punkty gidrogeokhimicheskikh nablyudeniya – novaya metodicheskaya osnova dlya resheniya vodno-ekologicheskikh problem (na primere basseyna verkhney i Sredney Obi) [Basic points of hydrogeochemical observations – a new methodological basis for solving water and environmental problems (on the example of the Upper and Middle Ob basin)]. *Obskoy vestnik*, 1999, no. 3–4, pp. 27–32.
 23. Kolokolova O.V. *Geokhimiya podzemnykh vod rayona Tomskogo vodozabora*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Geochemistry of groundwater in the Tomsk water intake area Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, TF IGNG SO RAN Publ., 2003. 21 p.
 24. Pasechnik E.Yu., Guseva N.V., Savichev O.G., Domarenko V.A., Vladimirova O.N. Trace elements composition of underground waters of the upper hydrogeodynamic zone in the basin of upper ob as a factor of formation of their ecological-geochemical condition. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 4, pp. 54–63. In Rus. DOI:10.18799/24131830/2020/4/2593
 25. *Manual on Stream Gauging*. Vol. I. Fieldwork. WMO. No. 1044. Geneva, Switzerland, World Meteorological Organization, 2010. 252 p.
 26. *Manual on Stream Gauging*. Vol. II. Computation of Discharge. WMO. No. 1044. Geneva, Switzerland, World Meteorological Organization, 2010. 198 p.
 27. Gradostroitelny atlas g. Tomsk [Urban atlas of Tomsk]. *Departament arkhitektury i gradostroitelstva administratsii goroda Tomsk* [Department of Architecture and Urban Planning of Tomsk City Administration]. Available at: <https://map.adm-tomsk.ru> (accessed 15 January 2022).
 28. Savichev O.G., Kolokolova O.V., Zhukovskaya E.A. Sostav i ravnovesie donnykh otlozheniy r. Tom s rechnymi vodami [Composition and balance of bottom sediments of the river. Tom with river waters]. *Geoecology*, 2003, no. 2, pp. 108–119.
 29. Alekin O.A. *Osnovy gidrokhimii* [Fundamentals of hydrochemistry]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1970. 444 p.
 30. Molchanova Ya.P., Zaika E.A., Babkina E.I., Surmin V.A. *Gidrokhimicheskie pokazateli sostoyaniya okruzhayushchey sredy* [Hydrochemical indicators of the state of the environment]. Ed. by T.V. Guseva. Moscow, FORUM, INFRA-M Publ., 2007. 192 p.
 31. *Gidrogeologiya SSSR. T. 16. Zapadno-Sibirskaya ravnina (Tyumenskaya, Omskaya, Novosibirskaya i Tomskaya oblasti)* [Hydrogeology of the USSR. T. 16. West Siberian Plain (Tyumen, Omsk, Novosibirsk and Tomsk regions)]. Ed. by V.A. Nudner. Moscow, Nedra Publ., 1970. 368 p.
 32. Vladimirova O.N., Savichev O.G. Interrelation between river and groundwater in the lower reaches of the Tom river (Tomsk oblast, the Russian Federation). *Environmental Geoscience*, 2021, no. 4, pp. 41–52. In Rus.
 33. Rogov G.M., Popov V.K., Osipova E.Yu. *Problemy ispolzovaniya prirodnykh vod basseyna reki Tomi dlya khozyaystvenno-pitevogo vodostnabzheniya* [Problems of using natural waters of the Tom river basin for domestic and drinking water supply]. Tomsk, TGSAU Publ. House, 2003. 218 p.
 34. SP 33-101-2003. *Svod pravil po proyektirovaniyu i stroitelstvu. Opredelenie osnovnykh raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik* [Code of rules for design and construction. Determination of the main calculated hydrological characteristics]. Moscow, Gostroy of Russia Publ., 2004. 72 p.
 35. Kresic N. Types and classifications of springs. *Groundwater hydrology of springs*. Amsterdam, Elsevier Inc, 2010. pp. 31–85.
 36. Stevens L.E., Jenness J., Ledbetter J.D. Springs and springs-dependent taxa of the Colorado River basin, southwestern North America: geography, ecology and human impacts. *Water (Switzerland)*, 2020, no. 12 (5), pp. 1501. DOI: 10.3390/w12051501.
 37. Savichev O.G., Zemtsov V.A., Pasechnik E.Y. Hydrologic conditions for chemical composition of the Siberian river waters. *Aktru: IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2019, no. 232, pp. 1–6. DOI: 10.1088/1755-1315/232/1/012012.
 38. Lgotin V.A., Savichev O.G., Nigorozhenko V.Ya. *Sostoyanie poverkhnostnykh vodnykh obektov, vodokhozyaystvennykh sistem i sooruzheniy na territorii Tomskoy oblasti v 2000–2005 gg.* [The state of surface water bodies, water management systems and structures in the territory of the Tomsk region in 2000–2005]. Tomsk, Tomskgeomonitring Publ., 2006. 88 p.
 39. Semenova N.M., Nazarov A.D., Loyko S.V., Sidorina N.G., Tishin P.A. Status and prospects of using the health improvement area klyuchi (Tomsk region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 9, pp. 127–139. In Rus.
 40. *Natural groundwater quality*. Eds. W.M. Edmunds, P. Shand. Chichester, United Kingdom, John Wiley & Sons, 2009. 488 p.
 41. Appelo C.A.J., Postma D. *Geochemistry, groundwater and pollution*. London, CRC press, 2004. 672 p.
 42. McLean M.I. Statistical modelling of groundwater contamination monitoring data: A comparison of spatial and spatiotemporal methods. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 652, pp. 1339–1346.
 43. Kresic N. *Hydrogeology and groundwater modeling*. Bosa Roca, United States, CRC press, 2006. 828 p.

Received: 2 February 2022.

Information about the authors

Elena Yu. Pasechnik, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Oleg G. Savichev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Victor A. Lgotin, Cand. Sc., associate professor, Hydrospetsgeologiya, branch of the Siberian Regional Center of the State monitoring of the state of the subsoil.

Liliya N. Chilinger, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Albina A. Khvashchevskaya, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Zhou Dan, graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Корректура и перевод на английский язык *С.В. Жаркова*
Дизайн обложки *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива
Валерия Касаткина

Руководство для авторов и образец оформления статьи: izvestiya.tpu.ru

Подписано к печати 28.07.2022. Дата выхода журнала: 30.07.2022.
Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 24,08. Уч.-изд. л. 21,78.
Заказ 160-22. Тираж 500 экз. Цена свободная.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Адрес учредителя, редакции, издателя, типографии:
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, каб. 139.