

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 333, № 2, 2022

ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ

Редакционная коллегия

Семилетов И.П., гл. редактор, д-р геогр. наук (Россия)
Оствальд Р.В., канд. хим. наук (Россия)
Савичев О.Г., д-р геогр. наук (Россия)
Покровский О.С., канд. геол.-минерал. наук (Франция)
Старостенко В.И., д-р физ.-мат. наук (Украина)
Конторович А.Э., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Белозеров В.Б., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Никитенков Н.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Силкин В.М., д-р физ.-мат. наук (Испания)
Коротеев Ю.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Уленев О.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Борисов А.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Коршунов А.В., д-р хим. наук (Россия)
Пестряков А.Н., д-р хим. наук (Россия)
Тойпель У., Dsc (Германия)
Джин-Чун Ким, Dsc (Южная Корея)
Ильин А.П., д-р физ.-мат. наук (Россия)
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)

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, № 2, 2022

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

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)
Belozherov 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)
Ilyin A.P., Dr. Sc. (Russia)
Zavorin A.S., Dr. Sc. (Russia)
Hanjalic K., Dsc (Netherlands)
Markovich D.M., Dr. Sc. (Russia)
Aleksenko S.V., Dr. Sc. (Russia)
Voropai N.I., Dr. Sc. (Russia)
Kochegurov A.I., Cand. Sc. (Russia)
Rui D., PhD (Portugal)
Ziatdinov R.A., Cand. Sc. (South Korea)
Muravyov S.V., Dr. Sc. (Russia)
Spitsyn V.G., Dr. Sc. (Russia)
Poilov V.Z., Dr. Sc. (Russia)
Lotov V.A., Dr. Sc. (Russia)
Sofronov V.L., Dr. Sc. (Russia)
Bouznik V.M., Dr. Sc. (Russia)
Zakharov Yu.A., Dr. Sc. (Russia)
Antipenko V.R., Dr. Sc. (Russia)
Golik V.I., Dr. Sc. (Russia)
Abutalipova E.M., Dr. Sc. (Russia)
Polishchuk V.I., Dr. Sc. (Russia)
Khamitov R.N., Dr. Sc. (Russia)
Zyuzev A.M., Dr. Sc. (Russia)
Tretiak A.Ya., Dr. Sc. (Russia)
Arbuzov S.I., Dr. Sc. (Russia)
Kovalev V.Z., Dr. Sc. (Russia)
Romanenko S.V., Dr. Sc. (Russia)
Kiryanova L.G., Cand. Sc. (Russia)
Glazyrin A.S., managing editor, Dr. Sc. (Russia)

AIMS AND SCOPES

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

The journal was founded in 1903.

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

ISSN (print) – 2500-1019

ISSN (on-line) – 2413-1830

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

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

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

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

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

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

The publication of manuscripts is free of charge.

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

- Критерии переоценки перспектив нефтегазоносности коллекторных зон фундамента юго-востока Западной Сибири**
Белозёров В.Б., Силкин Г.Е. 7
Criteria for reassessment of oil and gas potential of reservoir zones in southeastern Western Siberia basement
Belozerov V.B., Silkin G.E.
- Волновой торцевой кинематический редуктор для поршневых насосов при добыче тяжелой нефти**
Джасем М.А., Крауиньш П.Я. 17
Wave face kinematic reducer for piston pumps during extraction of heavy oil
Jasem M.A., Kraunish P.Ya.
- Снижение негативного воздействия технологических жидкостей на продуктивные объекты Соровского месторождения путем их модификации**
Фоломеев А.Е., Вахрушев С.А., Хатмуллин А.Р., Малинин А.В., Ленченкова Л.Е., Туриянов А.Р., Давиденко И.С. 26
Reducing the negative impact of workover fluids on Sorovskoe oilfield sandstone formation by their modification
Folomeev A.E., Vakhrushev S.A., Khatmullin A.R., Malinin A.V., Lenchenkova L.E., Turiyanov A.R., Davidenko I.S.
- Процессы электростатической сепарации и флотации в обогащении ильменитовых руд из Вьетнама и химическая переработка полученных концентратов**
Карелин В.А., Ле Хай Шон, Карелина Н.В., Ле Хуонг Тхи Май 38
Processes of electrostatic separation and flotation in the beneficiation of ilmenite ores from Vietnam and chemical processing of the obtained concentrates
Karelin V.A., Son H. Le, Karelina N.V., Huong Le Thi Mai
- Аналитическое решение для шестимассовой термодинамической модели асинхронного двигателя закрытого исполнения**
Ершов М.С., Феоктистов Е.А. 55
Analytical solution for a six-mass thermodynamic model of a TEFC induction motor
Ershov M.S., Feoktistov E.A.
- Технология очистки и рециклинга бурового раствора**
Третьяк А.А., Яценко Е.А., Борисов К.А., Карельская Е.В. 62
Drilling mud cleaning and recycling technology
Tretyak A.A., Yatsenko E.A., Borisov K.A., Karelskaya E.V.
- Разработка методики определения неорганизованных выбросов природного газа в атмосферу**
Байков И.Р., Китаев С.В., Шаммазов А.М., Зубаилов Г.И. 71
Development of a method for determining inorganized emissions of natural gas to the atmosphere
Baykov I.R., Kitaev S.V., Shammazov A.M., Zubailov G.I.
- Алгоритм управления системой алмазного бурения Нескоромных В.В., Попова М.С., Зотов З.Г., Лиу Баочанг 81
Algorithm of diamond drilling system control
Neskoromnykh V.V., Popova M.S., Zotov Z.G., Liu Baochang**
- Влияние компонентного состава нефти на коэффициент теплопроводности формируемых органических отложений**
Илюшин П.Ю., Вяткин К.А., Козлов А.В. 90
Oil component composition influence on thermal conductivity of formed organic deposits
Ilyushin P.Yu., Vyatkin K.A., Kozlov A.V.
- Палеогеография тюменской свиты в пределах Усть-Балык-Мамонтовского вала**
Староселец Д.А., Смирнов П.В. 98
Paleogeography of the Tyumen formation within the Ust-Balyk-Mamontov shaft
Staroselets D.A., Smirnov P.V.
- Влияние биогеохимической обстановки водосборного бассейна озера Телецкое (Северо-Восточный Алтай) на содержание главных ионов и Fe в водах его притоков**
Пузанов А.В., Бабошкина С.В., Рождественская Т.А., Балькин С.Н., Балькин Д.Н., Салтыков А.В., Трошкова И.А., Двуреченская С.Я. 111
Influence of the biogeochemical situation of the lake Teletskoe catchment (north-eastern Altai) on the content of the major ions and Fe in the tributaries waters
Puzanov A.V., Baboshkina S.V., Rozhdestvenskaya T.A., Balykin S.N., Balykin D.N., Saltykov A.V., Troshkova I.A., Dvurechenskaya S.Ya.
- Усовершенствованная математическая модель участка магистрального трубопровода с лупингом**
Шестаков Р.А., Резанов К.С., Матвеева Ю.С., Ванчугов И.М. 123
Improved mathematical model of the main pipeline with looping
Shestakov R.A., Rezanov K.S., Matveeva Yu.S., Vanchugov I.M.
- Условия образования и источники флюида Юбилейного медноколчеданного месторождения (Южный Урал) по данным термобарогеохимии и изотопно-геохимических исследований**
Целуйко А.С., Анкушева Н.Н., Садыков С.А. 132
Conditions of formation and fluid sources of Yubileynoe VMS deposit (southern Urals): fluid inclusion data and isotopic and geochemical study
Tseluyko A.S., Ankusheva N.N., Sadykov S.A.
- Технология удаления свободного формальдегида из карбамидоформальдегидных смол**
Липин К.В., Федосеев С.В., Кизяев Д.А. 146
Technology for removing free formaldehyde from urea-formaldehyde resins
Lipin K.V., Fedoseev S.V., Kizyaev D.A.
- Обзор состояния сурьмяной отрасли России**
Хатков В.Ю., Боярко Г.Ю., Болсуновская Л.М., Дибров А.М., Ткачева Е.В. 153
Review of current antimony industry position in Russia
Khatkov V.Yu., Boyarko G.Yu., Bolsunovskaya L.M., Dibrov A.M., Tkacheva E.V.
- Оценка перспектив использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии в ближайшие двадцать лет**
Бульба Е.Е., Кузнецов Г.В., Швайбович М.И. 164
Assessment of the prospects for using unconventional renewable energy sources in the next twenty years
Bulba E.E., Kuznetsov G.V., Shvaybovich M.I.
- Аккумуляция тяжелых металлов в почвах Свердловской области**
Харина Г.В., Алешина Л.В. 173
Accumulation of heavy metals in the soils of the Sverdlovsk region
Kharina G.V., Aleshina L.V.

- | | | |
|---|------------|--|
| Исследование структуры и физико-механических свойств керамики на основе оксинитридов алюминия и циркония
Матренин С.В., Мостовщиков А.В., Мировой Ю.А., Чудинова А.О. | 184 | Research of structure and physical and mechanical properties of ceramics based on aluminum and zirconium oxynitrides
Matrenin S.V., Mostovshchikov A.V., Mirovoy Yu.A., Chudinova A.O. |
| Сравнительный анализ методик прогноза максимальных уровней и объема стока периода половодья горной реки
Галахов В.П., Ловцкая О.В., Самойлова С.Ю., Мардасова Е.В. | 193 | Comparative analysis of methods for forecasting maximum levels and volumes of flood runoff of a mountain river
Galakhov V.P., Lovtskaya O.V., Samoilova S.Yu., Mardasova E.V. |
| Оценка набухающих свойств глин на территории г. Караганда с применением методов машинного обучения
Вдовкина Д.И., Кошляков А.Е., Пономарева М.В., Пономарева Е.В. | 204 | Estimation of clay swelling properties in Karaganda territory using machine learning methods
Vdovkina D.I., Koshliakov O.Y., Ponomareva M.V., Ponomareva E.V. |

УДК 550.53

КРИТЕРИИ ПЕРЕОЦЕНКИ ПЕРСПЕКТИВ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ КОЛЛЕКТОРНЫХ ЗОН ФУНДАМЕНТА ЮГО-ВОСТОКА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Белозёров Владимир Борисович¹,
BelozerovVB@hw.tpu.ru

Силкин Геннадий Евгеньевич²,
gsilkin@geoprime.ru

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

² Филиал ООО «ГеоПрайм»-«Томская геофизическая компания»,
Россия, 634029, г. Томск, пр. Фрунзе, 39.

Актуальность. Образования палеозоя Западной Сибири являются основным объектом дальнейшего наращивания углеводородного потенциала рассматриваемой территории. Сложность геологического строения пород фундамента, неудовлетворительное качество бурения, крепления и испытания скважин обусловили низкую эффективность нефтепоисковых работ в отложениях палеозоя, где все выявленные месторождения и залежи углеводородов открыты попутно с проведением геологоразведочных работ на объекты осадочного чехла. Одно из перспективных направлений повышения эффективности поисковых работ в породах фундамента связано с анализом особенностей бурения и результатов испытания ранее пробуренных скважин, где можно выделить геологический и технологический факторы. Геологический фактор рассматривает результаты бурения и испытания скважины с позиции блоковой, складчатой, слоистой модели строения трещиновато-порово-кавернозной коллекторной зоны, выделяемой в составе палеозойского комплекса. Анализируемая складчато-слоистая модель позволяет оценить возможность изменения объёма сжимаемого флюида (нефть, газ) в процессе бурения и испытания скважины. При бурении, в результате повышенного давления на забое скважины относительно пластового в продуктивном пласте, обладающем аномально высокими фильтрационно-емкостными свойствами, происходит уменьшение объёма углеводородного флюида, что приводит к поглощению промывочной жидкости, иногда до полной потери циркуляции. Этот эффект может наблюдаться при бурении скважины как в контуре залежи, так и в водоносной зоне в непосредственной близости от неё. При испытании скважины и снижении давления в процессе её освоения происходит расширение (релаксация) ранее сжатых объёмов углеводородного флюида. В случае бурения скважины в водонефтяной зоне наблюдаются сменяющиеся водо-нефтяные и нефтеводяные притоки, а при расположении скважины в водоносной части залежи отмечается самопроизвольный излив или высокие дебиты на незначительных динамических уровнях высокоминерализованной пластовой воды с повышенными значениями газового фактора относительно значений предельного насыщения. Технологический фактор оценивает качество цементирования эксплуатационной колонны, влияющий на конечные результаты испытания и, как следствие, на оценку перспектив нефтегазоносности анализируемого разреза скважины. Проведённая систематизация результатов бурения и испытания позволяет определить критерии для оценки перспектив нефтегазоносности изучаемых скважин и площадей с целью возобновления поисковых работ для открытия залежей углеводородов в породах доюрского комплекса.

Цель исследования заключается в анализе результатов бурения и испытания скважин, проводимых в породах фундамента юго-восточной части Западно-Сибирской плиты для выделения нефтеперспективных участков и возобновления поисковых работ на ранее изученных площадях.

Объектом исследования являются отложения палеозойского фундамента юго-восточной части Западно-Сибирской плиты, которые представлены породами различного вещественного состава, включая карбонатные разности.

Выполнен анализ результатов бурения и испытания скважин, проводимых в палеозойском комплексе, определены критерии полученных данных для возможного возобновления нефтепоисковых работ на площадях, ранее изученных глубоким бурением.

Ключевые слова:

Доюрский осадочный комплекс, породы фундамента, результаты испытания доюрского осадочного комплекса, поглощение бурового раствора, переливы пластовых вод.

Введение

В условиях значительного сокращения подготовленных запасов углеводородного сырья по отложениям осадочного чехла все большее внимание недропользователей привлекает доюрский комплекс (ДЮК) палеозойского фундамента. Рассматриваемый комплекс в отличие от отложений платформенного чехла характеризуется существенно более сложным геологическим строением, что обусловлено:

- значительным проявлением блоковой тектоники в породах фундамента в сочетании с неоднократным выходом отложений на эрозионную поверхность,

последующим их размывом и формированием кор выветривания;

- многообразием вещественного состава ДЮК – от интрузивных и вулканогенных эффузивных пород и их разностей до осадочных карбонатно-терригенных отложений и продуктов их метаморфизма и разрушения;
- низкой эффективностью сейсмических и других дистанционных методов исследований при картировании как внутренней структуры палеозоя, так и его эрозионно-тектонической поверхности;
- низким выносом керна, особенно в перспективных трещинных, кавернозных, кавернозно-трещинных

интервалах разреза, не превышающим первых процентов от длины интервала отбора, а иногда и полным его отсутствием;

- сложностью выделения коллекторных зон (КЗ) скважинными геофизическими методами;
- осложнениями и высокой аварийностью в процессе бурения, в результате чего значительное число скважин ликвидировано без получения геологической информации;
- низким качеством цементирования (изоляции) затрубного пространства эксплуатационных колонн, особенно в потенциально продуктивных интервалах;
- высокой степенью неоднозначности результатов испытания объектов.

Следует отметить, что практически все залежи углеводородов в ДЮК были открыты «попутно» скважинами, основная задача которых состояла в поиске углеводородов (УВ) в отложениях осадочного чехла платформы. Образования фундамента при этом вскрывались в основном на глубины от нескольких метров до 50–70 м, в редких случаях более 100 м, вследствие чего в настоящее время наиболее хорошо изучена верхняя часть ДЮК, представленная проницаемыми толщами коры выветривания (пласт М) и кровлей палеозойских образований (пласт М1).

Планомерное изучение перспектив ДЮК было сосредоточено на уже открытых месторождениях и окружающих их территориях с привлечением комплексных исследований методами сейсморазведки, потенциальных полей, грави- и магниторазведки.

Глубина вскрытия пород фундамента параметрическим бурением на этих территориях достигала 1000–1500 м, что позволило получить определённые представления о перспективах нефтегазоносности его глубинных частей.

Анализ и систематизация накопленной информации позволяют сформировать критерии для переоценки полученных в результате бурения данных и определить скважины и участки, где необходимо возобновить поисковые работы с целью открытия залежей углеводородов в породах фундамента.

Модели продуктивных объектов ДЮК

Правильное понимание процесса бурения и испытания скважин в отложениях палеозоя во многом зависит от особенностей строения продуктивных коллекторов в ДЮК.

Рассматривая модель строения продуктивных резервуаров ДЮК необходимо отметить, что пространственное распределение залежей контролируется блоковой разнородностью образований палеозоя [1–6], а особенность испытания обусловлена различиями коллекторских свойств слоистой неоднородности складчатой системы фундамента [7–15].

Складчато-блоковая неоднородность подтверждается материалами сейсморазведки, где первичная обработка данных проведена по определённому графу [16], и результатами стратиграфического анализа керн глубоких скважин (рис. 1). По материалам про-

странственно-ориентированного керн [17] и результатам стратиграфических исследований пород фундамента в пробуренных скважинах [18] в пределах Калиновой площади выделяется антиклинальная и синклиальная складки северо-западного простирания, осложнённые амплитудными тектоническими нарушениями (рис. 1, Б). При углах падения слоистости складки 20–44 градуса амплитуда смещения границы среднего и верхнего девона в сводовой и крыльевой частях складки в скважинах 25 и 16, расположенных на расстоянии 750 м, составляет 1040 м. При этом наиболее опущенным является свод антиклинальной складки (скв. 16) относительно её крыльевых частей (скв. 25). Складчато-блоковая модель хорошо интерпретируется и по данным сейсморазведки Арчинско-Урманской площади (рис. 1, А), где также отмечается вертикальное смещение разновозрастных блоков фундамента, представленных фрагментами антиклинальных и синклиальных складок.

Слоистая, фильтрационная неоднородность КЗ пород фундамента подтверждается результатами бурения горизонтальной скважины 1201 Арчинской площади, представленными в таблице, из которой следует, что складчатый комплекс продуктивного горизонта по данным механических параметров бурения характеризуется ярко выраженной слоистой, фильтрационно-емкостной неоднородностью. Это отражается в активном поглощении бурового раствора, высокой скорости бурения и «провала» инструмента в пределах выделяемых высокоёмких проницаемых прослоев карбонатного коллектора.

Таблица. Параметры бурения и газопоказания горизонтальной скважины 1201 Арчинской площади

Table. Drilling parameters and gas indications of the horizontal well 1201, Archinskaya square

Интервал Interval	Газопоказания, % Gas indications, %	Скорость бурения, м/ч Drilling speed, m/h	Поглощение, м ³ /ч Absorption, m ³ /h
3725...3729	0,1...0,4	6–33	Без выхода циркуляции Without circulation outlet
3729...3752	0,1...2,5	5–15	18–26
3752...3766	до 49/to 49	5–12	15–18
3766...3791	0,5...1,6	4–8	14–16
3791...3815	до 32/to 32	4–8	6–8
3815...3861	1,1...1,6	–	6–10
3861...3880	0,2...16,2	8–95 (провал инструмента) (fall drilling tools)	Полная потеря циркуляции Complete loss of circulation
3880...3890	1,5...2,1	6–8	10–18

Присутствие в строении слоисто-складчатого фундамента, представленного карбонатными породами, интервалов трещинно-кавернозно-карстового коллектора оказывает существенное влияние на особенности проводки скважины и результаты её испытания.

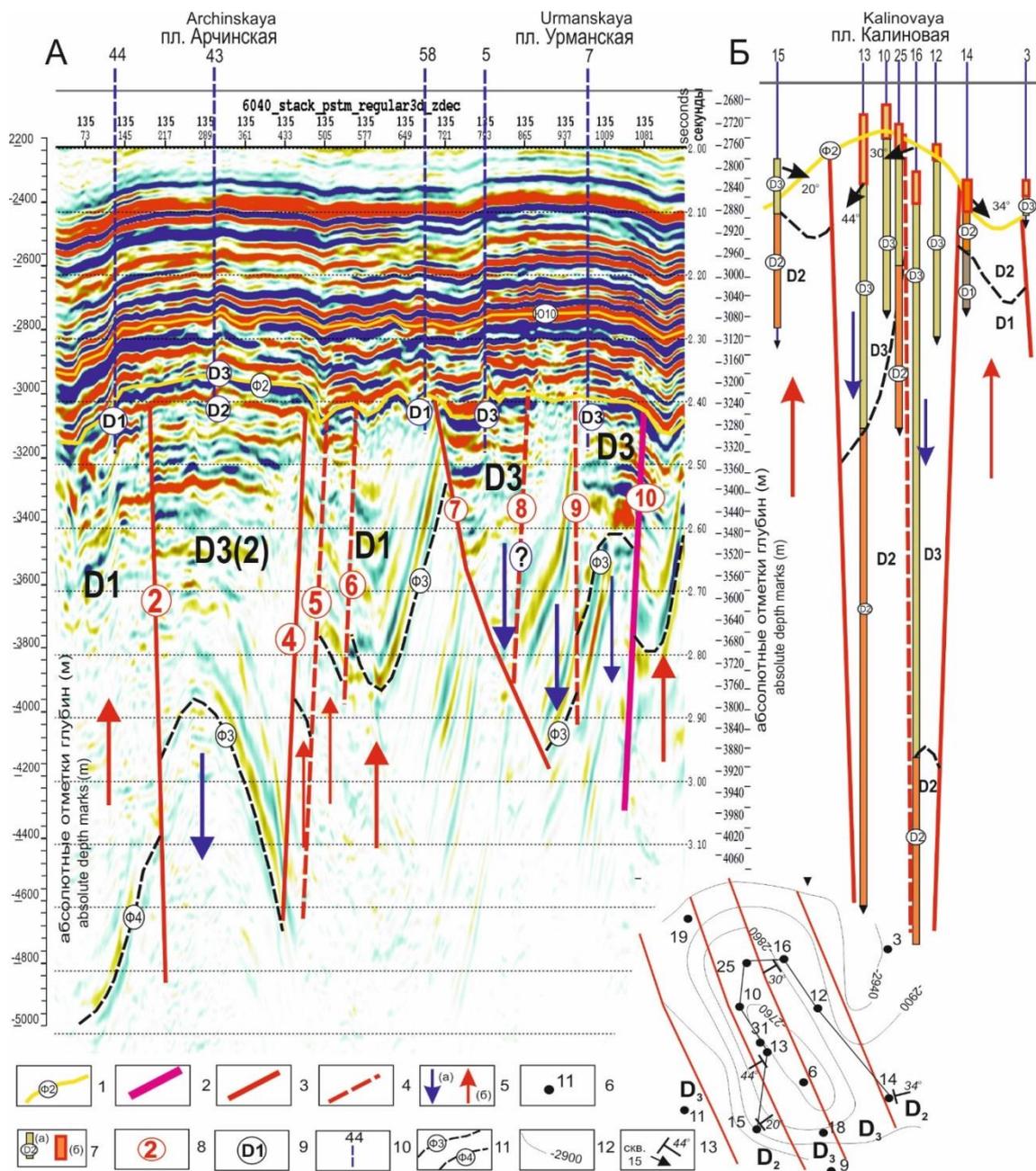


Рис. 1. Складчато-блоковое строение фундамента Урмано-Арчинской и Калиновской площадей по данным сейсмического профиля (А) и результатам глубокого бурения (Б): 1 – отражающий сейсмический горизонт кровли фундамента (Ф2); 2 – региональные тектонические нарушения в фундаменте (по В.С. Суркову); 3 – тектонические нарушения, разделяющие различные стратиграфические блоки; 4 – тектонические нарушения в пределах однородных стратиграфических блоков; 5 – погружение (а) и поднятие (б) крупных блоков фундамента; 6 – скважина, её номер; 7 – определение возраста пород фундамента по разрезу скважины (а) и интервалы коры выветривания (б); 8 – номер тектонического нарушения, выделенного по сейсморазведке; 9 – возраст пород фундамента по данным пробуренных скважин; 10 – скважины, вынесенные на линию сейсмического профиля; 11 – прогнозируемое распределение сейсмических границ палеозойского фундамента; 12 – сейсмоизогины отражающего горизонта Ф2 (кровля пород фундамента); 13 – азимут и угол падения слоистости в отложениях палеозоя по данным ориентированного ядра

Fig. 1. Fold-block structure of the Urmano-Archinskaya and Kalinovaya basement areas according to seismic profile data (A) and results of deep drilling (B): 1 – reflective seismic horizon of the basement roof (Ф2); 2 – regional tectonic faults in the basement (according to V. Surikov); 3 – tectonic faults, separating different stratigraphic blocks; 4 – tectonic faults within homogeneous stratigraphic blocks; 5 – immersion (a) and uplift (b) of large blocks of the foundation; 6 – well, its number; 7 – determination of the basement rocks age along the well section (a) and intervals of the weathering crust (b); 8 – number of tectonic fault identified by seismic survey; 9 – basement rocks age according to drilled wells; 10 – wells, which placed on the seismic line; 11 – predicted distribution of seismic boundaries of the Paleozoic basement; 12 – seismic isohypses of the reflecting horizon Ф2 (top of the basement rocks); 13 – azimuth and angle of incidence of bedding in Paleozoic sediments according to oriented core data

Геологические факторы оценки критериев перспектив нефтегазоносности по данным бурения и испытания скважин

Геологические факторы базируются на особенностях геологического строения и флюидонасыщении КЗ ДЮК. Раскарстованные, интенсивно кавернозные и трещинные коллекторные зоны в карбонатных породах, связанные с древними зонами гипергенеза, выделяются как в зоне контакта пород фундамента и осадочного чехла, так и в «глубинном» палеозое. При их вскрытии наблюдается резкое увеличение скорости проходки, провалы бурового инструмента и поглощение бурового раствора, которое иногда принимает катастрофический характер (более 5–10 м³/ч).

Вскрытие высокочемкой КЗ, сопровождающееся катастрофическим поглощением бурового раствора, при ранее принятой технологии бурения на глинистом растворе с удельным весом от 1,14 до 1,2 г/см³ и конструкции скважин с кондуктором, башмак которого находился на глубине от 300 м, максимум до 600 м, как правило, приводило к аварийной ситуации и в конечном итоге к ликвидации скважины в результате геологического осложнения.

Связывая поглощения с процессом промывки скважины глинистым раствором под давлением бурового насоса в образованиях палеозойского фундамента, необходимо отметить, что оно (поглощение) возможно при наличии в КЗ сжимаемого флюида (нефть, газ), удельный вес которого в пластовых условиях может варьировать в пределах от 0,5 до 0,7 г/см³.

В ряде литературных источников [19, 20] поглощения, а тем более катастрофические поглощения, в породах фундамента объясняют наличием залежей углеводородов. Катастрофические поглощения с последующей ликвидацией скважин в отложениях глубинного палеозоя и пластах М и М1 отмечались на Северо-Калиновой (скв. 26, 29), Кильсинской (скв. 380), Урманской (скв. 3), Амурской (скв. 1), Рогозинской (скв. 8) и ряде других площадей.

В то же время анализ бурения показывает, что при вскрытии высокопроницаемой КЗ ДЮК насыщенной пластовой водой с минерализацией 60–80 г/л и удельным весом 1,05–1,08 г/см³ поглощений не происходит, скважина успешно бурится до проектного забоя, а при испытании КЗ в открытом стволе (или в колонне) получают значительные притоки пластовой воды. Так, в скважине 44 Солоновской площади из интервала перфорации 3136–3145 м дебит пластовой воды на динамическом уровне 550 м составил 432 м³/сут при газовом факторе 1,38 м³/м³.

Неопределенная ситуация возникает в тех случаях, когда скважина вскрывает КЗ с первоначально выраженным поглощением бурового раствора, которое затем (иногда при дальнейшем углублении, иногда даже без него) переходит в поступление пластовой воды вплоть до интенсивного вытеснения бурового раствора из скважины.

На практике такие примеры не редки – скважина Ураловская 302, интервал 2883–2889 м, где после интенсивного поглощения начался процесс поступления из поглощающей ранее зоны пластовой воды, скважина Рагозинская ПО-3, в которой также после вскры-

тия поглощающего интервала 2583,9–2587,8, при его дальнейшей проработке, поглощение сменилось на интенсивный водоприток из этого же интервала.

Учитывая влияние трещиновато-кавернозно-карстовых прослоев в составе продуктивной КЗ ДЮК на процесс бурения и испытания скважины, необходимо рассмотреть возможные сценарии распределения флюидных разделов в скважинах, расположенных в нефтяной, водо-нефтяной и законтурной зонах залежи УВ (рис. 2, А).

Сценарий первый. Бурение скважины в водоносной части пласта в непосредственной близости от контура залежи УВ при поглощении сопровождается обширным проникновением бурового раствора в трещинно-кавернозно-карстовую зону коллектора (рис. 2, Б), что обеспечивается сжатием углеводородного флюида (газ, нефть). Пластовая вода при этом, выполняя роль несжимаемого буфера, занимает положение между буровым раствором и залежью углеводородов.

При испытании скважины фильтрат глинистого раствора, имея повышенную вязкость относительно пластовой воды и нефти, вытесняется преимущественно из трещин и лишь частично из порово-кавернозно-карстовых зон. Дальнейшее расширение газонефтяной зоны воздействует на пластовую воду буфера, способствуя её переливу и фонтанированию на устье скважины (рис. 2, Б-1).

Притоки пластовой воды на «переливе» – достаточно распространенное явление при освоении КЗ в ДЮК. Небольшое превышение пластового давления над гидростатическим (5–10 атм) в отложениях фундамента юго-восточной части ЗСП, при глубинах залегания его кровли 2600–3100 м, с учётом повышенного удельного веса высокоминерализованной пластовой воды (1,05–1,08 г/см³), не может служить основанием для наблюдаемых притоков, достигающих на переливе значений 100–200 м³/сут и более. При этом поступающая пластовая вода зачастую характеризуется повышенным газовым фактором (2–8 м³/м³) относительно предельного газонасыщения (1,6 м³/м³) для вод палеозоя [21], что также косвенно свидетельствует о близости залежи углеводородов.

В качестве примера можно привести результаты испытания серых трещиноватых кавернозных известняков в интервале 3092–3013 м скважины Р-13 Нижнетабаганской площади, где после перфорации и вызова притока сменой глинистого раствора на воду в течении двух часов наблюдался перелив технической воды дебитом 360–100 м³/сут. Затем скважина в течении трёх часов переливала пластовой водой дебитом 70–80 м³/сут. Минерализация пластовой воды составляла 56 г/л, газовый фактор – 2,5 м³/м³, пластовое давление на глубине 3098 м – 318 атм.

Сценарий второй (разновидность первого). Скважина пробурена в водонефтяной зоне залежи со значительным интервалом вскрытия водоносной части (рис. 2, В). В процессе поглощения и снижения объёма углеводородного флюида пластовая вода в интервале скважины вытесняется буровым раствором в подошвенную часть участка нефтяной залежи, выполняя роль несжимаемого буфера между буровым раствором и залежью УВ.

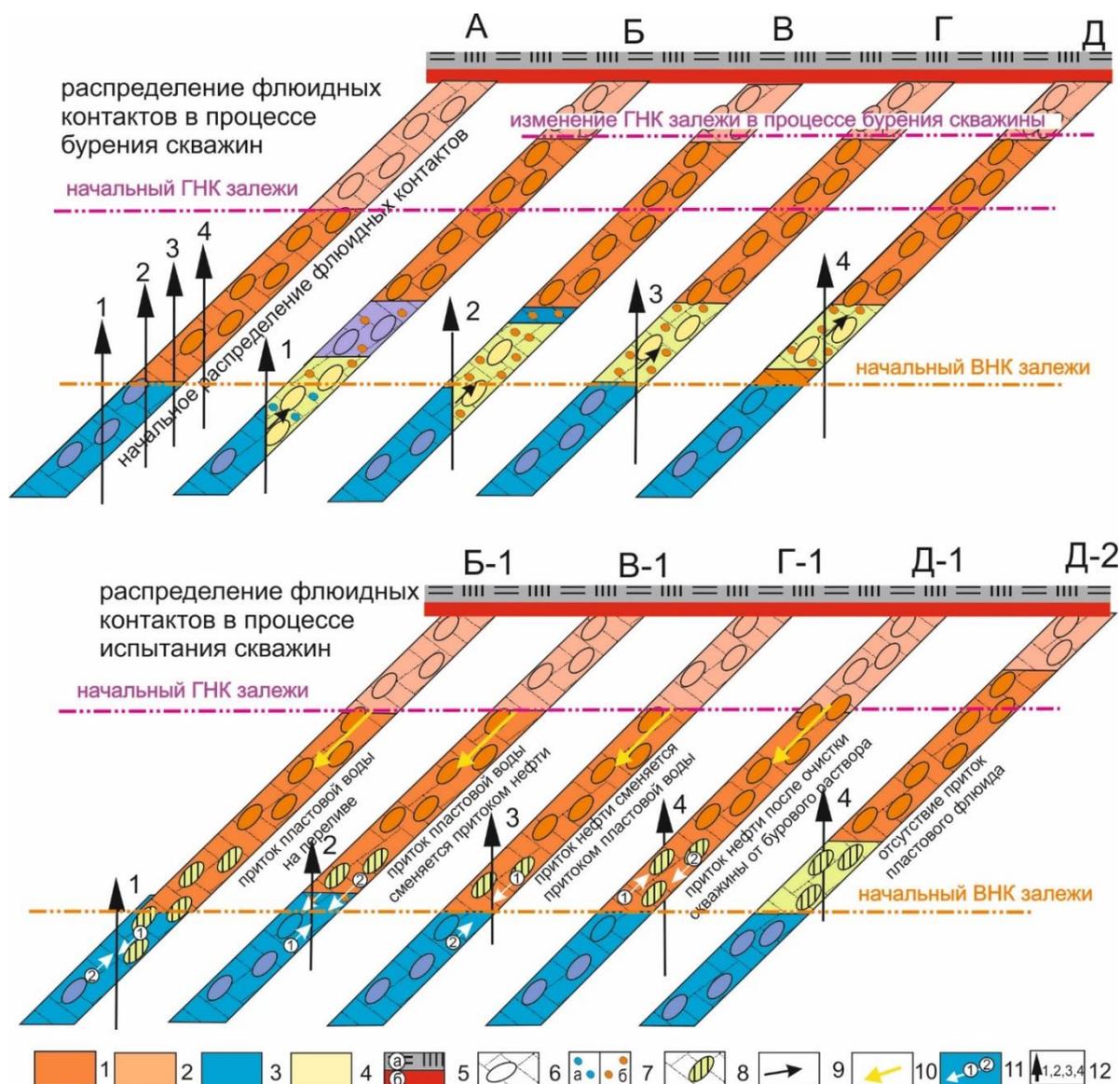


Рис. 2. Особенности распределения флюидных контактов в трещинно-кавернозно-карстовом коллекторе фундамента при бурении и испытании скважин, расположенных в различных частях залежи углеводородов: 1 – нефтенасыщенная, 2 – газонасыщенная, 3 – водонасыщенная зона коллектора; 4 – буровой раствор; 5 – стратиграфическое несогласие (кровля фундамента) или тектонические нарушения складчатости; 7 – трещинно-кавернозная КЗ; 8 – остаточные флюиды воды (а) и нефти (б); 8 – локализация остаточного бурового раствора в трещинно-кавернозном коллекторе при испытании скважины; 9 – направление движения бурового раствора в процессе бурения, обусловленное «сжатием» газа и газонасыщенного флюида (нефти); 10 – направление расширения залежи углеводородов в процессе испытания скважины; 11 – скважина вскрывает законтурную зону залежи нефти (1), зону водо-нефтяного контакта (2–3), залежь нефти (4)

Fig. 2. Peculiarities of fluid contacts distribution in the fractured-cavernous-karst basement reservoir during drilling and testing wells located in different parts of the hydrocarbon deposit: 1 – oil-bearing, 2 – gas-bearing, 3 – water-bearing zones of reservoir; 4 – drilling liquid; 5 – stratigraphic unconformity basement top (a) or tectonic squaring disturbances (b); 6 – fractured-cavernous reservoir zone (RZ); 7 – residual fluids of water (a) and oil (b); 8 – localization of residual drilling mud in a fractured-cavernous reservoir when well testing; 9 – movement direction of drilling fluid during drilling, due to the «compression» of gas and gas-saturated fluid (oil); 10 – expansion direction of hydrocarbon deposits during well testing; 11 – test flow sequence; 12 – well penetrates the peripheral zone of the oil reservoir (1), the zone of water-oil contact (2-3), the oil reservoir (4)

При испытании в процессе расширения объемов углеводородного флюида в начальный момент после очистки скважина работает самоизливом пластовой воды или пластовой воды с плёнкой нефти, а затем в процессе дальнейшего дренирования объекта происходит замена пластовой воды на нефть, причем доля

нефти может достигать 100 %, т. е. происходит практически полная замена первоначально полученного флюида (рис. 2, В-1).

Примером может служить ситуация на скважине Северо-Останинская Р-5, где при испытании в карбонатном разрезе объекта в интервале 2827–2834 м в

процессе возбуждения пласта сменой глинистого раствора на техническую воду и снижения динамического уровня, скважина начала переливать сначала технической водой, а затем пластовой водой дебитом $100 \text{ м}^3/\text{сут}$ с незначительной пленкой нефти. В течение 11 суток наблюдения за переливом пластовая вода постепенно сменилась на нефть, и скважина вышла на фонтанирование газонефтяной смесью $Q_n=84 \text{ м}^3/\text{сут}$, $Q_g=195 \text{ тыс. м}^3/\text{сут}$ без признаков пластовой воды.

В качестве аналогий можно привести результаты испытаний по скважине Останинская 438 (интервал 2750–2755 м), где после её возбуждения скважина, сначала работая пластовой водой и нефтью, в процессе очистки полностью перешла на нефть. В скважине Герасимовская 301 при испытании интервала 2779–2791 м первоначально наблюдался перелив пластовой воды с газом и пленкой нефти, который при дальнейшей очистке в течение пяти суток полностью сменился на фонтанный приток нефти.

Сценарий третий. Скважина пробурена в водонефтяной зоне с незначительным интервалом вскрытия водоносной части. Буровой раствор в результате сжатия углеводородного флюида занимает объёмы трещинно-кавернозно-карстового пространства, разделяя нефтяную и водоносную части залежи (рис. 2, Г).

При испытании скважины, после её очистки, отмечается приток безводной нефти, сменяющийся затем притоком пластовой воды (рис. 2, Г-1). Вероятно, это обусловлено тем, что остаточные объёмы не вытесненного бурового раствора в нефтяной зоне коллектора способствуют дополнительному продвижению в околоскважинном пространстве нефтяной залежи, затронутой процессами бурения и испытания, в водоносную часть. В результате этого на начальном этапе испытания скважина, работающая нефтью, затем переходит на пластовую воду за счёт формирования конуса обводнения законтурной области.

В качестве примера можно привести результаты испытания скважины 4 Верхне-Тарского месторождения, где первоначальный приток нефти дебитом $120 \text{ м}^3/\text{сут}$ за несколько дней фонтанирования полностью заместился пластовой водой.

Сценарий четвёртый. Бурение скважины в нефтяной зоне продуктивного пласта при поглощении сопровождающегося обширным проникновением бурового раствора в трещинно-кавернозную зону коллектора, что обеспечивается сжатием пластового флюида (газ, нефть) в гипсометрически повышенной части залежи (рис. 2, Д).

При испытании интервала поглощения в колонне снижение забойного давления инициирует расширение ранее сжатого флюида, в результате чего происходит очищение прежде всего трещинной, а затем частично и кавернозно-карстовой зон коллектора от глинистого раствора, и скважина переходит на фонтанирование нефтью (рис. 2, Д-1).

Примером рассматриваемого сценария может служить скв. 42 Арчинской площади, где в процессе бурения интервала глубин 3053–3061 м наблюдался провал инструмента и нефтепроявления в глинистом растворе. Дальнейшее бурение сопровождалось по-

стоянным поглощением промывочной жидкости, которое, тем не менее, не приобретало катастрофический характер, поэтому блокирующие добавки в раствор не вводились, что позволило сохранить гидродинамическую связь КЗ и скважины. При испытании интервала 3050–3060 м в течение месяца (31 день) проводилась очистка скважины от раствора и шлама, после чего был получен фонтан нефти дебитом $84,6 \text{ м}^3/\text{сут}$ на штуцере 5 мм.

Пятый сценарий. В случае аварийной ситуации, связанной с поглощением, что требовало длительных работ по его устранению, предусматривалась закачка значительных объёмов блокирующих наполнителей, а иногда и тампонажной смеси на основе цементного раствора (рис. 2, Д-2). Проведение этих мероприятий сопровождается потерей фильтрационно-емкостных свойств КЗ. В результате при испытании, как правило, приток флюида или отсутствует, или в случае низкого качества цемента скважины получают пластовую воду как следствие заколонных перетоков из других водонасыщенных объектов.

Примером отсутствия притока из интервала, который при бурении проявлял себя как катастрофически поглощающий, может служить скважина Р-4 Тамбаевской площади, где при проводке открытого ствола наблюдались многочисленные нефтепроявления и поглощения промывочной жидкости (интервалы 3229–3260, 3304–3308, 3507–3555, 3589–3601 м), а цементирование обсадной колонны имеет признаки низкого качества. В итоге из интервалов испытания получены либо слабые притоки пластовой воды или фильтрата бурового раствора, либо отсутствие какого-либо притока.

Пример получения практически одинаковых результатов – испытание двух объектов на скв. 31 Калганакской площади, один из которых в интервале 2748–2760 м водонасыщен, а второй в интервале 2721–2730 м, при вскрытии которого наблюдался провал бурового инструмента и резкое увеличение скорости проходки, сопровождаемое катастрофическим поглощением, вероятно нефтегазонасыщен. В результате по обоим объектам получен переливающий приток пластовой воды, без признаков выхода поглощенного раствора (с большим количеством блокирующих поглощение наполнителей). Качество цементирования обсадной колонны в интервале ДЮК низкое, поэтому все результаты испытания относятся к нижнему объекту. Верхний поглощающий объект заблокирован во время бурения, и возможно цементирование обсадной колонны.

Технологические факторы оценки критериев перспектив нефтегазоносности по данным бурения и испытания скважин

Технологические факторы отражают проблему качества цементирования (изоляция) затрубного пространства, вносящую серьёзные искажения в результаты испытания объектов ДЮК и их эксплуатацию в колонне.

Большая часть обсадных колонн, спускаемых в перспективные разрезы ДЮК, содержащие КЗ, по ре-

зультатам проверки характеризуется низким качеством цементирования. Последствия этого носят крайне негативный характер, ставящий под сомнение достоверность результатов испытаний. При анализе явно прослеживается тренд – чем вероятнее нахождение в обсаживаемом интервале высокочемной КЗ, тем хуже качество цементирования обсадной колонны в перспективном интервале, вплоть до практически полного отсутствия цемента в затрубном пространстве. Объясняется это поглощением тампонажной цементной смеси коллекторной зоной. В случае спуска обсадной колонны в разрез ДЮК, не содержащий высокоёмкий коллектор, или при насыщении трещинно-кавернозно-карстовой зоны пластовой водой качество цементирования получается вполне приемлемым, поглощений тампонажной смеси и блокирования КЗ не происходит.

Рассматривая особенности испытания поглощающих объектов, необходимо отметить, что перед получением пластового флюида наблюдается процесс очистки пласта от поглощенного бурового раствора (при условии сохранения гидродинамической связи КЗ с скважиной).

В то же время по испытанию ряда скважин (приведенных выше по тексту) видно, что ранее поглощающий объект при бурении, по которому проводились противопоглощающие мероприятия (закачки разного рода блокираторов-наполнителей – резиновой и полипропиленовой крошки, древесных опилок, химерагентов-сгустителей, глинисто-цементных смесей и др.), в процессе испытания в колонне начинает работать пластовая вода и по результатам опробования признаётся водонасыщенным. Исследование акустической цементометрии в таких скважинах свидетельствуют о низком качестве изоляции затрубного пространства, что и предопределяет приток пластовой воды из водоносных коллекторов, расположенных ниже или выше зоны перфорации. Дополнительные изоляционные работы, проводимые в таких скважинах с целью ликвидации затрубного перетока, в очень редких случаях приводили к положительному результату.

Примером такой ситуации могут служить результаты испытаний объектов в параметрических глубоких скважинах П-2 Еллей-Игайская, П-3 Тамбаевская и других, где при отмечаемых признаках УВ насыщения и поглощения бурового раствора различной интенсивности, наблюдаемых в процессе бурения на различных участках карбонатного палеозойского разреза, при испытании в колонне получены фонтанные притоки пластовой, часто сильно разгазированной воды с пленками нефти и конденсата.

Качество затрубной изоляции на этих скважинах по результатам инструментальных замеров акустической цементометрии (АКЦ) признано неудовлетворительным. Дополнительные цементации с целью изоляции объектов были выполнены без видимых успехов.

Блоковая слоисто-складчатая модель строения палеозойских образований отражается в резкой латеральной неоднородности продуктивных резервуаров как в разрезе, так и по площади. Роль блоковой тектоники и слоистой складчатости в распределении нефте-

газоносности можно проследить на примере бурения скважин 137 и 133 Южно-Табаганской площади.

В соответствии со стратиграфическими определениями возраста, породы кровли фундамента в скважине 137 в диапазоне глубин 3005–3052 м представлены доломитизированными, кавернозно-трещиноватым органогенным известняками верхнедевонского возраста, из которого в интервалах 3028–3032 м (абс. отм. – 2892–2896 м) и 3046–3051 м (абс. отм. – 2910–2915 м) при испытании в колонне притоки нефти на 14 мм штуцере соответственно составили 412 и 318 м³/сут. Из нижележащих тёмно-серых глинистых известняков аналогичного возраста при испытании интервала 3964–3073 м (абс. отм. –2927–2938 м) на динамическом уровне 1167 м получена плёнка нефти.

В скважине 133, расположенной в 200 м западнее скв. 137 в диапазоне глубин 3057–3104 м (абс. отм. – 921–2926 м) кровля палеозоя охарактеризована тёмно-серым трещиноватым мергелем нижнего девона без признаков нефтегазоносности. Ввиду отсутствия нефтеперспективных объектов скважина была ликвидирована без опробования.

Возрастные и литологические различия пород фундамента рассматриваемых скважин обусловлены наличием тектонического нарушения и литологической слоисто-складчатой неоднородностью, влияющими на пространственную локализацию залежи углеводородов.

Рассматривая результаты бурения и испытания палеозойских разрезов скважин, документация которых формировалась на бумажных носителях (дела скважины), с позиции переоценки перспектив их нефтегазоносности, следует отметить, что при их оцифровке и в дальнейшем при проводимом анализе, как правило, не использовались и не учитывались в полном объеме как ежедневные сводки бурения скважины, так и другая архивная информация (ежемесячные информационные сводки по бурению НГРЭ, ежегодные обобщающие геологические отчеты НГРЭ). Этот факт затрудняет отслеживание случаев поглощения бурового раствора в процессе проводки скважины за исключением серьезных аварийных ситуаций, отраженных в цифровом деле скважины. Поэтому анализ бурения скважины необходимо проводить с использованием всего набора архивных первоисточников.

Выводы

1. На базе блоковой слоисто-складчатой модели строения пород фундамента спрогнозировано поведение и распределение флюидных контактов залежи УВ при бурении и испытании трещинно-кавернозно-карстовых КЗ в ДЮК.
2. С учётом анализа результатов бурения и испытания высокопродуктивных коллекторных зон фундамента по «архивным» данным пробуренных скважин (дела скважин, отчеты НГРЭ и ТТГУ, информационные сводки) установлены критерии прогноза нефтегазоносности, позволяющие определить возвратные объекты для продолжения нефтепоисковых работ на ранее изученных струк-

турах и площадях, выведенных из бурения с отрицательным результатом.

3. На конкретных примерах показана значимость аналитического исследования исторических данных бурения «архивных» скважин, вскрывших потенциально-продуктивные КЗ в ДЮК, но не завершённых получением положительного результата, исходя из особенностей поведения продуктивных УВ-залежей и их флюидных контактов, при бурении и испытании трещинно-кавернозно-карстовых зон блоково-складчатой модели ДЮК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Paleozoic of West Siberia – geological structure, oil and gas bearing, seismogeological models of oil and gas fields / V. Kontorovich, L. Kalinina, A. Kalinin, M. Soloviev // Conference Proceedings Geomodel. – Venue, September 2018. – V. 2018. – P. 1–5.
2. Kontorovich V.A. Petroleum potential of reservoirs at the Paleozoic-Mesozoic boundary in West Siberia: seismogeological criteria (example of the Chuzik-Chizhapka regional oil-gas accumulation) // Russian Geology and Geophysics. – May 2007. – V. 48. – № 5. – P. 422–428.
3. Paleozoic facies megazones in the basement of the West Siberian geosyncline / E.A. Yolkin, A.E. Kontorovich, N.K. Bakharev, S.Yu. Belyaev, A.I. Varlamov, N.G. Izokh, A.V. Kanygin, V.A. Kashtanov, N.P. Kirida, A.G. Klets, V.A. Kontorovich, V.I. Krasnov, V.A. Krinin, S.A. Moiseev, O.T. Obut, S.V. Saraev, N.V. Sennikov, V.M. Tishchenko // Russian Geology and Geophysics. – June 2007. – V. 48. – № 6. – P. 491–504.
4. Geological structure of the basement of western and eastern parts of the West-Siberian / K. Ivanov, V. Erokhin, V. Ponomarev, O. Pogromskaya, S. Berzin // International journal of environmental & science education. – May 2016. – V. 11. – № 14. – P. 6409–6432.
5. Сейсмогеологические модели палеозойских комплексов и нефтегазоперспективных объектов юго-востока Западной Сибири (Новосибирская область) / В.А. Конторович, Л.М. Калинина, А.Ю. Калинин, К.И. Канакова, М.В. Соловьёв // Технологии сейсморазведки. – 2017. – № 3. – С. 85–95.
6. Конторович В.А., Калинина Л.М. Геологическое строение и нефтегазоносность палеозоя Западной Сибири, модели эталонных месторождений // Бурение и нефть. – 2019. – № 11. – С. 40–47.
7. Ковешников А.Е. Резервуары нефти и газа в доюрских образованиях Западно-Сибирской геосинеклизы // Известия Томского политехнического университета. Геология нефти и газа. – 2011. – Т. 319. – № 1. – С. 147–151.
8. Запивалов Н.П. Метасоматическая доломитизация и нефтегазоносность карбонатных пород (нанозффекты образования вторичных высокопродуктивных коллекторов) // Наука и технологические разработки. – 2009. – Вып. 2. – Т. 88. – С. 32–39.
9. Геологическое изучение и нефтегазоносность палеозойских отложений Западной Сибири / А.В. Ступакова, А.В. Соколов, Е.В. Соболева, Т.А. Кирюхина, И.А. Курасов, Е.В. Бордюг // Георесурс. – 2015. – № 2 (61). – С. 63–76.
10. The characteristics and origins of thief zones in the Cretaceous limestone reservoirs of Central and southern Mesopotamian Basin / Hangyu Liu, Kaibo Sh, Bo Liu, Xinmin Song, Liben Deng, Rui Guo, Zhongyuan Tian, Yong Li, Ya Deng, Genjiu Wang // Journal of Petroleum Science and Engineering. – June 2021. – V. 201. – 108395.
11. Effects of vugs on resistivity of vuggy carbonate reservoirs / H.E. Jiahuan, Min Li, Keming Zhou, Yu Yang, Bing Xie, Nong Li, Lurui Dang, Yanbing Tang // Petroleum Exploration and Development. – June 2020. – V. 47. – № 3. – P. 527–535.
12. Ehrenberg S.N., Baek H. Deposition, diagenesis and reservoir quality of an Oligocene reefal-margin limestone succession: Asmari Formation, United Arab Emirates // Sedimentary Geology. – December 2019. – V. 393. – 105535 p.
13. Poon X., Ramkumar M., Nagarajan M., Mathew J. Episodic dolomitization of Paleozoic limestones in the Kinta Valley, Malaysia: implications on porosity evolution and reservoir properties // Energy Geoscience. – October 2021. – V. 2. – № 4. – P. 298–307.
14. Valencia F.L., Laya J.C. Deep-burial dissolution in an Oligocene-Miocene giant carbonate reservoir (Perla Limestone), Gulf of Venezuela Basin: implications on microporosity development // Marine and Petroleum Geology. – March 2020. – V. 113. – 104144 p.
15. Main controlling factors and distribution of high-quality deep dolomite reservoirs in typical cratonic basins in China / Z. Jianyong, N. Xinfeng, W. Xingning, L. Wenzheng, H. Yi, C. Yanna, L. Xueju, G. Mingfeng, T. Han, Z. Mao // Journal of Natural Gas Geoscience. – April 2018. – V. 3. – № 2. – P. 81–93.
16. Новые подходы к изучению нефтегазового потенциала доюрских отложений Западно-Сибирской нефтегазовой провинции / В.В. Хараханов, Н.М. Кулишкин, С.И. Шлёнкин, А.В. Олюнин // Геология нефти и газа. – 2015. – № 6. – С. 63–77.
17. Ежова А.В., Меркулов В.П., Чеканцев В.А. Геологическая модель строения палеозойского фундамента Северо-Останинского нефтяного месторождения (Томская область // Горный журнал. – 2012. – № 4. – С. 35–39.
18. Макаренко С.Н., Савина Н.И. Новые материалы по стратиграфии девона центральной части Нюрольской впадины // Региональная стратиграфия позднего докембрия и палеозоя Сибири: сборник научных трудов. – Новосибирск, 2013. – С. 124–132.
19. Способ поиска залежей нефти в породах фундамента: пат. Рос. Федерация № 2507547, заявл. 14.0.2011; опубл. 20.09.2012. Бюл. № 26.
20. Терентьев С.Э., Богданов Б.П. Особенности определения насыщения зон поглощения промывочной жидкости в карбонатных постройках Тимано-Печёрской провинции // Нефтегазовое дело. – 2013. – № 2. – С. 123–148.
21. Новиков Д.А. Характеристика равновесий в системе вода–газ на примере палеозойских отложений юго-восточных районов Западной Сибири // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2008. – № 5. – С. 84–89.

Поступила: 29.12.2021 г.

Информация об авторах

Белозёров В.Б., доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геологии, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Силкин Г.Е., директор Филиала ООО «ГеоПрайм»-«Томская геофизическая компания».

UDC 550.53

CRITERIA FOR REASSESSMENT OF OIL AND GAS POTENTIAL OF RESERVOIR ZONES IN SOUTHEASTERN WESTERN SIBERIA BASEMENT

Vladimir B. Belozеров¹,
BelozеровVB@hw.tpu.ru

Gennady E. Silkin²,
gsilkin@geoprime.ru

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

² Branch of GeoPrime LLC – Tomsk Geophysical Company,
39, Frunze avenue, Tomsk, 634029, Russia.

Relevance. The Paleozoic formations of Western Siberia are the main object of hydrocarbon potential further increase of the considered territory. The geological structure complexity of the basement rocks, the unsatisfactory quality of drilling, casing and testing of wells caused low efficiency of oil prospecting in the Paleozoic sediments, where all the identified hydrocarbon deposits and accumulations were discovered concurrently with the exploration of the sedimentary cover objects. One of the promising directions for increasing the prospecting efficiency in basement rocks is related to the analysis of drilling features and test results of previously drilled wells, where we can distinguish the geological and technological factors. The geological factor considers the results of drilling and well testing from the position of a block, folded, layered model of the structure of a fractured-porous-cavernous reservoir zone allocated as part of the Paleozoic complex. The analyzed model evaluates the changing possibility of the compressible fluid (oil, gas) volume during drilling and well testing. During drilling, as a result of increased pressure at the bottomhole relative to the reservoir pressure in a productive formation with abnormally high reservoir properties, there is a decrease in the volume of hydrocarbon fluid, which leads to the absorption of drilling fluid, sometimes to a complete loss of circulation. This effect can be observed when drilling a well both in the contour of the reservoir and in the aquifer in the immediate vicinity of it. When well testing and decreasing pressure during its development, the expansion (relaxation) of previously compressed volumes of hydrocarbon fluid occurs. In the case of drilling a well in the water-oil zone, alternating water-oil and oil-water inflows are observed, and if the well is located in the water-bearing part of the reservoir, the spontaneous outflow or high flow rates at low dynamic levels of highly mineralized formation water with increased values of the gas factor relative to the limit saturation values are noted. The technological factor assesses the quality of the production casing cementing, which affects the final test results and, as a consequence, the assessment of the oil and gas potential of the analyzed well section. The systematization of the drilling and testing results allows us to determine the criteria for assessing the oil and gas potential of the studied wells and areas, in order to resume prospecting for the discovery of hydrocarbon deposits in the rocks of the pre-Jurassic complex.

The purpose of the research is to analyze the results of drilling and testing wells carried out in the basement rocks of the southeastern part of the West-Siberian Plate in order to identify oil-promising areas and resume prospecting operations in previously studied areas.

The object of the study is the Paleozoic basement sediments of the southeastern part of the West Siberian Plate, which are represented by rocks of different material composition, including carbonate varieties.

The authors have carried out the analysis of the results of drilling and testing wells in the Paleozoic complex, and determined the criteria of the obtained data for the possible resumption of oil prospecting in areas previously studied by deep drilling.

Key words:

Pre-Jurassic sedimentary complex, basement rocks, Pre-Jurassic sedimentary complex test results, drilling fluid absorption, formation water overflows.

REFERENCES

1. Kontorovich V., Kalinina L., Kalinin A., Soloviev M. Paleozoic of West Siberia – geological structure, oil and gas bearing, seismogeological models of oil and gas fields. *Conference Proceedings Geomodel*. Venue, September 2018. Vol. 2018, pp. 1–5.
2. Kontorovich V.A. Petroleum potential of reservoirs at the Paleozoic-Mesozoic boundary in West Siberia: seismogeological criteria (example of the Chuzik-Chizhapka regional oil-gas accumulation). *Russian Geology and Geophysics*, May 2007, vol. 48, no. 5, pp. 422–428.
3. Yolkin E.A., Kontorovich A.E., Bakharev N.K., Belyaev S.Yu., Varlamov A.I., Izokh N.G., Kanygin A.V., Kashtanov V.A., Kirda N.P., Kleis A.G., Kontorovich V.A., Krasnov V.I., Krinin V.A., Moiseev S.A., Obut O.T., Saraev S.V., Sennikov N.V., Tishchenko V.M. Paleozoic facies megazones in the basement of the West Siberian geosyncline. *Russian Geology and Geophysics*, June 2007, vol. 48, no. 6, pp. 491–504.
4. Ivanov K., Erokhin V., Ponomarev V., Pogromskaya O., Berzin S. Geological structure of the basement of western and eastern parts of the West-Siberian. *International journal of environmental & science education*, May 2016, vol. 11, no. 14, pp. 6409–6432.
5. Kontorovich V.A., Kalinina L.M., Kalinin A.Yu., Kanakova K.I., Solovev M.V. Seismogeological models of Paleozoic complexes and oil and gas prospective objects in the South-East of Western Siberia (Novosibirsk region). *Seismic exploration technologies*, 2017, no. 3, pp. 85–95. In Rus.
6. Kontorovich V.A., Kalinina L.M. Geological structure and oil and gas potential of the Paleozoic of Western Siberia, models of reference deposits. *Drilling and oil*, 2019, no. 11, pp. 40–47. In Rus.
7. Koveshnikov A.E. Oil and gas reservoirs in the Pre-Jurassic formations of the West Siberian geosyncline. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 319, no. 1, pp. 147–151. In Rus.
8. Zapivalov N.P. Metasomatic dolomitization and oil and gas content of carbonate rocks (nanoeffects of formation of secondary highly productive reservoirs). *Science and technological developments*, 2009, vol. 2, pp. 32–39. In Rus.
9. Stupakova A.V., Sokolov A.V., Soboleva E.V., Kiryuhina T.A., Kurasov I.A., Bordyug E.V. Geological study and oil and gas potential of Paleozoic deposits of Western Siberia. *Geo resource*, 2015, no. 2 (61), pp. 63–76. In Rus.
10. Hangyu Liu, Kaibo Sh, Bo Liu, Xinmin Song, Liben Deng, Rui Guo, Zhongyuan Tian, Yong Li, Ya Deng, Genjiu Wang. The

- characteristics and origins of thief zones in the Cretaceous limestone reservoirs of Central and southern Mesopotamian Basin. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, June 2021, vol. 201, 108395 p.
11. Jiahuan H.E., Min Li, Keming Zhou, Yu Yang, Bing Xie, Nong Li, Lurui Dang, Yanbing Tang. Effects of vugs on resistivity of vuggy carbonate reservoirs. *Petroleum Exploration and Development*, June 2020, vol. 47, no. 3, pp. 527–535.
 12. Ehrenberg S.N., Baek H. Deposition, diagenesis and reservoir quality of an Oligocene reefal-margin limestone succession: Asmari Formation, United Arab Emirates. *Sedimentary Geology*, December 2019, vol. 393, 105535 p.
 13. Poon X., Ramkumar M., Nagarajan M., Mathew J. Episodic dolomitization of Paleozoic limestones in the Kinta Valley, Malaysia: implications on porosity evolution and reservoir properties. *Energy Geoscience*, October 2021, vol. 2, no. 4, pp. 298–307.
 14. Valencia F.L., Laya J.C. Deep-burial dissolution in an Oligocene-Miocene giant carbonate reservoir (Perla Limestone), Gulf of Venezuela Basin: implications on microporosity development. *Marine and Petroleum Geology*, March 2020, vol. 113, 104144 p.
 15. Jianyong Z., Xinfeng N., Xingning W., Wenzheng L., Yi H., Yan-na C., Xueju L., Mingfeng G., Han T., Mao Z. Main controlling factors and distribution of high-quality deep dolomite reservoirs in typical cratonic basins in China. *Journal of Natural Gas Geoscience*, April 2018, vol. 3, no. 2, pp. 81–93.
 16. Harahanov V.V., Kulishkin N.M., Shlenkin S.I., Olyunin A.V. New approaches to the study of the oil and gas potential of the Pre-Jurassic deposits of the West Siberian Oil and gas Province. *Geology of Oil and Gas*, 2015, no. 6, pp. 63–77. In Rus.
 17. Ezhova A.V., Merkulov V.P., Chekantsev V.A. Geological model of the structure of the Paleozoic basement of the Severo-Ostaninsky oil field (Tomsk region). *Mining Magazine*, 2012, no. 4, pp. 35–39. In Rus.
 18. Makarenko S.N., Savina N.I. Novye materialy po stratigrafii devona tsentralnoy chasti Nyurolskoy vpadiny [New materials on the Devonian stratigraphy of the central part of the Nyrol Depression]. *Regionalnaya stratigrafiya pozdnego dokembriya i paleozoya Sibiri: sbornik nauchnih trudov* [Regional stratigraphy of the Late Precambrian and Paleozoic of Siberia: collection of scientific papers]. Novosibirsk, 2013. pp. 124–132.
 19. Sahipov D.M., Sahipov E.M. *Sposob poiska zalezhey nefii v porodakh fundamenta* [Method of searching for oil deposits in the foundation rocks]. Patent RF no. 2507547, 2012.
 20. Terentev S.E., Bogdanov B.P. Features of determining the saturation of the absorption zones of the washing liquid in the carbonate buildings of the Timan-Pechersk province. *Oil and gas business*, 2013, no. 2, pp. 123–148. In Rus.
 21. Novikov D.A. Characteristics of equilibria in the water–gas system on the example of Paleozoic sediments of the southeastern regions of Western Siberia. *Interexpo Geo-Siberia*, 2008, no. 5, pp. 84–89.

Received: 29 December 2021.

Information about the authors

Vladimir B. Belozеров, Dr. Sc., head of the Geology Laboratory, National Research Tomsk Polytechnic University.
Gennady E. Silkin, director, Branch of GeoPrime LLC – Tomsk Geophysical Company.

УДК 621.833.681

ВОЛНОВОЙ ТОРЦЕВОЙ КИНЕМАТИЧЕСКИЙ РЕДУКТОР ДЛЯ ПОРШНЕВЫХ НАСОСОВ ПРИ ДОБЫЧЕ ТЯЖЕЛОЙ НЕФТИ

Джасем Мохамад Али^{1,2},
jasemma@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, г. Дейр-эз-Зор, ул. Университетская, 7.

Актуальность работы обусловлена необходимостью обеспечения работоспособности редукторов для поршневых насосов в суровых условиях эксплуатации при добыче высоковязкой нефти из малодебитных нефтяных скважин. Возможность повышения нагрузочной способности обычного эвольвентного зацепления за счет его рациональной геометрии, применения качественных материалов и термообработки не безграничны. Поэтому проблема создания новых видов механических передач и систем зацеплений является особо актуальной.

Цель: определить зависимость продолжительности сопряжения зубьев от рабочего профиля зуба волнового торцевого кинематического редуктора за один цикл прецессии φ .

Объекты: волновой торцевой кинематический редуктор как составная часть поршневых скважинных насосов в суровых условиях эксплуатации для добычи высоковязкой нефти из малодебитных скважин.

Методы: методы матричной и векторной алгебры, численные методы решения систем нелинейных уравнений, теория механизмов и машин и основная теория пространственных передач зацеплением.

Результаты. Рассмотрена проблема создания волнового торцевого кинематического редуктора с многопарным зацеплением. Синтез многопарного зацепления для волнового торцевого кинематического редуктора, обеспечивающего постоянство передаточной функции, предусматривает: разработку математической модели зацепления с учетом особенностей взаимодействия зубьев при пространственно-сферическом движении; описание профиля зубьев системой уравнений на сферическую поверхность и на нормальное сечение зубьев для внутреннего зацепления; выявление с помощью программы MathCAD 2010 Professional математического эксперимента и определение области существования 100%-го многопарного сопряжения зубьев путем сравнения формы их профиля с характером аналитической функции многопарного зацепления.

Ключевые слова:

Нефть, волновой торцевой кинематический редуктор, поршневой насос, передаточное отношение, многопарное зацепление, длина рабочего профиля.

Введение

Добыча тяжелой нефти – развивающаяся технология добычи тяжелой нефти в промышленных количествах. Расчетные резервы тяжелой нефти – более 6 трлн баррелей, в три раза больше обычных нефти и газа. Факторы, которые влияют на трудность вклада запасов в производство, включают проницаемость, пористость, глубину и давление. Плотность и вязкость нефти – основные факторы, которые определяют способ добычи тяжелой нефти [1, 2].

Центробежные насосы ограничено применяются в работе с высоковязкими жидкостями из-за фрикционных потерь внутри насоса, которые вызывают снижение скорости потока, поэтому при добыче высоковязкой нефти применяют поршневые насосы [3].

Одной из самых важных частей насосного оборудования является редуктор из-за его прямого воздействия на улучшение энергетических и массогабаритных показателей насосных агрегатов [4].

Анализ современных тенденций совершенствования систем зацеплений, числовой характеристики и требований потребителей к техническому уровню выпускаемых редукторов показал целесообразность

исследования и разработки волновых редукторов с новым видом многопарного зацепления [4, 5 и др.].

Многопарность зацепления обеспечивает повышение несущей способности редуктора в целом, улучшает энергетические и массогабаритные показатели, повышает кинематическую точность, снижает уровень напряжений в контакте и улучшает геометрические и гидродинамические условия смазки взаимодействующих зубьев и др. Поэтому применение волновых редукторов с многопарным зацеплением в силовых приводах машин является весьма эффективным [6].

Высокая кинематическая точность волновых редукторов с выпукло-вогнутым профилем зубьев, их компактность и широкий диапазон передаточных функций, а также возможность полного устранения зазоров в зацеплении и даже создание некоторого преднапряжения делают выгодным их применение в механизмах, используемых в добывающей промышленности, исполнительных приводах промышленных роботов и манипуляторов, в металлорежущих станках, и других механизмах, требующих высокой точности позиционирования рабочих органов [7, 8].

Специфика пространственно-сферического движения шестерни волнового торцевого кинематиче-

ского редуктора позволяет решать одну из основных проблем герметизации – передавать движение в абсолютно герметизированное пространство через сплошную непроницаемую стенку, что открывает широкие перспективы его применения в вакуумной технике, нефтехимической и атомной промышленности, космической и авиационной областях [9, 10].

Рассматривается кинематика взаимодействия зубьев и особенности преобразования движения, излагаются требования и условия существования многопарного зацепления, даются рекомендации по выбору профиля зубьев и его параметров [11, 12]. Это позволит конструкторам правильно подобрать параметры зацепления в зависимости от конкретного назначения проектируемого редуктора [13].

На рис. 1 представлена принципиальная схема волнового торцевого кинематического редуктора, состоящего из пяти элементов: входного вала (генератора волн) – 1, выполненного в виде кривошипного валика, блока шестерен – 3, состоящей из двух конических колес внутреннего зацепления, которые свободно вращаются на входном валу, неподвижного конического колеса – 2 с наружным зацеплением и подвижного конического колеса – 4, жестко связанного с выходным валом – 5. Левый зубчатый конический венец (z_2) блока шестерен – 3 находится в зацеплении с неподвижным коническим колесом – 2, а правый зубчатый конический венец (z_3) – с подвижным коническим колесом – 4 [14].

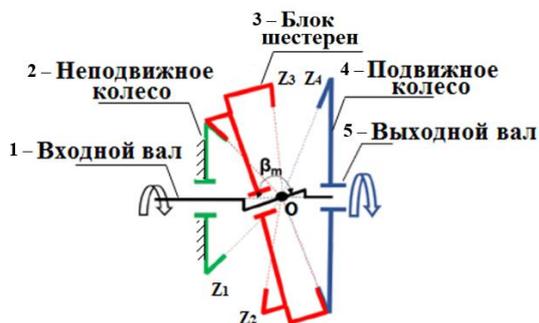


Рис. 1. Структурная схема волнового торцевого кинематического редуктора

Fig. 1. Structural scheme of the wave face kinematic reducer

Количество зубьев неподвижного колеса и зубьев сопряженного с ним блока шестерен равны ($z_1=z_2\pm 1$), а число зубьев (z_3) блока шестерен – 3 и подвижного колеса – 4 (z_4) совпадает. В рассматриваемом редукторе делительные конусы неподвижного колеса – 2, блока шестерен – 3 и подвижного колеса – 4 имеют общую вершину, расположенную в точке O и лежащую на оси редуктора [15].

При вращении входного вала – 1 блок шестерен – 3 совершает сферическое движение относительно точки O посредством обкатывания зубьями венца z_2 зубья z_1 неподвижного колеса – 2; одновременно входят в зацепление и зубья венца z_3 с зубьями колеса z_4 . Благодаря этому блок шестерен – 3 передает вращение зубчатому колесу – 4, жестко соединенному с выходным валом – 5 [16].

Как известно [17, 18], тело, которое совершает сферическое движение, имеет три степени свободы. Следовательно, положение такого тела может быть определено тремя параметрами относительно неподвижной системы координат $OXYZ$. В теоретической механике [18], как правило, положение тела, совершающего сферическое движение, определяют при помощи углов Эйлера. Для этого свяжем жестко систему координат $OX_1Y_1Z_1$ с шестерней (рис. 2).

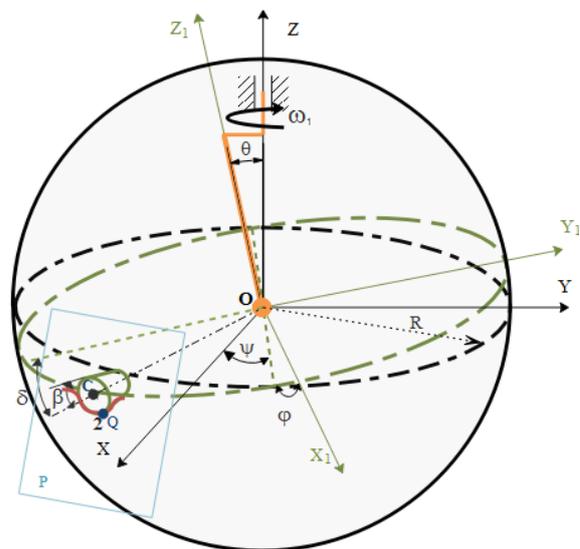


Рис. 2. Описание сферического движения шестерни волнового торцевого кинематического редуктора

Fig. 2. Description of the spherical movement of the gear of the wave face kinematic reducer

Применительно к волновому торцевому кинематическому редуктору угол ψ – это угол прецессии (угол поворота ведущего вала), угол θ – угол нутации (угол наклона кривошипного участка ведущего вала к оси ведомого вала), ϕ – угол собственного вращения шестерни вокруг собственной геометрической оси.

Отношение между углом прецессии ψ и углом собственного вращения ϕ определяется формулой:

$$\phi = -\frac{Z_1}{Z_2} \psi,$$

где Z_1, Z_2 – числа зубьев сопряженных колес.

Точка C движется по сферической поверхности радиуса R с центром прецессии в точке O (рис. 2). Зная траекторию движения центра зуба, находим положение точки его контакта с зубом колеса, совокупность семейства которых за цикл прецессии представляет собой профиль зубьев этого колеса. Положение точки C определяется координатами (1)

$$X_C = R \cos \delta \begin{pmatrix} -\cos \psi \left(\frac{Z_1}{Z_2} \psi \right) + \\ + \sin \psi \cos \left(\frac{Z_1}{Z_2} \psi \right) \cos \theta \end{pmatrix} - R \sin \delta \sin \psi \sin \theta;$$

$$Y_C = -R \cos \delta \left[\begin{array}{l} \left(\sin \psi \left(\frac{Z_1}{Z_2} \psi \right) + \right. \\ \left. + \cos \psi \cos \left(\frac{Z_1}{Z_2} \psi \right) \cos \theta \right) \\ - R \sin \delta \cos \psi \sin \theta; \end{array} \right] -$$

$$Z_C = -R \cos \delta \cos \left(\frac{Z_1}{Z_2} \psi \right) \sin \theta - R \sin \delta \cos \theta. \quad (1)$$

Определяем координаты точки контакта зубьев Q , совокупность которых представляет собой профиль зубьев входного колеса на сфере по формулам (2)–(4).

$$X_Q = \frac{R^2 \cos \beta - (k_1 Z_Q - d_Q) Y_C - Z_Q Z_C}{X_C} =$$

$$= \frac{(k_1 Y_C + Z_C) Z_Q + (R^2 \cos \beta + d_1 Y_C)}{X_C} \Rightarrow$$

$$X_Q = k_2 Z_Q - d_2, \quad (2)$$

где введены обозначения

$$k_2 = \frac{(k_1 Y_C + Z_C)}{X_C}; \quad d_2 = \frac{(R^2 \cos \beta + d_1 Y_C)}{X_C}.$$

$$Y_Q = \frac{[X_C (X_C \cdot v_{C_x} + Y_C \cdot v_{C_y}) + Z_C^2 \cdot v_{C_x}]}{(X_C \cdot v_{C_y} - Y_C \cdot v_{C_x}) Z_C} Z_Q -$$

$$- \frac{R^2 \cos \beta \cdot v_{C_x}}{(X_C \cdot v_{C_y} - Y_C \cdot v_{C_x})} \Rightarrow Y_Q = k_1 Z_Q - d_1, \quad (3)$$

где введены обозначения

$$k_1 = \frac{[X_C (X_C \cdot v_{C_x} + Y_C \cdot v_{C_y}) + Z_C^2 \cdot v_{C_x}]}{(X_C \cdot v_{C_y} - Y_C \cdot v_{C_x}) Z_C};$$

$$d_1 = \frac{R^2 \cos \beta \cdot v_{C_x}}{(X_C \cdot v_{C_y} - Y_C \cdot v_{C_x})}.$$

$$Z_Q = \frac{(k_1 d_1 - k_2 d_2)}{k_1^2 + k_2^2 + 1} -$$

$$\frac{\sqrt{(k_1 d_1 - k_2 d_2)^2 + (k_1^2 + k_2^2 + 1)(R^2 - d_1^2 - d_2^2)}}{k_1^2 + k_2^2 + 1}. \quad (4)$$

Чтобы представить профиль зубьев колес в нормальном сечении, мы спроектируем со сферы на плоскость P_1 , перпендикулярную зубу (рис. 2).

Для этого сначала определяем координаты точек Q_1 и Q_2 (рис. 2), соответствующие двум последовательным минимумам кривой профиля на сфере.

Выберем в плоскости P_1 систему координат $Q_1 \tau \lambda$, ось $Q_1 \tau$ которой проходит через точку Q_2 .

Проекцию профиля зубьев со сферы на плоскости P_1 находим путем определения координат точек Q_N пересечения с этой плоскостью семейства прямых, проходящих через центр прецессии O , и соответствующих точек профиля зубьев на сфере.

И после ряда преобразований получаем проекцию на плоскость профиля зубьев колеса, определяемую

декартовыми координатами, через которые перейдем от координат X_N, Y_N, Z_N к координатам τ, λ :

$$\tau = \frac{[(Q_1 Q_2)^2 + (Q_1 Q_N)^2 - (Q_2 Q_N)^2]}{2(Q_1 Q_1)};$$

$$\lambda = \sqrt{(Q_1 Q_N)^2 - \tau^2}. \quad (5)$$

Теперь находим параметрические уравнения кривой, которую описывает ось зуба шестерни на плоскости P_1 , т. е. переход от координат X_G, Y_G, Z_G к координатам τ_1, λ_1 осуществляем согласно формулам (6)

$$\tau_1 = \frac{[(Q_1 Q_2)^2 + (Q_1 Q_G)^2 - (Q_2 Q_G)^2]}{2(Q_1 Q_1)};$$

$$\lambda_1 = \sqrt{(Q_1 Q_G)^2 - \tau_1^2}. \quad (6)$$

Зависимость λ_1 от τ_1 представляет собой траекторию движения центра зуба шестерни на плоскости P_1 .

Зависимость $\lambda=f(\tau)$ представляет собой огибающую кривую множества дуг окружностей радиусом R , центры которых расположены на траектории движения точки C , описываемой уравнением $\lambda_1=f(\tau_1)$.

Результаты экспериментов. Графическое построение функций $\lambda=f(\tau)$ и $\lambda_1=f(\tau_1)$ осуществлялось в совмещенных координатах $\lambda_1 \lambda - \tau_1 \tau$ при значениях угла прецессии $0 \leq \psi \leq 2\pi$, т. е. при одном обороте ведущего вала. При этих значениях ψ уравнениями (5) описывается профиль одного зуба колеса.

В программе MathCAD 2010 Professional был создан широкий спектр модифицированных профилей зубов с различными геометрическими параметрами (рис. 3, а, б).

О многопарности зацепления можно судить по графикам функций $\lambda_1 = f(\tau_1)$ и $\lambda = f(\tau)$ (рис. 3, а), представляющих соответственно проекцию траектории движения центра C зуба шестерни и профиля зуба колеса на плоскости P_1 (рис. 2). Каждому значению функции $\lambda_1 = f(\tau_1)$ соответствует определенная точка на графике функции $\lambda = f(\tau)$, являющаяся точкой контакта взаимодействующих зубьев. Положение любой точки контакта на графике $\lambda = f(\tau)$ определяется углом прецессии ψ .

Исходные условия получения функции $\lambda = f(\tau)$ обеспечивают следующее взаимодействие зубьев: зуб шестерни с центром, расположенным в точке C , контактирует с профилем зуба колеса в точке Q .

При этом множество окружностей (рис. 3, а) с центрами, которые расположены на участках $\dot{Q}_1 \dot{A}, \dot{A} \dot{B}, \dot{B} \dot{D}$ и $\dot{D} \dot{Q}_2$ траектории движения центра C зуба, огибается кривыми $Q_1 A, AB, BD$ и DQ_2 . Видно, что кривые $Q_1 A$ и $Q_2 D$ пересекаются в точке Q_N . Это доказывает, что взаимодействие зубьев блока шестерен и колеса по ломаной кривой $Q_1 Q_N Q_2$ представляет собой профиль зуба колеса. На участке $Q_N ABD Q_N$ взаимодействие зубьев отсутствует [19]. По размерам фигуры $Q_N ABD Q_N$ можно судить о многопарности зацепления, так как продолжительность взаимодействия зубьев определяет многопарность зацепления, т.

е. размер фигуры $Q_N ABDQ_N$ – это периметр, который характеризует продолжительность отсутствия контакта. Чем больше размеры этой фигуры, тем меньше многопарность зацепления, и на оборот. При отсут-

ствии этой фигуры многопарность зацепления составляет $\varepsilon = 100\%$, так как зубья взаимодействуют между собой непрерывно (рис. 3, б).

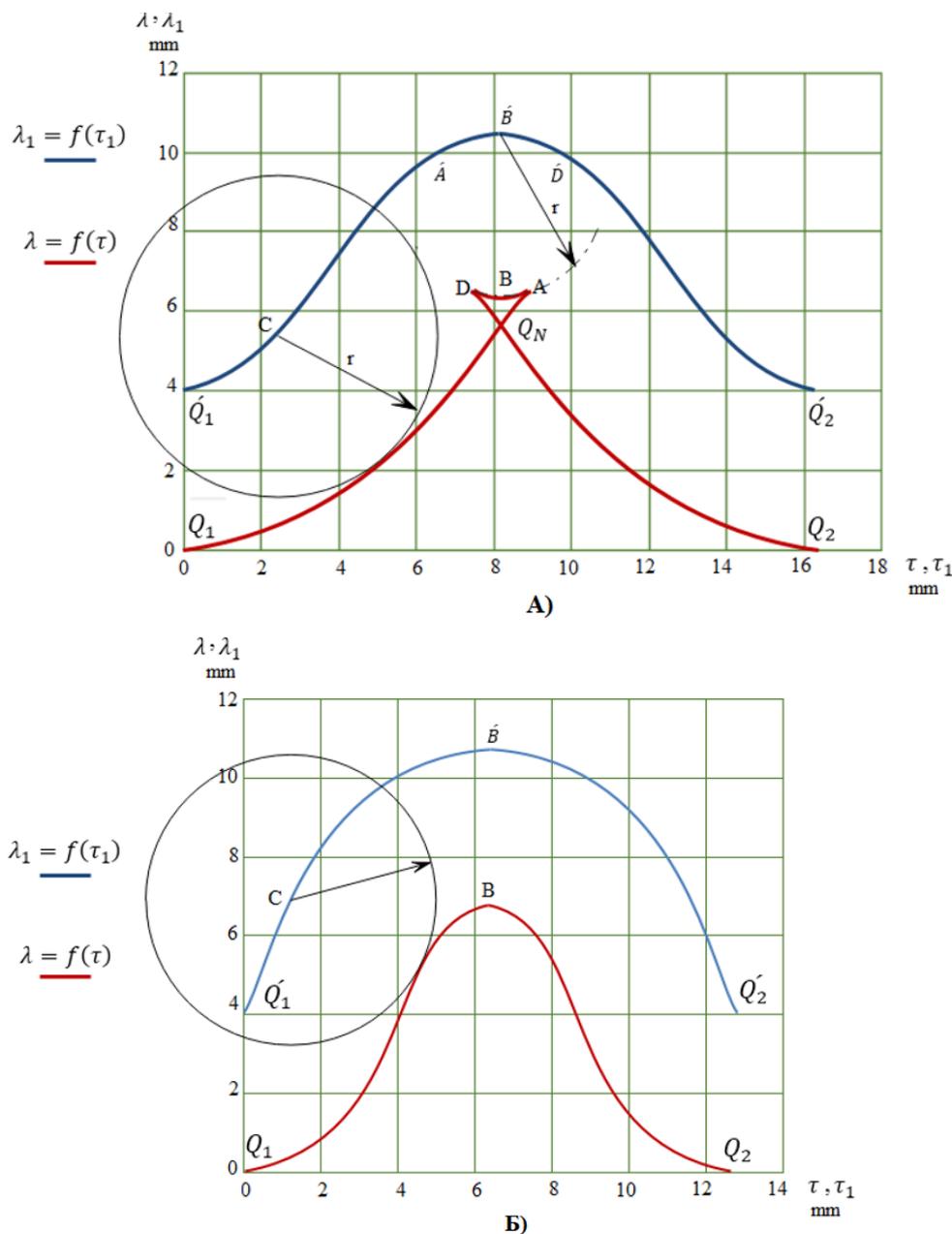


Рис. 3. Взаимодействие зубьев за один прецессионный цикл при многопарности зацепления при: А) $Z_1=29, Z_2=30, D=150 \text{ mm}, r=4 \text{ mm}, \theta=2,5^\circ, \delta=0^\circ, \varepsilon<100\%$; Б) $Z_1=29, Z_2=30, D=150 \text{ mm}, r=4 \text{ mm}, \theta=2,5^\circ, \delta=30^\circ, \varepsilon<100\%$

Fig. 3. Teeth interaction for one precession cycle at a multiple-tooth contact at: А) $Z_1=29, Z_2=30, D=150 \text{ mm}, r=4 \text{ mm}, \theta=2,5^\circ, \delta=0^\circ, \varepsilon<100\%$; Б) $Z_1=29, Z_2=30, D=150 \text{ mm}, r=4 \text{ mm}, \theta=2,5^\circ, \delta=30^\circ, \varepsilon<100\%$

Многопарность зацепления волнового торцевого кинематического редуктора определяется продолжительностью сопряжения зубьев за один цикл прецессии $0 < \varphi < \frac{Z_1 \psi}{Z_2}$ [20, 21]. Из рис. 3, а видно, что продолжительность сопряжения зубьев зависит от формы их рабочего профиля [22].

Для определения рабочего профиля зуба $Q_1 Q_n$ (рис. 3) на MathCAD 2010 Professional исследована

зависимость $\tau = \tau(\varphi)$ в интервале $0 < \varphi < \frac{Z_1 \psi}{Z_2}$, т. е. за один цикл.

Поскольку продолжительность контакта зубьев, а следовательно, и многопарность зацепления зависят от формы профиля зубьев [23], для исследования были приняты функции $\tau = \tau(\varphi)$ характерных профилей: а) с наличием у вершины фигуры $Q_N ABDQ_N$ заострения (рис. 3, А), б) с закругленной вершиной (рис. 3, Б).

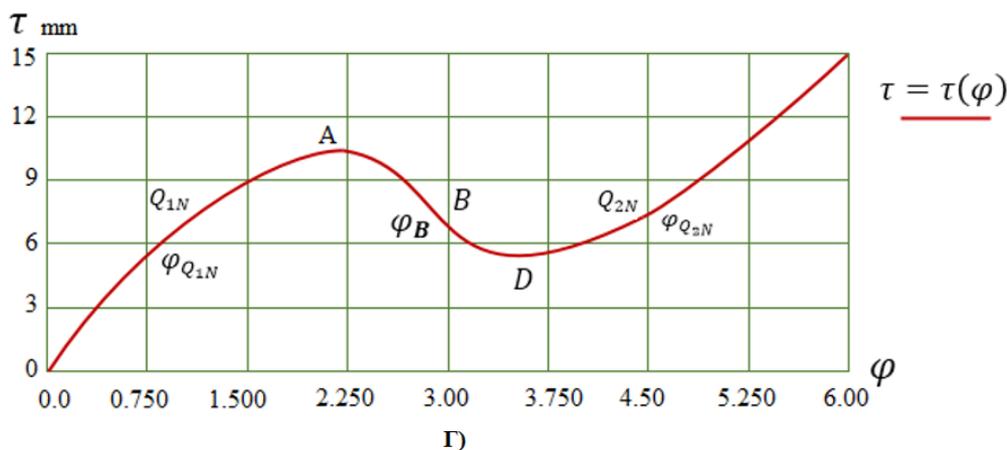
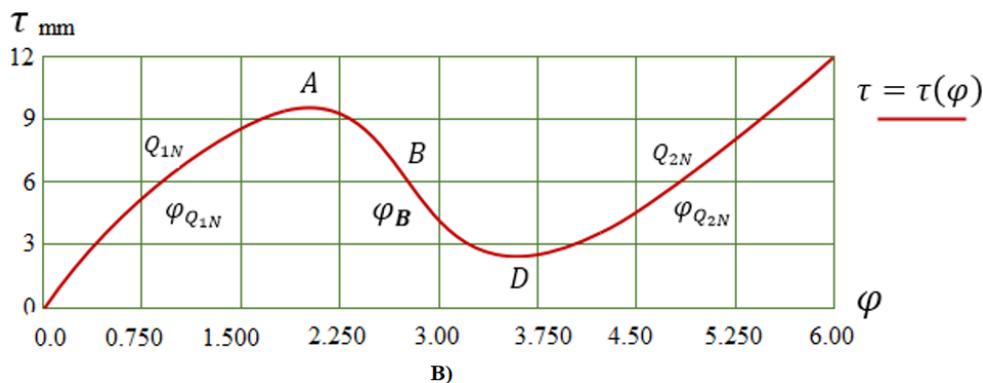
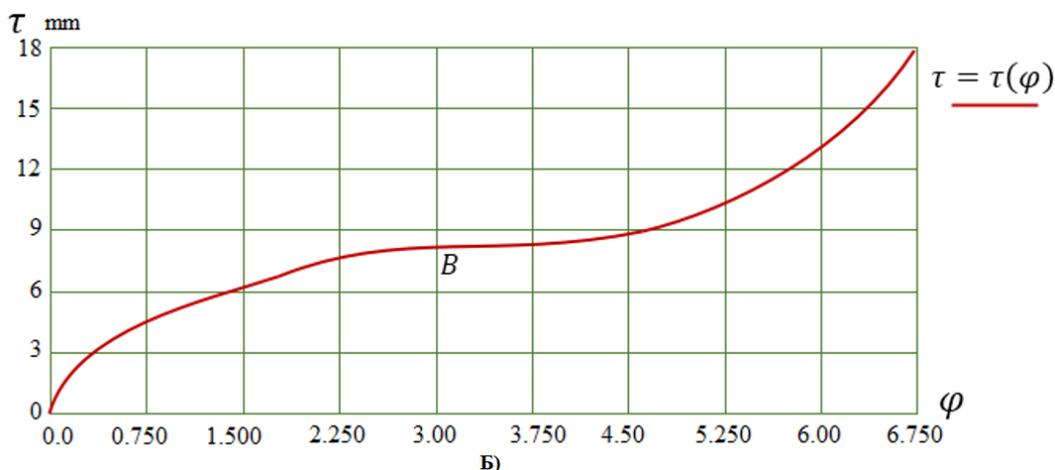
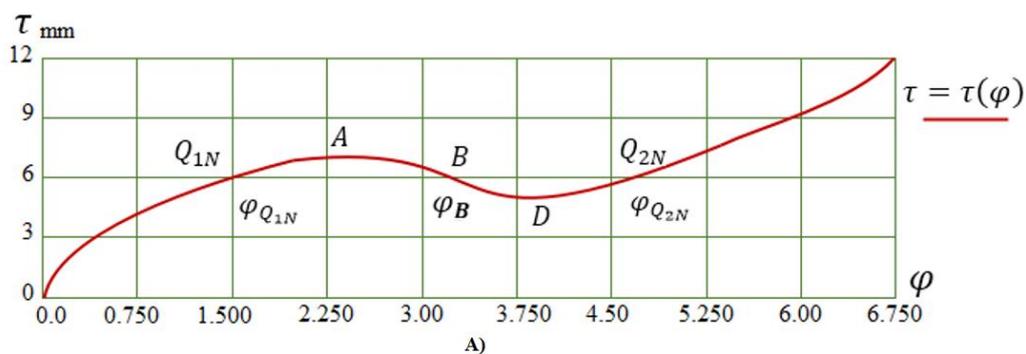


Рис. 4. Определение многопарности зацепления при: А) $Z_1=29, Z_2=30, D=150 \text{ mm}, r=4 \text{ mm}, \theta=2,5^\circ, \delta=0^\circ$; Б) $Z_1=29, Z_2=30, D=150 \text{ mm}, r=4 \text{ mm}, \theta=2,5^\circ, \delta=30^\circ$; В) $Z_1=29, Z_2=30, D=150 \text{ mm}, r=4 \text{ mm}, \theta=2,5^\circ, \delta=22,5^\circ$; Г) $Z_1=22, Z_2=21, D=150 \text{ mm}, r=4 \text{ mm}, \theta=2,5^\circ, \delta=22,5^\circ$

Fig. 4. Definition of multiple-tooth contact at: А) $Z_1=29, Z_2=30, D=150 \text{ mm}, r=4 \text{ mm}, \theta=2,5^\circ, \delta=0^\circ$; Б) $Z_1=29, Z_2=30, D=150 \text{ mm}, r=4 \text{ mm}, \theta=2,5^\circ, \delta=30^\circ$; В) $Z_1=29, Z_2=30, D=150 \text{ mm}, r=4 \text{ mm}, \theta=2,5^\circ, \delta=22,5^\circ$; Г) $Z_1=22, Z_2=21, D=150 \text{ mm}, r=4 \text{ mm}, \theta=2,5^\circ, \delta=22,5^\circ$

Анализ функции $\tau = \tau(\varphi)$ показывает также, что уравнение

$$\tau \left[\left(\frac{z_2}{z_1} \right) \psi - \tau \left(\frac{z_2}{z_1} \right) \pi \right] = 0, \quad (7)$$

определяющее продолжительность рабочего профиля, имеет три корня:

$$\varphi_{Q_{1N}}, \varphi = \left(\frac{z_2}{z_1} \right) \pi \text{ и } \varphi_{Q_{2N}}.$$

Рабочий профиль зубьев существует на участке Q_{Q_n} графика функции $\tau = \tau(\varphi)$, т. е. при $0 < \varphi < \varphi_{Q_{1N}}$ определяется из условия

$$\tau(\varphi) - \tau \left[\left(\frac{z_2}{z_1} \right) \pi \right] < 0. \quad (8)$$

Исходя из вышеизложенного, многопарность зацепления (в %) определяется по формуле

$$\varepsilon = \frac{\varphi_{Q_{1N}}}{\varphi_B} 100 \%, \quad (9)$$

где $\varphi_{Q_{1N}}$ – наименьший корень уравнения (7).

По формулам (7)–(9) была составлена зависимость $\tau = \tau(\varphi)$ в программе MathCAD 2010 Professional за один цикл.

Из рис. 4, а, в, г видно, что функция $\tau = \tau(\varphi)$ имеет два экстремума – А и D, соответствующие точкам А и D функции $\lambda = f(\tau)$, а функция на рис. 4, б непрерывно

растет. Непрерывный рост функции $\tau = \tau(\varphi)$ свидетельствует о том, что многопарность зацепления $\varepsilon = 100 \%$, а наличие экстремумов – о прерывистом контакте зубьев, т. е. многопарность $\varepsilon < 100 \%$.

Заключение

Таким образом, разработан волновой торцевой кинематический редуктор с многопарным зацеплением для поршневых насосов, пользующихся при добыче высоковязкой нефти. Чтобы обеспечить многопарное зацепление, необходимо учитывать влияние каждого из параметров – δ , θ и Z – на форму рабочего профиля зуба. При изменении одного из этих параметров рабочий профиль зуба меняется, следовательно, меняется продолжительность сопряжения зубьев за один цикл прецессии [9, 24].

Установлено, что продолжительность взаимодействия зубьев определяет многопарность зацепления, о которой можно судить по размерам фигуры $Q_N ABD Q_N$, периметр которой характеризует продолжительность отсутствия контакта [19, 25]. Чем больше размеры этой фигуры, тем меньше многопарность зацепления, и наоборот. При отсутствии этой фигуры многопарность зацепления составляет $\varepsilon=100 \%$, т. е. зубья взаимодействуют между собой непрерывно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Speight J.G. Heavy oil recovery and upgrading. – Oxford: Gulf Professional Publishing, 2019. – 839 p.
2. Simanzhenkov V., Raphael I. Crude oil chemistry. – Florida: Crc Press, 2003. – 402 p.
3. Corvaglia A., Massimo R. Comparison of 0D and 3D hydraulic models for axial piston pumps // Energy procedia. – 2018. – V. 148. – P. 114–121.
4. Litvin F.L., Fuentes A. Gear geometry and applied theory. 2nd ed. – New York: Cambridge University Press, 2004. – 800 p.
5. Vullo V. Gears. V. 1: Geometric and Kinematic Design. – Cham: Springer International Publishing A&G, 2020. – V. 1. – 844 p.
6. 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.
7. 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.
8. Batsch M. Mathematical model and tooth contact analysis of convex-concave helical bevel Novikov gear mesh // Mechanism and Machine Theory. – 2020. – V. 149. – P. 103842.1–103842.18.
9. 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.
10. Saribay Z.B., Bill R.C. Design analysis of Pericyclic Mechanical Transmission system // Mechanism and Machine Theory. – 2013. – V. 61. – P. 102–122.
11. Mathematical modeling and simulation of the external and internal double circular-arc spiral bevel gears for the nutation drive / L. Yao, B. Gu, S. Haung, G. Wei, J.S. Dai // Journal of Mechanical Design. – 2010. – V. 132 (2). – P. 021008.1–021008.10.
12. 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.
13. Influence analysis of system parameters on characteristics of the nutation drive with double circular arc spiral bevel gears / Y. Cai, L. Yao, Z. Xie, J. Zhang, C. Peng // Forschung Im Ingenieurwesen. – 2017. – V. 81 (2). – P. 125–133.
14. 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. – V. 11. – № 5-SI. – P. 137–141.
15. Jasem M.A., Krauinsh P.Y. Kinematical analysis of the nutation speed reducer // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing. – 2019. – P. 012022.
16. Джасем М.А., Крауинш П.Я. Математическая модель зацепления и аналитическое описание профиля зубьев волнового торцевого кинематического редуктора // Омский научный вестник. – 2021. – № 1 (175). – С. 22–31.
17. Айрапетов Э.Л. Совершенствование методов расчета нагруженности и прочности передач зацеплением // Техника машиностроения. – 2001. – № 2. – С. 8–34.
18. Журавлев В.Ф. Основы теоретической механики. 2-е изд. – М.: Физматлит, 2001. – 320 с.
19. Шевелева Г.И., Волков А.Э., Медведев В.И. Программное обеспечение производства конических и гипоидных зубчатых передач с круговыми зубьями // Техника машиностроения. – 2001. – № 2 (30). – С. 40–51.
20. Гольдфарб В.И., Исакова Н.В. Варианты спироидных передач с точки зрения реализации винтового параметра // Передачи и трансмиссии. – 1995. – № 1. – С. 25–34.
21. Лагутин С.А. Синтез пространственных зацеплений методом винтов // Передачи и трансмиссии. – 1999. – № 2. – С. 59–70.
22. Колесников В.К., Котликова В.Я. О технологическом синтезе пространственных зубчатых передач с локализованным контактом // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1993. – № 1. – С. 86–91.
23. Журавлев Г.А. Оценка применимости решения Герца в задачах о контакте зубьев колес // Техника машиностроения. – 2001. – № 2. – С. 82–90.
24. Волков А.Э., Шевелева Г.И. Компьютерный анализ работы конических и гипоидных зубчатых передач // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2001. – № 5. – С. 96–103.
25. Мазуру С. Оценка точности обработки зубьев зубчатых колес с нестандартным профилем // Сборник трудов XV МНТК «Машиностроение и техносфера XXI века». – Севастополь: Изд-во ЧП «Технополис», 2008. – Т. 2. – 326 с.

Поступила 19.01.2022 г.

Информация об авторах

Джасем М.А., аспирант отделения материаловедения Инженерной школы новых производственных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета; ассистент кафедры механического проектирования и производства 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

WAVE FACE KINEMATIC REDUCER FOR PISTON PUMPS DURING EXTRACTION OF HEAVY OIL

Mohamad A. Jašem^{1,2},
jasma@tpu.ru

Peter Ya. Kraušinš¹,
peterkrauš@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 the efficiency of gear reducers for piston pumps in the harsh operating conditions for high-viscosity oil extraction from low production wells. The possibility of increasing the load capacity of the usual involute engagement due to its rational geometry, the use of high-quality materials and heat treatment is not limitless. Therefore, the problem of creating new types of mechanical gears and engagement systems is particularly relevant.

The main aim of the research is to determine the dependence of the duration of mating teeth on the working tooth profile of the wave face kinematic reducer for one cycle of precession φ .

Objects: the wave face kinematic reducer as a part of piston pumps in the harsh operating conditions during the extraction of high-viscosity oil from low production wells.

Methods: methods of matrix and vector algebra, numerical techniques of the nonlinear equations, theory of mechanisms and machines, the main theory of spatial gear.

Results. The paper considers the problem of creating a wave face kinematic reducer with multiple-tooth contact. The synthesis of multi-pair gearing for a wave face kinematic reducer, which ensures the constancy of transfer function, provides for: development of a mathematical model of gearing taking into account the peculiarities of the interaction of teeth during special-spherical motion; description of the profile of the teeth by a system of equations for a spherical surface and for a normal section of teeth for internal gearing; identification via MathCAD 2010 Professional program of a mathematical experiment and determination of the area of existence of 100 % multiple-tooth contact of teeth by comparing the shape of their profile with the nature of the analytical function of multiple-tooth contact.

Key words:

Crude oil, wave face kinematic reducer, piston pump, gear ratio, multiple-tooth contact, working profile length.

REFERENCES

- Speight J.G. *Heavy oil recovery and upgrading*. Oxford, Gulf Professional Publishing, 2019. 839 p.
- Simanzhenkov V., Raphael I. *Crude oil chemistry*. Florida, Crc Press, 2003. 402 p.
- Corvaglia A., Massimo R. *Comparison of 0D and 3D hydraulic models for axial piston pumps*. Energy procedia, 2018, vol. 148, pp. 114–121.
- Litvin F.L., Fuentes A. *Gear geometry and applied theory*. 2nd ed. New York, Cambridge University Press, 2004. 800 p.
- Vullo V. *Gears: Vol. 1: Geometric and Kinematic Design*. Cham, Springer International Publishing A&G, 2020. vol. 1. 844 p.
- 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.
- 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.
- Batsch M. Mathematical model and tooth contact analysis of convexo-concave helical bevel Novikov gear mesh. *Mechanism and Machine Theory*, 2020, vol. 149:103842, pp. 103842.1–103842.18.
- 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.
- Saribay Z.B., Bill R.C. Design analysis of Pericyclic Mechanical Transmission system. *Mechanism and Machine Theory*, 2013, vol. 61, pp. 102–122.
- Yao L., Gu B., Haung S., Wei G., Dai J.S. Mathematical modeling and simulation of the external and internal double circular-arc spiral bevel gears for the nutation drive. *Journal of Mechanical Design*, 2010, vol. 132 (2), pp. 021008.1 – 021008.10.
- Lin Z., Yao L., Zhang J., Su T., Chen K. Tooth contact analysis with latent error of double circular-arc spiral bevel gears for industrial robot joint nutation drive. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2020, vol. 42 (1), pp. 1–12.
- Cai Y., Yao L., Xie Z., Zhang J., Peng C. Influence analysis of system parameters on characteristics of the nutation drive with double circular arc spiral bevel gears. *Forschung Im Ingenieurwesen*, 2017, vol. 81 (2), pp. 125–133.
- Jašem M., Kraušinš 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.
- Jašem M.A., Kraušinš P.Y. Kinematical analysis of the nutation speed reducer. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2019, 012022 p.
- Jašem M.A., Kraušinš P.Ya. Matematicheskaya model zatspleniya i analiticheskoe opisanie profilya zubev volnovogo tortsevoogo kinematicheskogo reduktora [Mathematical model of the engagement and analytical description of the tooth profile of the wave face kinematic reducer]. *Omskiy nauchnyi vestnik*, 2021, no. 1 (175), pp. 22–31.
- Ayrapetov E.L. Improving methods for calculating loading and gearing strength. *Q: Engineering Engineering*, 2001, no. 2, pp. 8–34.
- Zhuravlev V. *Osnovy teoreticheskoy mekhaniki* [The auxiliary bases of theoretical mechanics]. 2nd ed. Moscow, Fizmatlit Publ., 2001. 320 p.
- Shevelev G.I., Volkov A.E., Medvedev V.I. Programmnoe obespechenie proizvodstva konicheskikh i gipoidnykh zubchatykh peredach s krugovymi zubyami [Software manufacturing conical and hypoid gears with circular teeth]. *Tekhnika mashinostroeniya*, 2001, no. 2 (30), pp. 40–51.
- Goldfarb V.I., Isakova N.V. Varianty spiroidnykh peredach s tochki zreniya realizatsii vintovogo parametra [Spiroid

- transmissions from the point of view of the screw parameter]. *Peredachi i transmissii*, 1995, no. 1, pp. 25–34.
21. Lagutin S.A. Sintez prostranstvennykh zatseplenyi metodom vintov [Synthesis of spatial clutches by screws]. *Peredachi i transmissii*, 1999, no. 2, pp. 59–70.
 22. Kolesnikov V.K., Kotlikova V.Ya. O tekhnologicheskoy sinteze prostranstvennykh zubchatykh peredach s lokalizovannym kontaktom [About the technological synthesis of spatial gears with localized contact]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 1993, no. 1, pp. 86–91.
 23. Zhuravlev G.A. Otsenka primenimosti resheniya Gertsya v zadachakh o kontakte zubev koles [Assessment of the applicability of the Hertz solution in the tasks of contact of the teeth of the wheels]. *Tekhnika mashinostroeniya*, 2001, no. 2, pp. 82–90.
 24. Volkov A.E., Sheveleva G.I. Kompyuternyy analiz raboty konicheskikh i gipoidnykh zubchatykh peredach [Computer analysis of the work of conical and hypoid gears]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2001, no. 5, pp. 96–103.
 25. Mazuru C. Otsenka tochnosti obrabotki zubev zubchatykh koles s nestandartnym profilyem [Evaluation of the precision processing of teeth gears with non-standard profile]. *Sbornik trudov XV MNTK. Mashinostroenie i tekhnosfera XXI veka* [Collection of works of the XV MNTK. Mechanical Engineering and Technosphere of the XXI century]. Sevastopol, PE «Technopolis» Publ., 2008. Vol. 2, 326 p.

Received: 19 January 2022.

Information about the authors

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

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

УДК 622.276.7

СНИЖЕНИЕ НЕГАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ НА ПРОДУКТИВНЫЕ ОБЪЕКТЫ СОРОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПУТЕМ ИХ МОДИФИКАЦИИ

Фоломеев Алексей Евгеньевич¹,
FolomeevAE@bniipi.rosneft.ru

Вахрушев Сергей Александрович¹,
VakhrushevSA@bniipi.rosneft.ru

Хатмуллин Арслан Рустемович¹,
KhatmullinAR@bniipi.rosneft.ru

Малинин Андрей Владимирович¹,
MalininAV@bniipi.rosneft.ru

Ленченкова Любовь Евгеньевна²,
lenchenkova@mail.ru

Туриянов Айдар Рафитович¹,
TuriyanovAR@bniipi.rosneft.ru

Давиденко Игорь Станиславович³,
DavidenkoIS@bashneft.ru

¹ ООО «РН-БашНИПИнефть»,
Россия, 450006, г. Уфа, ул. Ленина, 86/1.

² Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

³ ООО «Соровскнефть»,
Россия, 625002, г. Тюмень, ул. Орджоникидзе, 5.

Актуальность. Терригенные коллектора Западной Сибири имеют преимущественно гидрофильный характер смачивания и содержат в составе широкое разнообразие глинистых минералов. При воздействии на призабойную зону водочувствительных глинодержащих пластов технологическими составами на водной основе (буферные жидкости, кислотные растворы, жидкости глушения и другие), используемыми при проведении геолого-технических мероприятий, текущего и капитального ремонта скважин, происходит снижение продуктивности скважин вследствие снижения относительной фазовой проницаемости по нефти и набухания глинистых минералов породы. Снижение негативного влияния данных составов может быть достигнуто путём подбора и адаптации эффективных реагентов-стабилизаторов глин и гидрофобизаторов, посредством проведения комплекса аналитических и лабораторных исследований.

Цель: подбор буферных жидкостей и их модификация с помощью гидрофобизаторов для минимизации негативного воздействия на фильтрационно-емкостные свойства призабойной зоны пласта БС₇⁰ Соровского месторождения.

Объекты: буферные жидкости, стабилизаторы глин и гидрофобизаторы.

Методы. Поставленная цель решалась посредством обзора отечественного и зарубежного опыта применения реагентов – стабилизаторов глин и гидрофобизаторов – в условиях гидрофильных глинистых терригенных коллекторов и проведения комплекса лабораторных исследований, предусматривающих оценку степени воздействия буферных жидкостей на породу пласта посредством определения коэффициента набухания дезинтегрированной породы в данных жидкостях, а также физического моделирования на образцах керна при термобарических условиях объекта исследований. Устойчивость реагентов к температурной и солевой агрессии, а также оценка рисков проявления несовместимости реагентов с пластовыми флюидами и применяемыми кислотными составами проводилась в свободном объёме.

Результаты. Определена устойчивость гидрофобизаторов к температурной и солевой агрессии. Протестирована физико-химическая совместимость растворов гидрофобизаторов и буферных жидкостей с нефтью объекта БС₇⁰ Соровского месторождения и применяемыми на месторождении кислотными составами. На основании проведённого комплекса исследований установлено, что растворы на основе хлорида натрия (плотностью 1140 кг/м³) и хлорида калия (плотностью 1140 и 1070 кг/м³), а также растворы, модифицированные гидрофобизаторами на основе четвертичных аммониевых соединений, обеспечивают наибольшее восстановление проницаемости модели пласта. Данные жидкости и реагенты рекомендованы для применения при текущем и капитальном ремонте скважин, а также в технологиях обработки призабойной зоны в геолого-физических условиях объекта БС₇⁰ Соровского месторождения.

Ключевые слова:

Соровское месторождение, буферная жидкость, технологическая жидкость, глушение, кислотная обработка, набухание глин, относительная фазовая проницаемость, гидрофобизатор, стабилизаторы глин, терригенный коллектор, фильтрационные исследования.

Введение

Соровское месторождение в тектоническом отношении находится в зоне сочленения Верхнесалымского мегавала и Ямского прогиба. Промышленная нефтеносность на Соровском месторождении установлена в меловых и юрских отложениях. Основной эксплуатационный объект – пласт БС₇⁰ – сложен ар-

гиллитами, алевролитами и песчаниками. Пористость в среднем составляет 21 %, проницаемость – 0,11 мкм², нефтенасыщенность – 58 %.

В ходе ранее проведенных исследований было установлено, что на снижение продуктивности скважин Соровского месторождения, эксплуатирующих объект БС₇⁰, главным образом влияют три фактора –

набухание глин, выпадение солей и изменение относительной фазовой проницаемости (ОФП) по нефти. Посредством проведения серии фильтрационных экспериментов определён количественный вклад каждого из факторов в общее снижение проницаемости [1].

Далее авторами была решена задача по разработке технологии кислотного воздействия, направленной на удаление карбоната кальция из призабойной зоны пласта (ПЗП). На основании комплекса аналитических и лабораторных исследований был разработан расчетный инструмент, позволяющий оптимизировать технологию обработки призабойной зоны (ОПЗ). Были спроектированы дизайны ОПЗ для скважин и проведены опытно-промысловые испытания, которые подтвердили результаты лабораторных исследований. По всем скважинам отмечается прирост коэффициента продуктивности по жидкости и дебита по нефти после ОПЗ [1].

Дальнейшая работа по сохранению и восстановлению продуктивности скважин возможна на основе тщательного изучения влияния технологических жидкостей на пласт, порода и флюиды которого имеют особый, присущий им химический состав, свою фильтрационно-емкостную структуру. Ввиду того что проблема отложения солей на месторождении была решена и подробно рассмотрена в работе [2], остается открытым вопрос о влиянии жидкостей глушения (ЖГ) на водной основе на процессы набухания глин и изменения относительной фазовой проницаемости.

Опыт применения гидрофобизаторов в условиях гидрофильных терригенных коллекторов

Известно, что для терригенных коллекторов Западной Сибири характерен преимущественно гидрофильный характер смачивания и большая склонность к удержанию воды по сравнению с гидрофобными карбонатными коллекторами. При эксплуатации скважин с течением времени ситуация осложняется из-за появления в добываемой продукции водной фазы – ОФП по нефти снижается, а условия для фильтрации воды, наоборот, становятся лучше. Значительное снижение происходит даже при появлении в продукции нескольких процентов воды, соответственно, происходит потеря продуктивности скважин. Аналогичная ситуация происходит и при использовании базовых жидкостей глушения на водной основе.

На рис. 1 представлены кривые ОФП в системе нефть–вода, по которым видно, что отложения пласта BS_7^0 не являются исключением и относятся к классу пород с гидрофильной смачиваемостью порового пространства. На это указывает ряд косвенных признаков [3]:

- сравнительно высокие значения эффективной проницаемости образцов керна по нефти в присутствии остаточной воды;
- достаточно низкие значения относительных величин проницаемости по воде при 100 % водонасыщенности пород-коллекторов и, особенно, проницаемости по воде при остаточной нефтенасыщенности.

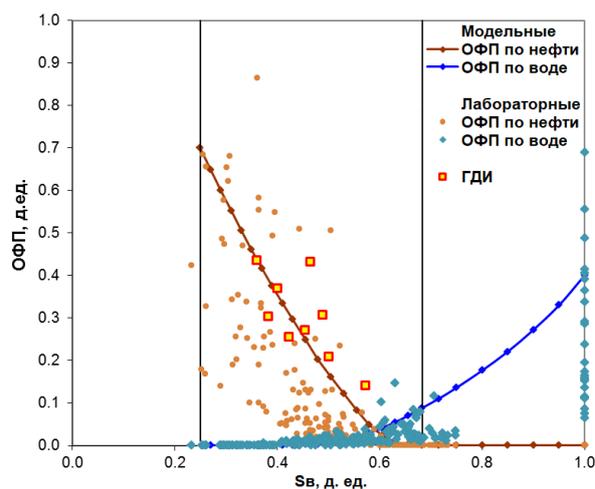


Рис. 1. Кривые относительных фазовых проницаемостей по пласту BS_7^0 . Примечание: S_w – водонасыщенность; ГДИ – гидродинамические исследования

Fig. 1. BS_7^0 formation relative permeability curves. Note: S_w – water saturation; ГДИ – well tests

На данный момент развития нефтяной отрасли накоплен обширный опыт применения гидрофобизаторов при работе с гидрофильными коллекторами. Например, в одной из работ по данной тематике авторы отметили некоторую спорность вопроса применения данного класса реагентов – классические исследования гидрофильных и гидрофобных систем указывают на тот факт, что ОФП гидрофильной породы по воде меньше, чем гидрофобной, и гидрофобизация гидрофильного коллектора приведет к увеличению ОФП по воде [4]. Такие выводы вполне верны, если не принимать во внимание тот факт, что водонасыщенность гидрофильного коллектора всегда будет выше за счет наличия пленочной воды, а именно увеличение водонасыщенности и является основной проблемой при изучении вопросов характера смачиваемости породы. В работе [5] также приводится аналогичное сравнение – ОФП по воде для гидрофобного карбонатного коллектора в 4 раза больше, чем для гидрофильного, однако не принимается во внимание неизбежное изменение водонасыщенности. В таком случае положительный эффект от применения гидрофобизаторов в составе жидкостей глушения достигается за счет предотвращения задержки «избыточной» пленочной и капиллярно защемленной воды в порах коллектора, которая привела бы к необратимому росту водонасыщенности и снижению проницаемости по нефти. Следует также отметить, что большинство гидрофобизаторов обладают способностью снижать значение коэффициента поверхностного натяжения на границе «водные растворы реагентов – углеводороды», что, безусловно, позволит уменьшить возникающие капиллярные давления, улучшить процессы осушения за счет ускорения извлечения жидкостей глушения и израсходованных КС после ОПЗ из мелких пор коллектора [6]. Кроме того, имеются данные об эффекте снижения обводненности продукции после проведения обработок гидрофобизаторами на основе ацетоновых растворов поверхностно-активных

веществ (ПАВ), однако авторами отмечается, что эффект снижения обводнённости преимущественно связан с водоосушающим свойством ацетона [7]. Аналогичный эффект зафиксирован при обработках скважин Самотлорского месторождения с гидрофобизирующей композицией на основе раствора углеводородорастворимой соли алифатических аминов в изопропиловом спирте [5].

В литературных источниках имеются сведения о применении в составе ЖГ на месторождениях Западной Сибири в схожих геолого-физических условиях следующих реагентов, обладающих гидрофобизирующими свойствами: гидрофобные кремнийорганические жидкости, многофункциональные ПАВ (многокомпонентные смеси анионных и катионных поверхностно-активных веществ (КПАВ)), КПАВ, алкилбензолсульфонаты. Отмечается сокращение времени вывода скважины на установившийся режим после проведения ТКРС на 20–25 %, увеличение дебита на 5–8 %, снижение темпа падения продуктивности [8]. Применение КПАВ на основе растворов четвертичных аммониевых соединений (ЧАС) в изопропиловом спирте позволило на 10–15 % повысить успешность и эффективность ремонтов скважин и работ по ОПЗ [9]. По иным данным, применение ЧАС позволило повысить успешность СКО на добывающих скважинах до 70–75 %, снизить обводнённость продукции, а также в 2 раза сократить сроки вывода скважин на режим [10]. К дополнительным преимуществам можно отнести бактерицидные свойства ЧАС, а также их способность ингибировать гидратацию глинистых минералов, кислотную и углекислотную коррозию [10–13]. Другими авторами указывается высокая эффективность КС, содержащих в составе смесь КПАВ на основе ЧАС и анионных ПАВ, представленных карбоксилатами этоксилированного изонилфенола [14].

Значительный опыт проведения ГТМ на схожих объектах получен на пластах БС Правдинского месторождения. По проницаемости и нефтенасыщенности эти пласты сопоставимы с БС₇ Соровского месторождения. Следует также отметить схожесть свойств пластовых нефтей: их вязкость (1,9 и 1,4 мПа·с) и плотность в поверхностных условиях (841–868 и 840–850 кг/м³) [3]. Гидрофильные свойства коллектора Правдинского месторождения, несомненно, оказали влияние на выбор реагентов, применяемых при ОПЗ, – гидрофобизаторы, взаимные растворители (ВЗР – бутилцеллозоль), органические растворители (газовый бензин, Нефрас), комплексные КС с добавлением неионогенных ПАВ и ВЗР. Удельная эффективность ОПЗ, выраженная в дополнительной добыче нефти, на месторождении составила 975,2 т/скв. Помимо Правдинского, пласты группы БС выделены в продуктивных разрезах еще четырёх соседних месторождений: Салымского (Лемпинская площадь), Петелинского, Усть-Балыкского, Майского. Удельная эффективность ОПЗ скважин на данных месторождениях изменяется в диапазоне от 665,8 до 1451,1 т/сут [3].

Также имеются сведения об анализе эффективности различных технологий ОПЗ, проводимых на месторождениях Западной Сибири, в том числе указан-

ных выше. Авторами выявлено, что на ГКО и СКО с применением КПАВ приходится 54 % от всех обработок, а прирост дебита по нефти составляет 59 т/сут, в то время как применение СКО и ГКО приносит дополнительно 35 и 43 т/сут нефти соответственно [15].

В качестве гидрофобизаторов также известно об использовании кремнийорганических соединений (этилсиликаты, органохлорсиланы), однако опыт их применения в промысловых условиях невелик, а также они имеют высокую стоимость и ограниченный объём производства [9, 16, 17].

Опыт применения стабилизаторов глин в условиях глинистых терригенных коллекторов

Важно отметить, что в составе пород нефтяных пластов Западной Сибири встречается широкое разнообразие глинистых минералов. По этой причине при планировании различных технологических операций необходимо учитывать проблему набухания и миграции глинистой составляющей породы коллектора, которая возникает при её контакте с различными солевыми растворами и реагентами на водной основе (ЖГ, КС и другие). Данное явление также может привести к существенному снижению фильтрационно-ёмкостных свойств (ФЕС) нефтяного пласта.

Глинистые минералы, встречающиеся преимущественно в терригенных коллекторах, можно подразделить на следующие группы: монтмориллонитовые (сметитовые), иллитовые, каолинитовые, хлоритовые, смешаннослойные. Способность глин набухать обусловлена строением их кристаллической структуры, состоящей из слоя октаэдров, образованных Al–ОН, Fe–ОН и Mg–ОН, зажатых между слоями тетраэдров Si–О. В слоях всегда образуется недостаток положительных зарядов, обусловленный замещением катионов металлов, при этом поглощается электрон извне и минерал приобретает отрицательный заряд. Когда обменные катионы гидратируются во время нагнетания воды, её молекулы попадают в пространство между структурными слоями и расстояние между ними увеличивается, что приводит к набуханию глины [18].

Степень гидратации глин определяется ёмкостью катионного обмена. Данный параметр показывает общее количество катионов, способных к обмену на катионы взаимодействующего с глиной водного раствора. Наибольшей способностью к гидратации (и, соответственно, ёмкостью катионного обмена) обладает группа монтмориллонитовых глин. Вода, внедряясь между структурных слоев глины, может привести к увеличению её объёма в 8–10 раз. Затем в порядке убывания величины ёмкости катионного обмена следуют смешаннослойные образования, иллит и хлорит, мусковит, каолинит [19].

Для снижения негативного влияния описанных процессов на коллекторские свойства нефтенасыщенных пластов повсеместно применяются реагенты – стабилизаторы глин: при бурении, скважинных ремонтных работах, гидроразрыве пласта, заводнении и других операциях. Принцип действия данного вида реагентов основан на различных механизмах [20]: ка-

тионного обмена (КСl, хлорид тетраметиламмония, хлорид холина) [16, 19–22]; нейтрализации заряда (катионы с высоким зарядом (гидроксид алюминия $(Al_6(OH)_{12}(H_2O)_{12}^{6+})$ и циркония (Zr^{4+}) , в виде оксихлорида циркония) [18, 23]; образования защитного слоя (полиакриламид, органосилан) [20, 24]; растворения глин (глинокислотные составы) [25]; водородного связывания (полиамины) [20, 26]; изменения смачиваемости поверхности породы (поличетвертичные амины) [20, 26, 27]; изменения шероховатости поверхности породы (наночастицы) [18, 20]; смешанном механизме, включающем несколько из перечисленных механизмов.

Для ингибирования набухания также возможно применение дихлорида этилендиаммония, действие которого обусловлено способностью снижать электроотрицательность глины и гидрофобизировать её поверхность [28]. Высокими ингибирующими свойствами также обладают реагенты на основе высокомолекулярных органических полимеров, например хлорид полидиметилдиаллиламмония, однако их применение ограничено в низкопроницаемых коллекторах ввиду высоких рисков коагуляции, обусловленной большим размером молекул по сравнению с диаметром порового канала [28].

Более эффективными агентами в данном случае могут послужить сверхразветвленные полимеры, которые после катионной модификации концевых групп (например, на четвертичную аммониевую группу) могут быть использованы как эффективные стабилизаторы глин. К преимуществам можно отнести их малую молекулярную массу (от тысяч до десятков тысяч единиц), хорошую растворимость, низкую вязкость конечного раствора и способность легко формировать плёнку на поверхности глины [29].

Известно также об использовании наночастиц оксидов металлов, таких как MgO , SiO_2 и Al_2O_3 , в целях борьбы с набуханием и миграцией глин [20]. Однако исследователями было установлено, что эти частицы не способны диффундировать в структурные слои глин подобно ионам металлов в солевых растворах и, соответственно, ингибировать набухание. Минимальный размер наночастиц составляет более 5 нм, в то время как расстояние между слоями глин – менее 2 нм. Более того, по результатам фильтрационных исследований было установлено, что закачка жидкости с наночастицами приводит к снижению проницаемости, обусловленному коагуляцией пористой среды [18].

В литературных источниках имеются сведения об исследованиях катионных полиэтиленоксидных димерных ПАВ амидаминового типа для применения в составе жидкостей ГРП в условиях низкопроницаемых терригенных коллекторов. Авторами установлено, что применение данного ПАВ позволяет практически полностью восстановить проницаемость образцов породы после физического моделирования процесса закачки жидкости разрыва. Отмечена их более высокая эффективность по сравнению с растворами хлоридов натрия и калия [30].

Тем не менее в качестве ингибиторов набухания глин давно известны и повсеместно применяются растворы хлоридов калия, натрия, аммония, причем многими авторами отмечается, что раствор хлорида калия является наиболее эффективным временным одновалентным стабилизатором глин, что обусловлено наименьшим размером иона калия (K^+), по сравнению с другими ионами [21, 31–33].

С использованием метода рентгеноструктурного анализа образцов зерна рассматриваемого продуктивного объекта Соровского месторождения выявлено присутствие в минералогическом составе породы глинистого цемента в количестве от 5 до 30 % (в зависимости от интервала отбора зерна). Данный цемент представлен следующими минералами: иллит 14 %, каолинит 40 %, хлорит 8 %, мусковит 29 %, смешаннослойные образования 9 %. Очевидно, что применение, например, пресной воды в этом случае приведет к значительному набуханию глин и снижению проницаемости порового пространства ПЗП. Таким образом, подобный состав горных пород обуславливает необходимость в применении стабилизаторов глин в случае подтверждения факта набухания при применении базовых растворов.

С учётом вышеизложенного, применительно к условиям Соровского месторождения, авторами был исследован характер влияния буферных жидкостей на основе растворов солей на ФЭС породы. Отметим, что под буферной жидкостью понимается водный раствор, обладающий сниженным негативным воздействием на породы пласта и закачиваемый перед жидкостью глушения или в качестве продавочной жидкости при кислотных обработках. Ввиду отсутствия в минералогическом составе пород объекта монтмориллонитовых глин в качестве исследуемых жидкостей авторами были приняты растворы хлорида натрия ($NaCl$) (плотность 1140 и 1070 $кг/м^3$, концентрация 216,6 и 105,6 г/л соответственно) и хлорида калия (KCl) (плотность 1140 и 1070 $кг/м^3$, концентрация 240,3 и 117,8 г/л соответственно).

В качестве исследуемых гидрофобизаторов выбраны КПАВ на основе ЧАС. Данный класс ПАВ обладает рядом преимуществ, описанных ранее, а также является экологически безопасным и выпускается в промышленных масштабах, имеется положительный опыт применения данного вида гидрофобизаторов на месторождениях Западной Сибири.

Предотвращение набухания глинистой составляющей породы при воздействии буферными жидкостями

На первом этапе исследований проводили оценку влияния вышеуказанных растворов на коэффициенты объёмного расширения и проницаемости образцов зерна Соровского месторождения.

Для проведения исследований в качестве пластовой воды использовалась модель пластовой воды (МПВ) объекта БС₇ Соровского месторождения со следующим ионным составом: $Ca^{2+}=350,0$ мг/л; $Mg^{2+}=120,0$ мг/л; $Na^++K^+=7490,9$ мг/л; $Cl^-=9900,0$ мг/л; $SO_4^{2-}=9,8$ мг/л; $HCO_3^-=3660,0$ мг/л. Общая минерализация – 21530,7 мг/л.

Определение коэффициента объемного расширения навески дезинтегрированного зерна проводили с использованием ядерного материала пласта БС₇⁰ Соровского месторождения в течение 7 часов на тестере динамики набухания OFITE DYNAMIC LINEAR SWELLMETER COMPLETE W/COMPACTOR. Прибор позволяет определять изменение высоты цилиндрического образца породы во времени, а также обеспечивает циркуляцию жидкости вокруг образца в процессе исследования.

Керновый материал для изготовления цилиндрического образца измельчали до размера менее 1,0 мм на мельнице, тщательно перемешивали для получения однородной пробы и просеивали через сито с размером ячейки 125 мкм. Подготовленный глинистый материал высушивали в сушильном шкафу при температуре 105 °С и помещали для хранения в эксикатор.

Формирование цилиндрических образцов для испытаний проводили на гидравлическом компакторе. Навеску определенной массы помещали в цилиндрическую форму, которую размещали на платформе гидравлического пресса под прижимающим рычагом, и с помощью ручного гидравлического насоса создавали давление на образец, равное 40 МПа, в течение 30 минут.

В соответствии с разработанной программой исследований, включавшей в себя установленные показатели эффективности ингибирующих свойств испытуемых растворов, к параметру предъявляется следующее требование: коэффициент объемного расширения не должен превышать более чем на 10 % показатель, полученный при использовании МПВ.

Результаты исследования представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты исследований ингибирующих свойств растворов

Table 1. Results of salt solutions inhibition properties research

Тестируемая жидкость Fluid under test	Плотность, кг/м ³ Density, kg/m ³	Коэффициент объемного расширения, % Expansion coefficient, %	Коэффициент объемного расширения (относительно показателя для МПВ), % Expansion coefficient (relative to coefficient for synthetic formation brine), %
МПВ Synthetic formation brine	1022	18,0	–
Пресная вода Fresh water	1000	21,3	18,3
Раствор NaCl NaCl brine	1070	20,0	11,1
	1140	18,6	3,3
Раствор KCl KCl brine	1070	17,8	–1,1
	1140	16,2	–10,0

На основе анализа результатов исследований (табл. 1) выявлено, что все буферные жидкости на основе растворов хлорида натрия способствуют росту коэффициента объемного расширения навески отно-

сительно значения, полученного в МПВ. Тем не менее этот рост не превышает установленных требований, за исключением раствора хлорида натрия с плотностью 1070 кг/м³. В данном растворе коэффициент объемного расширения составляет 20 %, что более чем на 10 % выше относительно значения, полученного в МПВ. Буферные жидкости на основе растворов хлорида калия способствуют снижению коэффициента объемного расширения навески относительно значения, полученного в МПВ. Наибольшее набухание образца породы происходит при его контакте с пресной водой.

Далее проводились исследования по изучению степени восстановления проницаемости водонасыщенного зерна по модели пластовой воды после фильтрации испытуемых растворов. Перед проведением эксперимента образец зерна насыщали МПВ, в фильтрационной установке создавали пластовые термобарические условия.

Степень восстановления проницаемости зерна оценивали при помощи коэффициента восстановления проницаемости ($k_{ВП}$), который рассчитывали по формуле (1):

$$k_{ВП} = \frac{k_2}{k_1} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

k_1 – проницаемость породы по МПВ до фильтрации раствора, мкм²; k_2 – проницаемость породы по МПВ после фильтрации раствора, мкм².

Согласно установленным требованиям, параметр $k_{ВП}$ для исследуемых растворов на основе солей должен составлять не менее 92 %.

Эксперимент включал в себя три этапа:

- 1) определение проницаемости образца зерна по МПВ перед закачкой раствора (k_1) путём фильтрации МПВ сквозь модель пласта с постоянным расходом в прямом направлении до стабилизации перепада давления;
- 2) определение фазовой проницаемости образца зерна по раствору путём его фильтрации сквозь модель пласта с постоянным расходом в обратном направлении до стабилизации перепада давления (но не менее трёх поровых объемов);
- 3) определение проницаемости образца зерна по МПВ после закачки раствора (k_2) путём фильтрации МПВ сквозь модель пласта с постоянным расходом в прямом направлении до стабилизации перепада давления.

Сводные данные по результатам проведенных фильтрационных экспериментов по воздействию растворами на модели пласта представлены в табл. 2.

Для сравнения приведены зависимости, отражающие динамику проницаемости при закачке пресной воды (рис. 2, А) и раствора хлорида калия (рис. 2, Б).

Как следует из рисунка, при фильтрации модели пластовой воды на третьем этапе происходит двукратное снижение проницаемости образца зерна относительно значения, полученного перед воздействием пресной водой, что обусловлено набуханием глинистой составляющей образца зерна. В аналогичном эксперименте при фильтрации раствора хлорида ка-

лия происходит полное восстановление проницаемости образца относительно модели пластовой воды. Использование растворов хлорида натрия и хлорида калия позволяет обеспечить восстановление проницаемости образца керна по модели пластовой воды на 92,2–100,0 %, что удовлетворяет требованиям к ингибирующей способности буферных жидкостей.

Таблица 2. Сводные данные по результатам фильтрационных экспериментов

Table 2. Core tests summary

Тип исследуемой жидкости Brine under test	Проницаемость, $\times 10^{-3}$ мкм ² Permeability, $\times 10^{-3}$ mkm ²			$k_{ВП}$, %
	МПВ Synthetic formation brine	Раствор Brine	МПВ Synthetic formation brine	
Пресная вода/Fresh water	20,07	2,1	10,03	50
Раствор KCl $\rho=1140$ кг/м ³ KCl brine $\rho=1140$ kg/m ³	13,6	0,74	9,85	72,4
Раствор KCl $\rho=1070$ кг/м ³ KCl brine $\rho=1070$ kg/m ³	17,5	2,18	11,88	67,8
Раствор NaCl $\rho=1140$ кг/м ³ NaCl brine $\rho=1140$ kg/m ³	17,31	2,25	8,85	51,1
Раствор NaCl $\rho=1070$ кг/м ³ NaCl brine $\rho=1070$ kg/m ³	19,41	1,8	10,38	53,5

В работе [34] авторами установлено, что степень снижения проницаемости образца керна вследствие набухания глин можно описать следующей зависимостью:

$$K_t/K_0 = (K/K_0) + [1 - (K/K_0)]e^{-\alpha_{sw}S(t)}, \quad (2)$$

где K_t – проницаемость в момент времени t , мкм²; K_0 – исходная проницаемость, мкм²; K – конечная проницаемость, мкм²; α_{sw} – константа скорости снижения проницаемости, м²/кг; S – удельное количество абсорбируемой воды, кг/м². Удельное количество абсорбируемой воды можно записать в следующем виде:

$$S = \frac{2}{\sqrt{\pi}}(c_1 - c_0)\sqrt{Dt}, \quad (3)$$

где c_1 – концентрация воды в водном растворе, кг/м³; c_0 – исходная концентрация воды в пористой матрице, кг/м³; D – коэффициент диффузии, м²/с; t – время взаимодействия водного раствора с породой, с. При подстановке (3) в (2) последнее примет следующий вид:

$$K_t/K_0 = (K/K_0) + [1 - (K/K_0)]e^{-\alpha_{sw}\frac{2}{\sqrt{\pi}}(c_1 - c_0)\sqrt{Dt}}. \quad (4)$$

Запишем полученное равенство (4) в упрощенном виде (6) путём ввода параметра B :

$$B = \alpha_{sw}\frac{2}{\sqrt{\pi}}(c_1 - c_0)\sqrt{D}, \quad (5)$$

$$K_t/K_0 = (K/K_0) + [1 - (K/K_0)]e^{-B\sqrt{t}}. \quad (6)$$

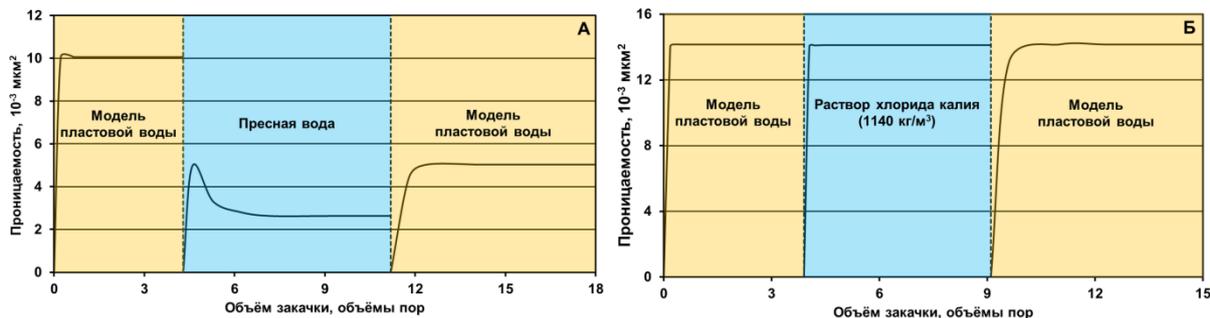
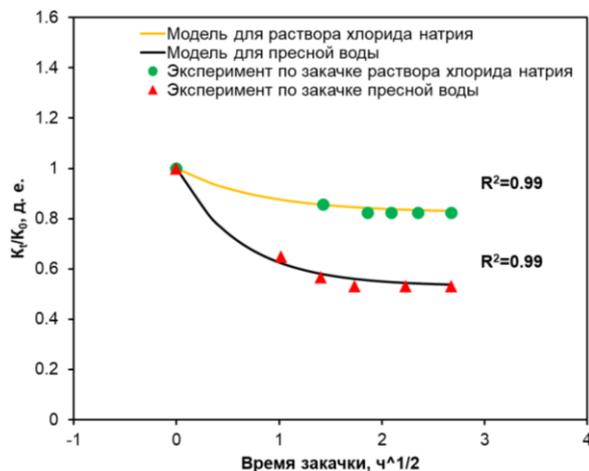


Рис. 2. Динамика проницаемости в процессе закачки пресной воды (А) и раствора хлорида калия плотностью 1140 кг/м³ (Б)

Fig. 2. Dynamics of permeability during the injection of unleavened water (A) and potassium chloride solution with a density of 1140 kg/m³ (B)



Принимая во внимание, что $c_1 - c_0 = \text{const}$ для обоих экспериментов, сделан вывод о том, что параметр B (5) будет характеризовать скорость снижения проницаемости пласта в ходе фильтрационного эксперимента.

В качестве примера рассмотрим отдельные этапы вышеописанных экспериментов по закачке пресной воды и раствора хлорида натрия плотностью 1140 кг/м³. Данные фильтрационных экспериментов и аппроксимация в соответствии с уравнением (6) отображены на рис. 3.

Рис. 3. Динамика соотношения проницаемостей в процессе закачки пресной воды и раствора хлорида натрия плотностью 1140 кг/м³

Fig. 3. Dynamics of permeability ratio during the injection of unleavened water and sodium chloride solution with a density of 1140 kg/m³

Таким образом, на основании фильтрационных исследований, проведённых на керне объекта БС₇⁰ Соровского месторождения, для раствора хлорида натрия уравнение (6) примет следующий вид:

$$K_t/K_0 = (0.82) + [1 - (0.82)]e^{-1.2\sqrt{t}}. \quad (7)$$

Для пресной воды:

$$K_t/K_0 = (0.53) + [1 - (0.53)]e^{-1.6\sqrt{t}}. \quad (8)$$

Полученные экспериментальные данные по снижению проницаемости пласта при фильтрации водных растворов хорошо согласуются с моделью, описываемой уравнениями (7) и (8). Отмечается, что параметр *B* для пресной воды на 33 % больше, чем для раствора хлорида натрия, что свидетельствует о более высокой интенсивности процессов абсорбции воды глинами. С учётом полученных результатов для проведения дальнейших исследований и модификации гидрофобизаторами принят раствор на основе хлорида натрия плотностью 1140 кг/м³. Данный раствор обладает достаточной ингибирующей способностью по отношению к глинистым минералам коллектора и обеспечивает восстановление проницаемости модели пласта на уровне 99,2 %. В качестве преимущества стоит отметить более низкую стоимость хлорида натрия по сравнению с хлоридом калия при сопоставимых технологических характеристиках получаемых солевых растворов.

Снижение негативного влияния буферных жидкостей на ОФП по нефти

Комплекс исследований включал в себя следующие эксперименты:

- 1) тестирование устойчивости гидрофобизаторов к солевой и температурной агрессии;
- 2) определение коэффициента восстановления проницаемости нефтенасыщенного керна при фильтрации раствора хлорида натрия, модифицированного гидрофобизатором.

Предварительно выбирали необходимую дозировку гидрофобизаторов на основании результатов измерения коэффициента поверхностного натяжения (σ) модифицированного раствора хлорида натрия плотностью 1140 кг/м³ на границе с углеводородом и определения критической концентрации мицеллообразования.

На следующем этапе проводили тестирование устойчивости гидрофобизаторов к солевой и температурной агрессии путем их смешения в растворе хлорида натрия плотностью 1140 кг/м³ и МПВ с последующим термостатированием при комнатной (23 °С) и пластовой (87 °С) температурах в течение 8 часов. После каждой термоэкспозиции проводили визуальный контроль – фиксировали выделение газов, помутнение раствора, выпадение осадка. Результаты исследования представлены в табл. 3.

Таким образом, на данном этапе успешно прошли испытания гидрофобизаторы ГФ № 1, ГФ № 2, ГФ № 4 и ГФ № 5. Гидрофобизатор ГФ № 3 проявил неустойчивость к солевой и температурной агрессии – при пластовой температуре выявлено помутнение и выпадение небольшого количества осадка.

Таблица 3. Устойчивость гидрофобизаторов к термосолевой агрессии

Table 3. Stability of the surfactants under the temperature and salt aggression

Тестируемая жидкость Fluid under test	Результаты тестирования при температуре 23/87 °С Testing results at 23/87 °С					
	Без ГФ Without surfactant	ГФ/Surfactant				
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
МПВ Synthetic formation brine	П/П			П/В		П/П
Раствор NaCl NaCl brine						

Примечание: П – раствор остается прозрачным, В – выпадение осадка.

Note: П – brine keeps clear, В – precipitation.

На следующем этапе проводили оценку влияния растворов, модифицированных устойчивыми к термосолевой агрессии гидрофобизаторами, на проницаемость модели нефтенасыщенного пласта.

Исследования по определению $k_{ВП}$ модели пласта по нефти после закачки буферной жидкости с гидрофобизатором проводились аналогично исследованиям на водонасыщенном керне, с тем отличием, что на 1 и 3 этапе определяли фазовую проницаемость керна по нефти, а на 2 этапе проводилась фильтрация модифицированной гидрофобизатором буферной жидкости. В качестве буферной жидкости исследовался водный раствор хлорида натрия (плотностью 1140 кг/м³) с добавкой гидрофобизаторов в необходимой дозировке.

Таблица 4. Физико-химические свойства и состав нефти пласта БС₇⁰

Table 4. Physical/chemical properties and composition of BS₇⁰ formation oil

Параметр Parameter	Единица измерения Unit	Значение Value
Вязкость в пластовых условиях In-situ viscosity	мПа·с (mPa·s)	1,168
Плотность в пластовых условиях In-situ density	кг/м ³ (kg/m ³)	767,0
Вязкость дегазированной нефти при 20 °С Degassed oil viscosity at 20 °С	мПа·с (mPa·s)	11,600
Плотность дегазированной нефти при 20 °С Degassed oil density at 20 °С	кг/м ³ (kg/m ³)	845,6
Давление насыщения газом Bubble point pressure	МПа (MPa)	8,53
Газосодержание/Gas-oil ratio	м ³ /т (m ³ /t)	63,7
Объёмный коэффициент Formation volume factor	м ³ /м ³ (m ³ /m ³)	1,152
Коэффициент сжимаемости пластовой нефти/Oil compressibility coefficient	1/МПа·10 ⁻⁴ (1/MPa·10 ⁻⁴)	14,8
Массовое содержание парафинов Paraffine mass content	%	2,4
Массовое содержание асфальтенов Asphaltene mass content		0,9
Массовое содержание смол силикагелевых Resins mass content		4,33
Молекулярная масса/Molecular weight	г/моль (g/mol)	191
Температура застывания/Pour point	°С	-14,5
Температура начала кипения/Boiling point		61,9
Температура плавления парафина Paraffin melting point		57,4

В качестве углеводородной фазы использовали изовязкозную модель нефти, состоящую из устьевой пробы нефти и керосина, с вязкостью, соответствующей вязкости нефти в пластовых условиях [35]. Нефть пласта БС₇⁰ характеризуется как лёгкая по плотности, с незначительной вязкостью, малосернистая, парафинистая, малосмолистая. Основные физико-химические свойства и состав нефти представлены в табл. 4.

В образцах моделью пластовой воды создавалась начальная водонасыщенность в количестве 40 % от объема порового пространства методом центрифугирования. Перед проведением эксперимента в модели пласта моделировались термобарические условия исследуемого объекта.

Согласно установленным требованиям, $k_{ВП}$ для модифицированных гидрофобизатором растворов должен быть более чем на 10 % выше относительно $k_{ВП}$, полученного на немодифицированном растворе хлорида натрия плотностью 1140 кг/м³.

Сводные данные по результатам проведенных фильтрационных исследований представлены в табл. 5.

Установлено, что закачка немодифицированного раствора хлорида натрия приводит к последующему снижению фазовой проницаемости по нефти в два раза, в то время как применение гидрофобизаторов позволяет в различной степени минимизировать негативное влияние водных растворов на фазовую проницаемость.

Таблица 5. Сводные данные по результатам фильтрационных исследований

Table 5. Core tests summary

Тип исследуемой жидкости Brine under test	Проницаемость, $\times 10^{-3}$ мкм ² Permeability, $\times 10^{-3}$ mkm ²			$k_{ВП}$, %
	Нефть Oil	Раствор Brine	Нефть Oil	
Исходный раствор NaCl $\rho=1140$ кг/м ³ Initial solution NaCl $\rho=1140$ kg/m ³	20,07	2,1	10,03	50
ГФ № 1 в растворе NaCl $\rho=1140$ кг/м ³ Surfactant № 1 in NaCl brine $\rho=1140$ kg/m ³	13,6	0,74	9,85	72,4
ГФ № 2 в растворе NaCl $\rho=1140$ кг/м ³ Surfactant № 2 in NaCl brine $\rho=1140$ kg/m ³	17,5	2,18	11,88	67,8
ГФ № 4 в растворе NaCl $\rho=1140$ кг/м ³ Surfactant № 4 in NaCl brine $\rho=1140$ kg/m ³	17,31	2,25	8,85	51,1
ГФ № 5 в растворе NaCl $\rho=1140$ кг/м ³ Surfactant № 5 in NaCl brine $\rho=1140$ kg/m ³	19,41	1,8	10,38	53,5

Для сравнения приводится график изменения проницаемости в процессе закачки раствора хлорида натрия без гидрофобизатора (рис. 4, А) и с гидрофобизатором ГФ № 1 (рис. 4, Б).

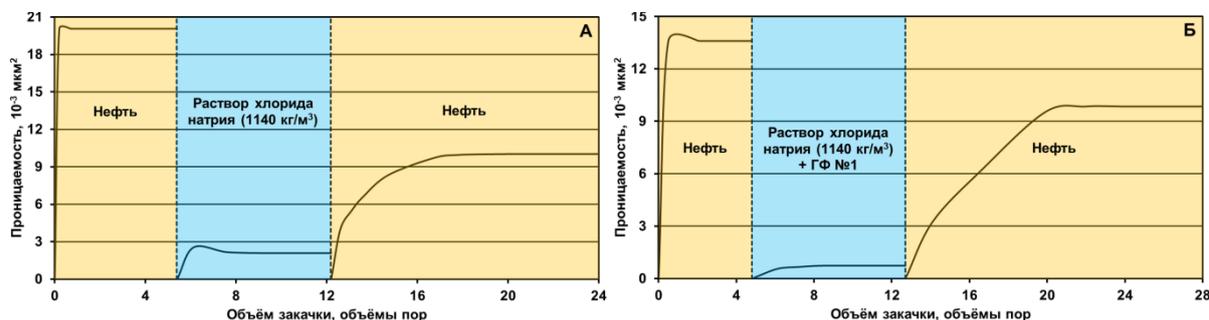


Рис. 4. Динамика проницаемости в процессе фильтрационных экспериментов по исследованию раствора хлорида натрия (А) и раствора хлорида натрия, модифицированного гидрофобизатором ГФ № 1 (Б)

Fig. 4. Dynamics of permeability changing during the injection of sodium chloride solution (A) and sodium chloride solution with Surfactant № 1 (B)

Наибольшее восстановление проницаемости обеспечивается при закачке раствора, модифицированного гидрофобизатором ГФ № 1, и составляет 72,4 %. При применении ГФ № 4 происходит наименьшее восстановление проницаемости – 51,1 %, что на 1,1 процентный пункт выше аналогичного параметра при использовании немодифицированного раствора хлорида натрия.

На следующем этапе с целью оценки применимости исследованных растворов солей и гидрофобизаторов в технологиях кислотного воздействия определена их физико-химическая совместимость с КС и нефтью целевого объекта.

Совместимость рассматриваемых растворов и гидрофобизаторов с КС испытана их смешением в соотношении 50:50, термостатированием в течение двух

часов при пластовой температуре, после чего в течение двух часов при комнатной температуре. По истечении времени фиксировали наличие газа, осадка, изменение цвета, помутнение в смеси. Для испытаний принимали следующие КС, применяемые при ОПЗ добывающих скважин, эксплуатирующих объект БС₇⁰ Соровского месторождения [1, 2]: модифицированный 8 % (мас.) раствор соляной кислоты; модифицированный глинокислотный состав, содержащий 9 % (мас.) хлороводорода и 1,5 % (мас.) фтороводорода.

По результатам тестов было выявлено, что все испытанные гидрофобизаторы и буферные жидкости совместимы с КС и могут применяться в технологиях кислотного воздействия на объекте БС₇⁰ Соровского месторождения.

Определение совместимости растворов хлоридов натрия (плотностью 1140 кг/м³) и калия (плотностью 1140 и 1070 кг/м³) проводилось путём их смешения с нефтью в объёмных соотношениях 25:75, 50:50, 75:25 с предварительным термостатированием проб в течение 30 минут. Расслоение смеси контролировали в течение двух часов при 87 °С, затем при комнатной температуре в течение двух часов. Затем аналогичное тестирование проводили с раствором хлорида натрия плотностью 1140 кг/м³ при добавлении различных гидрофобизаторов.

Смешение модифицированных гидрофобизаторами растворов на основе хлорида натрия с нефтью в различных соотношениях объёма не привело к образованию взвеси, эмульсии и осадка. При фильтрации смеси через сито с размером ячейки не более 0,152 мм выпадения осадков и образования эмульсии также не выявлено. Все испытанные гидрофобизаторы и солевые растворы совместимы с нефтью объекта.

Выводы

1. Проведен аналитический обзор опыта применения гидрофобизаторов и стабилизаторов глин. Установлено, что применение данных типов реагентов позволяет повысить эффективность операций ОПЗ и ТКРС в условиях глинистых терригенных коллекторов. Для проведения экспериментальных исследований выбраны растворы хлорида натрия (плотностью 1140 и 1070 кг/м³) и хлорида калия (плотностью 1140 и 1070 кг/м³), а также раствор на основе хлорида натрия (плотностью 1140 кг/м³), модифицированный катионными гидрофобизаторами на основе четвертичных аммониевых соединений.
2. Оценено влияние данных растворов, а также пресной воды на набухание и снижение проница-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комплексный подход при обосновании выбора технологии борьбы с солеотложением в нефтедобывающих скважинах / А.Е. Фоломеев, Р.А. Фаизов, А.Р. Шарифуллин, А.Г. Михайлов, И.С. Давиденко // Инженерная практика. – 2018. – № 6–7. – С. 98–104.
2. Адаптация технологии обработки призабойных зон скважин Соровского месторождения в условиях солеотложения / А.Е. Фоломеев, С.А. Вахрушев, Ф.К. Мингалишев, А.Р. Шарифуллин, Р.А. Фаизов, И.С. Давиденко, Р.К. Разяпов // Нефтяное хозяйство. – 2019. – № 11. – С. 124–129.
3. Дополнение к технологической схеме разработки Соровского нефтяного месторождения в пределах Восточно-Вуемского лицензионного участка. Кн. 1 / под ред. Г.А. Мухаметзяновой. – Уфа: ООО «БашНИПИнефть», 2015. – 792 с.
4. Определение смачиваемости керна месторождений Вала Гамбурцева различными методами / М.Р. Гайсин, А.Е. Фоломеев, А.К. Макатров, А.Г. Телин, И.С. Афанасьев, А.И. Федоров, О.В. Емченко, А.В. Зайнуллин // Территория Нефтегаз. – 2011. – № 4. – С. 46–52.
5. Минаков И.И. Гидрофобизация прискважинной зоны пласта составами на основе ПАВ с целью интенсификации добычи нефти: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2001. – 19 с.
6. Особенности выбора технологий глушения скважин с высоким пластовым давлением на месторождениях ООО «Башнефть-Добыча» / С.А. Вахрушев, О.Е. Гамалин, В.А. Шайдуллин, Н.Г. Беленкова, И.А. Ахмеров // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 9. – С. 111–115.

емости горной породы терригенного коллектора БС₇⁰ Соровского месторождения. Выявлено, что наибольшее набухание и снижение проницаемости вызывает пресная вода и раствор на основе хлорида натрия плотностью 1070 кг/м³. Данную жидкость не рекомендуется применять в условиях рассматриваемого месторождения.

3. Определена устойчивость растворов гидрофобизаторов к температурной и солевой агрессии. Выявлено, что один из протестированных гидрофобизаторов неустойчив и демонстрирует помутнение раствора и выпадение осадка.
4. Определена физико-химическая совместимость растворов гидрофобизаторов и буферных жидкостей с нефтью объекта БС₇⁰ Соровского месторождения и применяемыми на месторождении кислотными составами. Все гидрофобизаторы совместимы с нефтью объекта и кислотными составами, при их смешении взвесь, эмульсия и осадки не образуются.
5. Марки гидрофобизаторов ГФ № 1 и ГФ № 2 на основе четвертичных аммониевых соединений показали наибольшее восстановление проницаемости и рекомендованы для применения при операциях глушения и кислотных обработках в геолого-физических условиях объекта БС₇⁰ Соровского месторождения.
6. Буферные жидкости на основе хлорида натрия (плотностью 1140 кг/м³) и хлорида калия (плотностью 1140 и 1070 кг/м³) обладают приемлемыми ингибирующими свойствами в отношении глин и рекомендованы для применения при операциях глушения и кислотных обработках в геолого-физических условиях объекта БС₇⁰ Соровского месторождения.
7. Дубков И.Б., Земцов Ю.В. Эффективность гидрофобных кислотных составов при ОПЗ юрских пластов Ловинского месторождения // Бурение и нефть. – 2008. – № 02. – С. 44–45.
8. Стабилизатор коллекторских свойств нефтяного пласта: пат. 2312880 Российская Федерация, МПК С09К 8/42, С09К 8/524, С09К 8/528, С09К 8/74. № 2006107239/03; заявл. 10.03.2006; опубл. 20.12.2007. – 6 с.
9. Вопросы интенсификации добычи нефти в полимиктовых высокоглинистых коллекторах / В.В. Шелепов, О.Г. Зарипов, Р.Н. Фахретдинов, Ю.В. Земцов // Интервал. – 1999. – № 7. – С. 2–6.
10. Петров Н.А., Юрьев В.М., Хисаева А.И. Синтез анионных и катионных ПАВ для применения в нефтяной промышленности. – Уфа: УГНТУ, 2008. – 54 с.
11. Correlation between critical micelle concentration and CO₂ corrosion inhibition efficiency of quaternary ammonium compounds / X. Li, S. Chawla, W. Durmie, J. Vera, W. Richard // CORROSION 2018. – Phoenix: NACE, 2018. – 9 p.
12. Field trial findings of a novel sulfidogenesis inhibitory compound / B. Geissler, A. Jones, M. Setinc, A. Koerner, B. Damon // CORROSION 2019. – Nashville: NACE, 2019. – 13 p.
13. Investigation of high-efficient acidizing inhibitors: structure and anti-corrosion performance of novel indolizine derivatives / Z. Yang, Y. Wang, F. Zhan, R. Wang, W. Chen, M. Ding, H. Baofeng // CORROSION 2019. – Nashville: NACE, 2019. – 17 p.
14. Изучение синергетического эффекта смеси анионных и катионных ПАВ в средах различной кислотности / Л.А. Магадова, Л.Ф. Давлетшина, В.Д. Власова, Т.И. Юнусов, К.К. Мерзляков //

- Нефтепромысловая химия: Материалы VI Международной научно-практической конференции (XIV Всероссийской научно-практической конференции). – М.: РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 2019. – С. 69–71.
15. Мониторинг и выбор технологий обработки призабойной зоны на месторождениях ООО «РН-Юганскнефтегаз» / В.Н. Гузаков, А.Г. Телин, А.Г. Пасынков, В.В. Мальцев, А.Ю. Каменских, Ю.А. Подкопаев // Нефтяное хозяйство. – 2007. – № 11. – С. 57–61.
 16. Economides M.J., Nolte K.G. Reservoir stimulation. 3rd ed. – New York: John Wiley & Sons LTD Publ., 2000. – 856 p.
 17. Габидуллин Р.И. Композиционные гидрофобизаторы на основе эввилена для обработки призабойных зон нефтяных скважин: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Казань, 2005. – 19 с.
 18. Effect of nanoparticles on clay swelling and migration / A. Sameni, P. Pourafshary, M. Ghanbarzadeh, S. Ayatollahi // Egyptian Journal of Petroleum. – 2015. – V. 24 (4). – P. 429–437.
 19. Assem A.I., Nasr-El-Din H.A., Harper T.L. A new class of permanent clay stabilizers // SPE International Conference on Oilfield Chemistry. – Galveston: SPE, 2019. – 11 p.
 20. Wang L. Clay stabilization in sandstone reservoirs and the perspectives for shale reservoirs // Advances in Colloid and Interface Science. – 2020. – V. 276. – 58 p.
 21. Кристиан М., Сокол С., Константиnescу А. Увеличение продуктивности и приемистости скважин / Пер. с румынск. – М.: Недра, 1985. – 184 с.
 22. Рябоконт С.А. Технологические жидкости для заканчивания и ремонта скважин. изд. 2-е, доп. и перераб. – Краснодар: Б. и., 2009. – 338 с.
 23. Patel H., Santra A., Thamlitz C. Functionalized layered nanomaterials: a next-generation shale inhibitor // International Petroleum Technology Conference. – Dhahran: IPTC, 2020. – 9 p.
 24. Kalfayan L.J., Watkins D.R. A new method for stabilizing fines and controlling dissolution during sandstone acidizing // SPE California Regional Meeting. – Ventura: SPE, 1990. – 8 p.
 25. Ayorinde A., Granger C., Thomas R.L. The application of fluoboric acid in sandstone matrix acidizing: a case study // 21st Annual Indonesian Petroleum Association Convention. – Jakarta: Indonesian Petroleum Association, 2020. – 28 p.
 26. An innovative approach using micro-emulsion treatment techniques to remove sandstone formation damage: lab testing and field application / H.A. Almajid, H.I. Shuwaikhat, S.M.A. Zeid, A.K.V. Addagalla // SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition. – Dammam: SPE, 2018. – 10 p.
 27. Hall B.E. Workover Fluids: Parts 1–5 // World Oil. – 1986. – № 5. – P. 111–114.
 28. Study of ethylenediammonium dichloride as a clay stabilizer used in the fracturing fluid / L. Fu, K. Liao, J. Ge, G. Zhang, Y. He, X. Wang, S. Zhang, S. Deng // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – V. 179. – P. 958–965.
 29. Synthesis, characterization and evaluation of long-acting hyperbranched cationic polymer clay stabilizer used in water flooding / Q. Feng, H. Liu, Z. Peng, Y. Zheng // Polymer Testing. – 2020. – V. 82. – 11 p.
 30. Novel gemini surfactant as a clay stabilizing additive in fracturing fluids for unconventional tight sandstones: Mechanism and performance / Z. Tariq, M.S. Kamal, M. Mahmoud, S.M. Shakil Hussain, S.R. Hussaini // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2020. – V. 195. – 11 p.
 31. Crowe C.W. Laboratory study provides guidelines for selecting clay stabilizers // CIM/SPE International Technical Meeting. – Calgary: SPE, 1990. – 7 p.
 32. Van Gijtenbeek K., Neyfeld A.P., Prudnikova A. One molar salt solutions used for clay control in waterbased frac fluids in West Siberia // SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition. – Moscow: SPE, 2006. – 8 p.
 33. Chilingarian G.V., Vorabutr P. Drilling and drilling fluids, developments in petroleum science. – New York: Elsevier Scientific Publishing Co., 1981. – 767 p.
 34. Civan F., Knapp R.M. Effect of clay swelling and fines migration on formation permeability // Proceedings of the SPE Production Operations Symposium. – Oklahoma: SPE, 1987. – P. 475–483.
 35. OCT 39-195-86. Нефть. Метод определения коэффициента вытеснения нефти водой в лабораторных условиях. – М.: ВНИИ, 1987. – 20 с.

Поступила 19.01.2022 г.

Информация об авторах

Фоломеев А.Е., кандидат технических наук, руководитель сектора стимуляции скважин отдела технологий ремонтно-изоляционных работ и обработки призабойной зоны скважин общества с ограниченной ответственностью «РН-БашНИПИнефть».

Вахрушев С.А., кандидат технических наук, начальник отдела технологий ремонтно-изоляционных работ и обработки призабойной зоны скважин общества с ограниченной ответственностью «РН-БашНИПИнефть».

Хатмуллин А.Р., специалист сектора стимуляции скважин отдела технологий ремонтно-изоляционных работ и обработки призабойной зоны скважин общества с ограниченной ответственностью «РН-БашНИПИнефть».

Малинин А.В., кандидат технических наук, заместитель генерального директора по исследованиям общества с ограниченной ответственностью «РН-БашНИПИнефть».

Ленченкова Л.Е., доктор технических наук, профессор кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газонефтяных месторождений, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

Туриянов А.Р., ведущий специалист лаборатории фильтрационных исследований общества с ограниченной ответственностью «РН-БашНИПИнефть».

Давиденко И.С., начальник отдела по повышению производительности резервуаров и геолого-технических мероприятий общества с ограниченной ответственностью «Соровскнефть».

UDC 622.276.7

REDUCING THE NEGATIVE IMPACT OF WORKOVER FLUIDS ON SOROVSKOE OILFIELD SANDSTONE FORMATION BY THEIR MODIFICATION

Aleksey E. Folomeev¹,
FolomeevAE@bnipi.rosneft.ru

Sergey A. Vakhrushev¹,
VakhrushevSA@bnipi.rosneft.ru

Arslan R. Khatmullin¹,
KhatmullinAR@bnipi.rosneft.ru

Andrey V. Malinin¹,
MalininAV@bnipi.rosneft.ru

Lyubov E. Lenchenkova²,
lenchenkova@mail.ru

Aidar R. Turiyanov¹,
TuriyanovAR@bnipi.rosneft.ru

Igor S. Davidenko³,
DavidenkoIS@bashneft.ru

¹ Limited Liability Company RN-BashNIPIneft,
86/1, Lenin street, Ufa, 450006, Russia.

² Ufa State Petroleum Technological University,
1, Kosmonavtov street, Ufa, 450064, Russia.

³ Limited Liability Company Sorovskneft,
5, Ordzhonikidze street, Tyumen, 625002, Russia.

Relevance. Sandstone reservoirs of Western Siberia are predominantly hydrophilic in nature and contain a wide variety of clay minerals. When exposed to the bottomhole zone of wells with such technological compositions as spacer fluids, killing fluids, acid compositions and other aqueous chemical reagents used during well servicing and workovers, well productivity decreases due to the decline of oil relative phase permeability and swelling of clay minerals of the rock. Reducing the negative impact of workover fluids can be achieved through the selection and adaptation of effective spacer fluids and surfactants, through a complex of analytical and laboratory studies.

The aim of the research is to select the effective spacer fluids and surfactants to reduce negative impact on the reservoir properties of the Sorovskoe oilfield BS⁰ formation.

Objects: spacer fluids, clay stabilizers and surfactants.

Methods. This aim was achieved through a review of domestic and foreign experience in the use of reagents – clay stabilizers and surfactants – in the conditions of hydrophilic clay sandstone reservoirs and a set of laboratory studies to assess the impact of spacer fluids on the formation rock by determining the swelling coefficient of disintegrated rock in these fluids and core tests under thermobaric conditions of the formation. The minimally effective dose of surfactants was determined based on the results of measuring the surface tension at the «spacer fluid – oil» phase boundary. The stability of the reagents under the temperature and salt aggression, as well as the assessment of the risks of the manifestation of incompatibility of the reagents with the formation fluids and the acid compositions was carried out by the bottle tests.

Results. The minimally effective dose of surfactant has been determined, as well as its stability to temperature and salt aggression under the reservoir conditions. The physicochemical compatibility of solutions of surfactants and spacer fluids was tested with oil from the BS⁰ formation of the Sorovskoe field and acid compositions used at the field. Based on the complex of studies carried out, it was found that surfactants based on quaternary ammonium compounds and spacer fluids based on sodium chloride (with a density of 1140 kg/m³) and potassium chloride (with a density of 1140 and 1070 kg/m³) provide the greatest core model permeability build-up. These fluids and reagents are recommended for use in wells workovers, as well as in the technology of acid treatment of the bottomhole zone in the conditions of the BS⁰ formation at the Sorovskoe field.

Key words:

Sorovskoe oilfield, spacer fluid, workover fluid, killing fluid, acidizing, clay swelling, relative phase permeability, surfactants, clay stabilizers, sandstone formation, core tests.

REFERENCES

1. Folomeev A.E., Faizov R.A., Sharifullin A.R., Mikhaylov A.G., Davidenko I.S. Kompleksny podkhod pri obosnovanii vybora tekhnologii borby s soleotlozheniem v neftedobyvayushchikh skvazhinakh [An integrated approach to substantiating the choice of technology to deal with scale deposition in oil producing wells]. *Inzhenernaya praktika*, 2018, no. 6–7, pp. 98–104.
2. Folomeev A.E., Davidenko I.S., Vakhrushev S.A., Mingalishev F.K., Sharifullin A.R., Faizov R.A., Razyapov R.K. Adaptation of the technology for bottom-hole zones treatment under conditions of scaling at the Sorovskoye field. *Oil Industry Journal*, 2019, no. 11, pp. 124–129. In Rus.
3. *Dopolnenie k tekhnologicheskoy skheme razrabotki Sorovskogo nefryanogo mestorozhdeniya v predelakh Vostochno-Vuemskogo litsenzionnogo uchastka*. Kn. 1 [Addition to the technological scheme of the Sorovskoe oil field development within the Vostochno-Vuemsky license area. B. 1]. Ed. by G.A. Mukhametzyanova. Ufa, BashNIPIneft Publ., 2015. 792 p.
4. Gajsin M.R., Folomeev A.E., Makatrov A. K., Telin A. G., Afanasiev I.S., Fedorov A.I., Emchenko O.V., Zajnullin A.V. The measurement of Val Gamburtzeva oil field core's wettability by different methods. *Territoriya Neftegaz*, 2011, no. 4, pp. 46–52. In Rus.
5. Minakov I.I. *Gidrofobizatsiya priskvazhimoy zony plasta sostavami na osnove PAV s tselyu intensivifikatsii dobychi nefii*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Hydrophobization of the near-wellbore formation zone with surfactant-based compositions to enhance oil production. Cand. Diss. Abstract]. Moscow, 2001. 19 p.
6. Vakhrushev S.A., Gamolin O.E., Belenkova N.G., Shaydullin V.A., Akhmerov I.A. Special aspects of selection of high-pressure well-

- killing technology at oilfields of Bashneft-Dobycha LLC (Russian). *Oil Industry*, 2018, no. 9, pp. 111–115. In Rus.
7. Dubkov I.B., Zencov Yu.V. Efficiency of hydrophobic acid compositions while down-the-hole treatment of jurassic layers of the Lovinsky oil field. *Drilling and oil magazine*, 2008, no. 2, pp. 44–45. In Rus.
 8. Kirillin V.I., Ashigyan D.G., Pisarev K.A., Grigorev S.Yu. *Stabilizator kollektorskiykh svoystv nefyanogo plasta* [Oil reservoir properties stabilizer]. Patent RF, no. 2566048, 2007.
 9. Shelepov V.V., Zaripov O.G., Fakhretdinov R.N., Zemtsov Yu.V. Voprosy intensivatsii dobychi nefi v polimiktovykh vysokoglinistykh kollektorakh [Problems of oil production intensification in high-clay polymictic reservoirs]. *Interval*, 1999, no. 7, pp. 2–6.
 10. Petrov N.A. *Sintez anionnykh i kationnykh PAV dlya primeneniya v nefyanoy promyshlennosti* [Synthesis of anionic and cationic surfactants for use in the oil industry]. Ufa, UGNTU Publ., 2008. 54 p.
 11. Li X., Chawla S., Durnie W., Vera J., Richard W. Correlation between critical micelle concentration and CO₂ corrosion inhibition efficiency of quaternary ammonium compounds. *CORROSION 2018*. Phoenix, NACE, 2018. 9 p.
 12. Geissler B., Jones A., Setinc M., Koerner A., Damon B. field trial findings of a novel sulfidogenesis inhibitory compound. *CORROSION 2019*. Nashville, NACE, 2019. 13 p.
 13. Yang Z., Wang Y., Zhan F., Wang R., Chen W., Ding M., Baofeng H. Investigation of high-efficient acidizing inhibitors: structure and anti-corrosion performance of novel indolizine derivatives. *CORROSION 2019*. Nashville, NACE, 2019. 17 p.
 14. Magadova L.A., Davletshina L.F., Vlasova V.D., Yunusov T.I., Merzlyakov K.K. Izucheniye sinergeticheskogo efekta smesi anionnykh i kationnykh PAV v sredakh razlichnoy kislotnosti [Study of the synergistic effect of a mixture of anionic and cationic surfactants in media of different acidity]. *Neftepromyslovaya khimiya. Materialy VI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (XIV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii)* [VI International Scientific and Practical Conference (XIV All-Russian Scientific and Practical Conference). Oilfield Chemistry]. Moscow, Gubkin Russian State University of Oil and Gas Publ., 2019. pp. 69–71.
 15. Gusakov V.N., Telin A.G., Pasyukov A.G., Malcev V.V., Kamenskiy A.Yu., Podkopaev Yu.A. Monitoring and a choice of bottomhole zones treatment technologies at RN-Yuganskneftegaz OOO fields. *Oil Industry Journal*, 2007, no. 11, pp. 57–61. In Rus.
 16. Economides M.J., Nolte K.G. *Reservoir stimulation*. 3rd ed. New York, John Wiley & Sons LTD Publ., 2000. 856 p.
 17. Gabidullin R.I. *Kompozitsionnye gidrofobizatory na osnove sevilena dlya obrabotki prizaboynykh zon nefyanykh skvazhin*. Avtoreferat Dis. Kand. Nauk [Sevilen-based composite water repellents for treatment of bottomhole zones of oil wells. Cand. Diss. Abstract]. Kazan, 2005. 19 p.
 18. Sameni A., Pourafshary P., Ghanbarzadeh M., Ayatollahi S. Effect of nanoparticles on clay swelling and migration. *Egyptian Journal of Petroleum*, 2009, vol. 24 (4), pp. 429–437.
 19. Assem A.I., Nasr-El-Din H.A., Harper T.L. A new class of permanent clay stabilizers. *SPE International Conference on Oilfield Chemistry*. Galveston, SPE, 2019. 11 p.
 20. Wang L. Clay stabilization in sandstone reservoirs and the perspectives for shale reservoirs. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2020, vol. 276, 59 p.
 21. Kristian M., Sokol S., Konstantinesku A. *Uvelichenie produktivnosti i priemistosti skvazhin* [Increase in productivity and injectivity of wells]. Translated from Rumanian. Moscow, Nedra Publ., 1985. 184 p.
 22. Ryabokon S.A. *Tekhnologicheskie zhidkosti dlya zakanchivaniya i remonta skvazhin* [Well completion and workover fluids]. Krasnodar, 2009. 338 p.
 23. Patel H., Santra A., Thaemlitz C. Functionalized layered nanomaterials: a next-generation shale inhibitor. *International Petroleum Technology Conference*. Dhahran, IPTC, 2020. 9 p.
 24. Kalfayan L.J., Watkins D.R. A new method for stabilizing fines and controlling dissolution during sandstone acidizing. *SPE California Regional Meeting*. Ventura, SPE, 1990. 8 p.
 25. Ayorinde A., Granger C., Thomas R.L. The application of fluoboric acid in sandstone matrix acidizing: a case study. *21st Annual Indonesian Petroleum Association Convention*. Jakarta, Indonesian Petroleum Association, 2020. 28 p.
 26. Almajid H.A., Shuwaikhat H.I., Zeid S.M.A., Addagalla A.K.V. An innovative approach using micro-emulsion treatment techniques to remove sandstone formation damage: lab testing and field application. *SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition*. Dammam, SPE, 2018. 10 p.
 27. Hall B.E. Workover fluids: Parts 1–5. *World Oil*, 1987, no. 5, pp. 111–114.
 28. Fu L., Liao K., Ge J., Zhang G., He Y., Wang X., Zhang S., Deng S. Study of ethylenediammonium dichloride as a clay stabilizer used in the fracturing fluid. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 179, pp. 958–965.
 29. Feng Q., Liu H., Peng Z., Zheng Y. Synthesis, characterization and evaluation of long-acting hyperbranched cationic polymer clay stabilizer used in water flooding. *Polymer Testing*, 2020, vol. 82, 11 p.
 30. Tariq Z., Kamal M.S., Mahmoud M., Shakil Hussain S.M., Hussaini S.R. Novel gemini surfactant as a clay stabilizing additive in fracturing fluids for unconventional tight sandstones: mechanism and performance. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, vol. 195, 11 p.
 31. Crowe C.W. Laboratory study provides guidelines for selecting clay stabilizers. *CIM/SPE International Technical Meeting*. Calgary, SPE, 1990. 7 p.
 32. Van Gijtenbeek K., Neyfeld A.P., Prudnikova A. One molar salt solutions used for clay control in waterbased frac fluids in West Siberia. *SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition*. Moscow, SPE, 2006. 8 p.
 33. Chilingarian G.V., Vorabutr P. *Drilling and drilling fluids, developments in petroleum science*. New York, Elsevier Scientific Publishing Co., 1981. 767 p.
 34. Civan F., Knapp R.M. Effect of clay swelling and fines migration on formation permeability. *Proceedings of the SPE Production Operations Symposium*. Oklahoma, SPE, 1987. pp. 475–483.
 35. OST 39-195-86. *Neft. Metod opredeleniya koeffitsienta vytesneniya nefi vodoy v laboratornykh usloviyakh* [SS 39-195-86. Oil. Method for determining the oil displacement coefficient by water in laboratory conditions]. Moscow, Oil Ministry Publ., 1987. 20 p.

Received: 19 January 2022.

Information about the authors

- Aleksey E. Folomeev**, Cand. Sc., head of branch, Limited Liability Company RN-BashNIPIneft.
Sergey A. Vakhrushev, Cand. Sc., head of department, Limited Liability Company RN-BashNIPIneft.
Arslan R. Khatmullin, specialist, Limited Liability Company RN-BashNIPIneft.
Andrey V. Malinin, Cand. Sc., deputy general director, Limited Liability Company RN-BashNIPIneft.
Lyubov E. Lenchenkova, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University.
Aidar R. Turiyanov, lead specialist, Limited Liability Company RN-BashNIPIneft.
Igor S. Davidenko, head of department, Limited Liability Company Sorovskneft.

УДК 546.161.541.127/.127.4

ПРОЦЕССЫ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ СЕПАРАЦИИ И ФЛОТАЦИИ В ОБОГАЩЕНИИ ИЛЬМЕНИТОВЫХ РУД ИЗ ВЬЕТНАМА И ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ПОЛУЧЕННЫХ КОНЦЕНТРАТОВ

Карелин Владимир Александрович¹,
vakarelin@tpu.ru

Ле Хай Шон²,
son.hut2006@gmail.com

Карелина Надежда Владимировна¹,
nvkarelina@yandex.ru

Ле Хуонг Тхи Май³,
huonghvc@gmail.com

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

² Технологический институт радиоактивных и редкоземельных элементов, Вьетнамский институт по Атомной энергии,
Вьетнам, 11513, г. Ханой, ул. Ланг Ха, 48, Донг Да.

³ Высший университет науки и технологий Вьетнамской академии науки и технологий,
Вьетнам, 11518, г. Ханой, ул. Хоанг Куок Вьет, район Кау Гиэй.

Актуальность исследования определяется созданием принципиально нового способа синтеза титановых порошков высокой степени чистоты из ильменитовых руд месторождений Вьетнама, содержащих в тяжелой фракции смесь ильменита с рутилом. Это одно из приоритетных направлений комплексного развития месторождений редких и редкоземельных элементов во Вьетнаме.

Цель: выбор условий, методов и последовательности проведения технологических операций по обогащению вьетнамских ильменитовых руд и последующей их химической переработки с получением высокочистого титана.

Объекты: ильменитовая руда месторождения Ха Тинь (Вьетнам) с высоким содержанием оксидов титана, железа, циркония и низким содержанием кремния, алюминия, редкоземельных элементов, ванадия, а также ильменитовый концентрат, полученный в результате обогащения исходной ильменитовой руды.

Методы: в процессе обогащения – электростатическая сепарация, флотация, использование коллекторов, активаторов и депрессоров, добавляемых к флотореагентам; при электролитическом синтезе титана – применение расплава в виде смеси фторидов лития, натрия и калия, обладающих минимальной температурой плавления, с добавкой тетрафторида титана; выбор условий запуска электролизера, катодной плотности тока, силы тока и напряжения для осаждения титана на катоде; исследование оптимальных условий выделения титанового порошка при низких температурах с использованием безводного фтороводорода.

Результаты. Показана перспективность использования методов электростатической сепарации и флотации при обогащении вьетнамских ильменитовых руд месторождения Ха Тинь. Получен ильменитовый концентрат с содержанием диоксида титана более 50 %. Обоснованы преимущества использования метода прямого фторирования ильменитового концентрата элементарным фтором, позволяющего обеспечить полноту его вскрытия и отделить летучие фториды титана, ниобия, ванадия и кремния от нелетучих – фторидов железа, циркония, гафния и церия. Это позволяет оптимизировать число стадий при дальнейшем применении TiF_4 в качестве материала для получения титанового порошка. При электролитическом получении титана обоснована необходимость применения расплава фторидных солей лития, натрия и калия, имеющих состав: LiF (0,465 M)- NaF (0,115 M)- KF (0,42 M), обладающего минимальной температурой плавления (454 °C) и пределами изменения концентрации K_2TiF_6 (25–30 %). При этом величины плотности тока и выхода по току приближаются к максимальным значениям – 3,5–4,0 A/cm² и 60–65 % соответственно. Содержание примесей в титановом порошке не превышает 0,135 %, что удовлетворяет требованиям для изготовления изделий из компактного титана.

Ключевые слова:

Ильменитовая руда и концентрат из Вьетнама, обогащение методами электростатической сепарации и флотации, электролиз в низкотемпературной среде фторидов щелочных металлов и титана, гранулометрический и химический составы титанового порошка.

Введение

В новейшей истории все большее значение приобретают материалы и изделия, предназначенные для работы в условиях повышенных механических нагрузок, давлений и температур (в так называемых «жестких» условиях). Наиболее часто используемый в этих условиях материал – титан и его сплавы, поэтому

возникает необходимость в создании технологии получения таких материалов высокой чистоты, удовлетворяющих вышеописанным требованиям. Сейчас единственной промышленной технологией получения титана является Кролл-процесс [1], основные недостатки которой – низкая производительность, большое количество токсичных выбросов и необходи-

мость использования магния на финишной стадии процесса.

Одним из ключевых процессов титановой технологии является обогащение основных титановых руд – ильменита и рутила. Вьетнам является крупнейшим производителем титановых руд в мире. Объем их производства превышает 8 % (пятое место). Обогащение ильменитовых руд во Вьетнаме обычно проводят гравитационными методами (на концентрационных столах) [2, 3], а для дальнейшего увеличения содержания ильменита в концентрате применяют методы магнитной сепарации [4, 5].

Однако такая технология обогащения не обладает высокой эффективностью, хотя и позволяет получать концентраты с высоким содержанием TiO_2 [6–8]. Поэтому для создания конкурентоспособной технологии и проведения процесса обогащения необходимо использовать более современные методы [9–11]. В настоящей работе авторами проведены исследования по изучению процессов обогащения вьетнамских ильменитовых руд методами электростатической сепарации и флотации.

Не менее важна химическая переработка полученных титановых концентратов. Для производства чистого порошка гидрида титана в качестве модификации Кролл-процесса был разработан АДМА-процесс [12]. Ключевым этапом этого процесса является введение газообразного водорода в реактор на каждой стадии процесса, включая восстановление, разделение фаз и охлаждение. Для снижения стоимости титанового порошка проведены исследования по разработке нескольких альтернативных процессов для того, чтобы Кролл-процесс сделать непрерывным, например $TiRO$ -процесс, разработанный CSIRO [13], процесс восстановления в паровой фазе, разработанный Д. Хансеном и др. [14], и процесс CSIR-Ti, разработанный Д. Вууреном и др. [15]. В MHR-процессе для получения металлического Ti при восстановлении TiO_2 используют Ca. В качестве восстановителей исследованы четыре различные формы Ca: гидрид CaH_2 , пары Ca и жидкий Ca [16].

В настоящее время разработано несколько современных процессов, позволяющих получать металлический титан. Наиболее известные из них FFC (Cambridge)-процесс [17], восстановление предварительно спеченной заготовки-брикета (PRP-процесс) [18], электролиз с использованием Ti-содержащего материала в качестве анода (USTB-процесс) [19], OS-процесс (Osaka-process) [20]. В последние несколько лет широкое распространение получил процесс электрорафинирования оксикаридов (Chinuka-процесс) [21]. Однако во всех перечисленных процессах в качестве исходного материала используется предварительно очищенный диоксид титана, и от его чистоты (содержания примесей) зависит качество синтезируемого металлического титана.

В этой статье авторами предложен процесс прямого фторирования вьетнамских ильменитовых концентратов элементарным фтором с последующим электролитическим восстановлением образовавшегося тетрафторида титана в расплаве фторидных солей щелочных металлов – лития, натрия и калия.

Такая технология позволит отказаться от использования вспомогательных веществ (например, магния в Кролл-процессе), улучшить экологическую ситуацию как на предприятии, так и вокруг него за счет резкого уменьшения токсичных выбросов. Производительность завода, использующего предложенную технологию, может варьироваться в широких пределах.

Материалы и методы

Выполнены исследования по обогащению и последующей химической переработке ильменитовых руд месторождения Ха Тинь (Вьетнам). Состав исходной ильменитовой руды (%): TiO_2 – 41,10; $FeO+Fe_2O_3$ – 25,89; ZrO_2 – 12,48; SiO_2 – 9,69; Al_2O_3 – 4,67; CeO_2 – 0,22; HfO_2 – 0,20; Nb_2O_5 – 0,16; V_2O_5 – 0,08. Общее содержание основных компонентов достигает 94,5 %, содержание микропримесей не превышает 5,5 %.

Обогащение ильменитовых руд проводили методами электростатической сепарации и флотации. Выбор этих методов определяется тем, что при использовании электростатического метода происходит отделение титановых минералов (рутила и ильменита) от пустой породы. Флотационный метод позволяет увеличить концентрацию титановых минералов в обогащенном продукте и в дальнейшем использовать его для последующей химической переработки. В результате фторирования полученного ильменитового концентрата образуется TiF_4 , из которого методами электролитического восстановления синтезировали титановый порошок.

Экспериментальные установки

При проведении исследований с использованием метода электростатической сепарации использовали электростатический сепаратор ЭЛКОР-1 с изменяющейся полярностью высоковольтных электродов. Диаметр и длина осадительного электрода (барабана) 240 и 250 мм соответственно, скорость его вращения 55–370 об/мин.

Флотационный процесс проводили с помощью флотационной машины ФМФ-3(л), в которой предварительно подготовленная исходная пульпа поступает в камеру флотационной машины. По вертикальному трубопроводу, совмещенному с валом импеллера, в нижнюю часть эжектируется воздух, обеспечивающий перемешивание пульпы и образование пены. Пенная фракция (концентрат) отводится из верхней части, а камерный продукт (пульпа) – из нижней части флотационной машины. Вместимость камеры 3 л, диаметр импеллера 55 мм.

Для проведения флотации ильменитовых руд в качестве коллектора использовали олеат натрия (натриевую соль олеиновой кислоты, NaOl). Перед флотацией взвешивали пробу исходной руды массой 100 г и 1–2 г NaOl. Эту смесь перемешивали в течение 3 минут. Воду для флотации очищали на установке методом обратного осмоса. Во флотационную машину наливали 1 л воды с температурой 22–25 °C и добавляли подготовленную пробу. После перемешива-

ния полученной смеси в течение 3–5 мин во флотационную машину добавляли еще 2 л воды так, чтобы общий ее объем составил 3 л. Флотацию проводили при барботировании воздуха с помощью эжектирующего блока импеллера. В процессе вспенивания частицы руды переходят в пену, которую собирали в верхней части аппарата и с помощью специальных

лопаток удаляли в сборную емкость. По окончании процесса флотации получали отдельно пенный и камерный продукты, из которых фильтрованием выделяли твердую фазу, высушивали и взвешивали [22].

В результате обогащения руд месторождения Ха Тинь (Вьетнам) получен ильменитовый концентрат, состав которого приведен в табл. 1.

Таблица 1. Состав основных компонентов ильменитового концентрата месторождения Ха Тинь (Вьетнам)

Table 1. Composition of the main components of ilmenite concentrate from the Ha Tinh deposit (Vietnam)

Компонент Component	TiO ₂	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	Всего
Содержание, % мас. Content, % wt.	51,74	23,31	16,73	3,35	2,48	0,06	0,23	1,02	0,14	0,05	99,11*

*Остальное – микропримеси.

*Microimpurities compose the rest of the content.

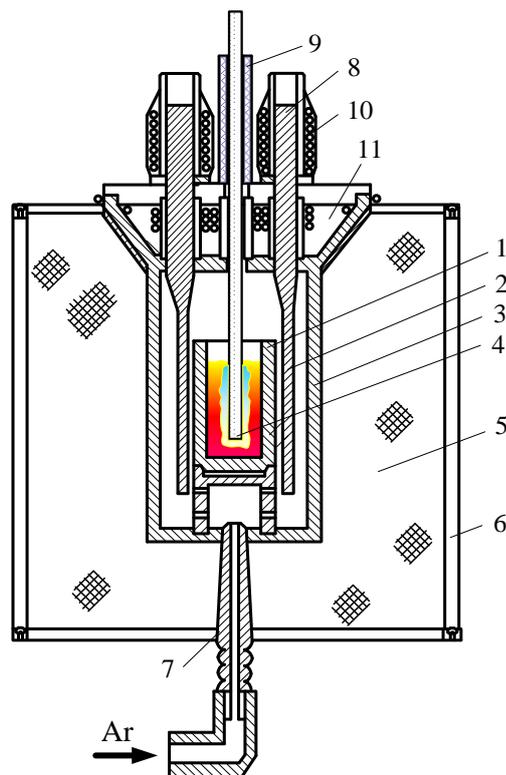


Рис. 1. Схема электролизера для синтеза титана: 1 – графитовый тигель (подключен к положительному полюсу источника питания); 2 – нагреватель из углеродсодержащего материала (состоит из 2-х частей); 3 – камера из углеродсодержащего материала; 4 – катод; 5 – теплоизоляция – порошок графита; 6 – металлический корпус; 7 – штуцер для подачи инертного газа (Ar); 8 – углеродные стержни для разогревания тигля; 9 – уплотнение катода из фторопласта; 10 – водяное охлаждение; 11 – головка электролизера – графит

Fig. 1. Diagram of an electrolytic cell for titanium synthesis: 1 – graphite crucible – anode; 2 – split graphite heater; 3 – graphite cell of the electrolyzer; 4 – cathode; 5 – thermal insulation – graphite powder; 6 – steel casing; 7 – inlet of argon; 8 – heater contact device; 9 – stuffing box seal of the cathode; 10 – water cooling; 11 – electrolyzer head – graphite

Концентрат указанного состава фторировали элементарным фтором на специальной установке [23]. В результате фторирования получали TiF₄, который направляли на электролитическое извлечение титанового порошка в расплаве фторидных солей щелочных металлов.

Электролиз проводили в аппарате, схема которого изображена на рис. 1. Нагреватель – 2 и внутренние части электролизера выполнены из углеродсодержащего материала и находятся в металлическом защитном корпусе – 5. Для обеспечения низкой теплоотдачи внутри металлического корпуса помещали тонкий графитовый порошок (мелкодисперсный углерод) – 4. В объем тигля из углерода – 1 засыпали исходные фторидные соли (LiF, NaF и KF·HF), которые при нагревании расплавились с образованием однородного расплава электролита (эвтектической смеси фторидных солей). HF использовали для уменьшения температур плавления LiF и NaF за счет образования их соответствующих гидрофторидов. На заключительной стадии расплав нагревали до ~600 °С и удаляли HF. В ходе процесса углеродный тигель подключали к положительному полюсу источника питания. Тигель рассчитан на загрузку ~3 кг электролита [24].

Основной недостаток такого электролизера состоит в том, что графитовые тигли пропускают расплав, поэтому в них невозможно длительное время проводить электролиз и после замены катода 5–6 раз процесс останавливали и графитовый тигель заменяли. Для устранения этого недостатка необходимо изменить конструкцию электролизера. Наиболее перспективной конструкцией является электролизер со слоем гарниссажа (рис. 2). Корпус аппарата выполнен в виде параллелепипеда из стальных листов с рубашкой охлаждения, через которую прокачивается вода. В вертикальной части корпуса расположены отверстия для электродов из графита, подключенных к положительному полюсу источника питания постоянного тока. Для нагревания расплава в режимах электролиза, запуска электролизера и поддержания необходимой температуры предназначены два нагревателя, на которые подается переменный ток.

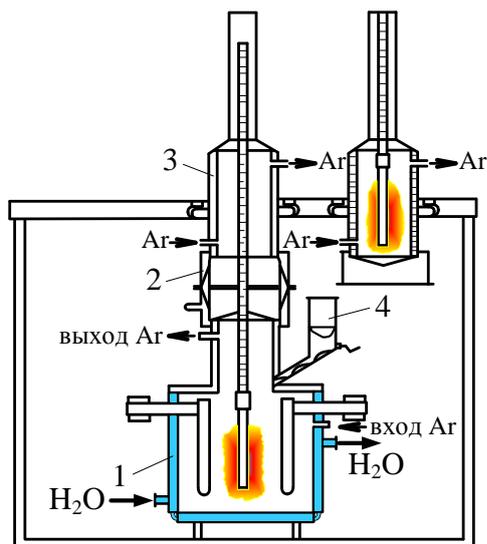


Рис. 2. Электролизер со слоем гарниссажа: 1 – стальной охлаждаемый водой корпус со слоем гарниссажа; 2 – разъемный шлюз; 3 – охлаждающая камера; 4 – бункер

Fig. 2. Electrolyzer with a layer of skull: 1 – steel water-cooled body with a layer of skull; 2 – detachable gateway; 3 – cooling chamber; 4 – bunker

Расплав электролита, соприкасаясь со стенками электролизера, затвердевает на них в виде корки (гарниссажа), предохраняющей стенки электролизера – 1 от коррозионного воздействия перешедших в жидкость фторидных солей. Образующийся на анодах элементный фтор отводится из верхней части электролизера. Образующаяся на аноде газовая фаза удаляется через специальное устройство, расположенное в верхней части электролизера. В шлюзовой камере – 2 имеются отсечные вентили для предотвращения попадания воздуха в охлаждающую камеру – 3 и электролизер при снятии охлаждающей камеры.

В конструкции электролизера предусмотрено специальное устройство, позволяющее переместить ка-

тод с выделившимся осадком в герметичную камеру, с последующей продувкой инертным газом (аргоном) для удаления остатков выделившегося в процессе элементного фтора. Для герметизации держателя катода используют гофрированную резиновую трубку. На нижнем конце держателя расположен катод, изготовленный из инертного во фторидных средах материала, например никеля. Замену никелевого стержня, подачу фторидных солей и удаление использованного электролита проводят в среде инертного газа. При этом обеспечиваются условия, не приводящие к нарушению герметичности емкости с образовавшимся осадком. В этих условиях осадок находится в течение нескольких часов, а затем его отмывают от солей электролита.

Результаты и обсуждение Применение электростатической сепарации для обогащения ильменитовых руд

При обогащении ильменитовых руд установлено, что при увеличении напряжения между электродами сепаратора с 25 до 35 кВ изменяется распределение основных компонентов титановых минералов (титана и железа) в 10-ти ячейках сепаратора (рис. 3). Показано, что Ti и Fe распределяются в ячейках с 1 по 5 в зависимости от приложенного напряжения. Распределение этих компонентов не изменяется при 30 кВ и более. Поэтому для обеспечения эффективности разделения напряжение, подаваемое на электростатический сепаратор, должно быть не менее 30 кВ.

Поведение основных примесей ильменитового концентрата – кремния, циркония и алюминия – в процессе обогащения методом электростатической сепарации показано на рис. 4. С увеличением напряжения между электродами сепаратора с 25 до 35 кВ область выделения оксидов кремния и циркония (рис. 4, а, б) смещается от 4–6 ячеек к 8–10 ячейкам. Это позволяет отделить эти оксиды от ильменита и рутила.

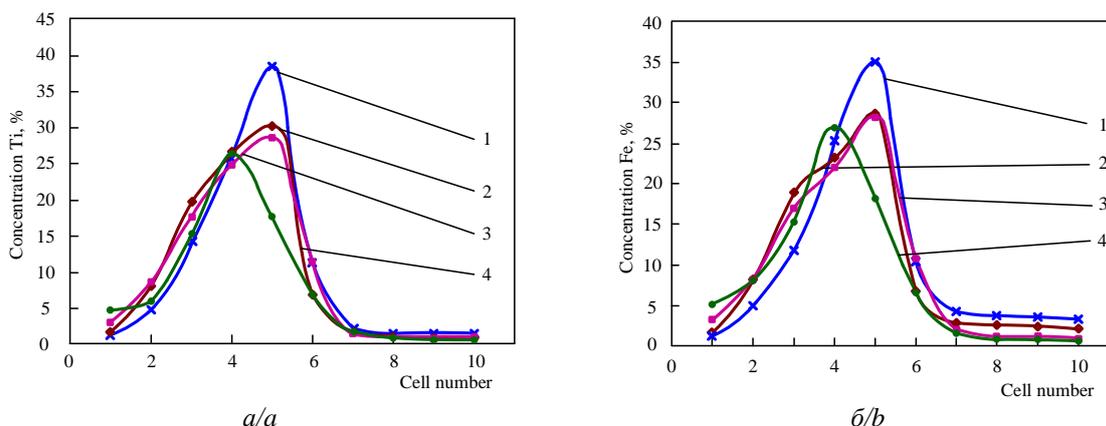


Рис. 3. Зависимость изменения содержания титана (а) и железа (б) в полученных фракциях в ячейках сепаратора от напряжения на электродах. Напряжение между электродами сепаратора (кВ): 1 – 25; 2 – 27,5; 3 – 30; 4 – 35

Fig. 3. Dependence of change of titanium (a) and iron (b) content in the obtained fractions in the separator cells on the voltage at the electrodes. Voltage between separator electrodes (kV): 1 – 25; 2 – 27,5; 3 – 30; 4 – 35

Отделить оксид алюминия от целевых титановых минералов гораздо сложнее. При увеличении напряжения между электродами сепаратора с 25 до 30 кВ Al_2O_3 по-прежнему выделяется вместе с основными минералами в 4–6 ячейках сепаратора. Только при увеличении напряжения до 35 кВ пик выделения Al_2O_3 смещается к 8–10 ячейкам (рис. 4, в).

Таким образом с учетом поведения основных компонентов примесей титановых минералов для их отделения от ильменита и рутила необходимо поддерживать напряжение между электродами сепаратора не менее 35 кВ.

Дальнейшее увеличение концентрации титана в целевой фракции необходимо проводить методом электромагнитной сепарации. Отделение ильменита и рутила в обогащенном продукте необходимо проводить методом электромагнитной сепарации, позволя-

ющим отделить обладающий магнетизмом ильменит от немагнитного рутила.

Флотация в процессах обогащения ильменита

Выбор оптимального времени флотации

Время – ключевой параметр процесса флотации. Определив его, можно рассчитать размеры как лабораторной, так и промышленной флотационной машины.

На рис. 5 показаны основные стадии флотации: перемешивание пробы в воде, начало процесса, образование пены и удаление пенного продукта. Для определения времени процесса флотации и выбора оптимального его значения через 1, 3, 5, 8, 10, 12 и 15 минут отбирали пробы пенного продукта и определяли в них количество твердого компонента и концентрации титана и железа.

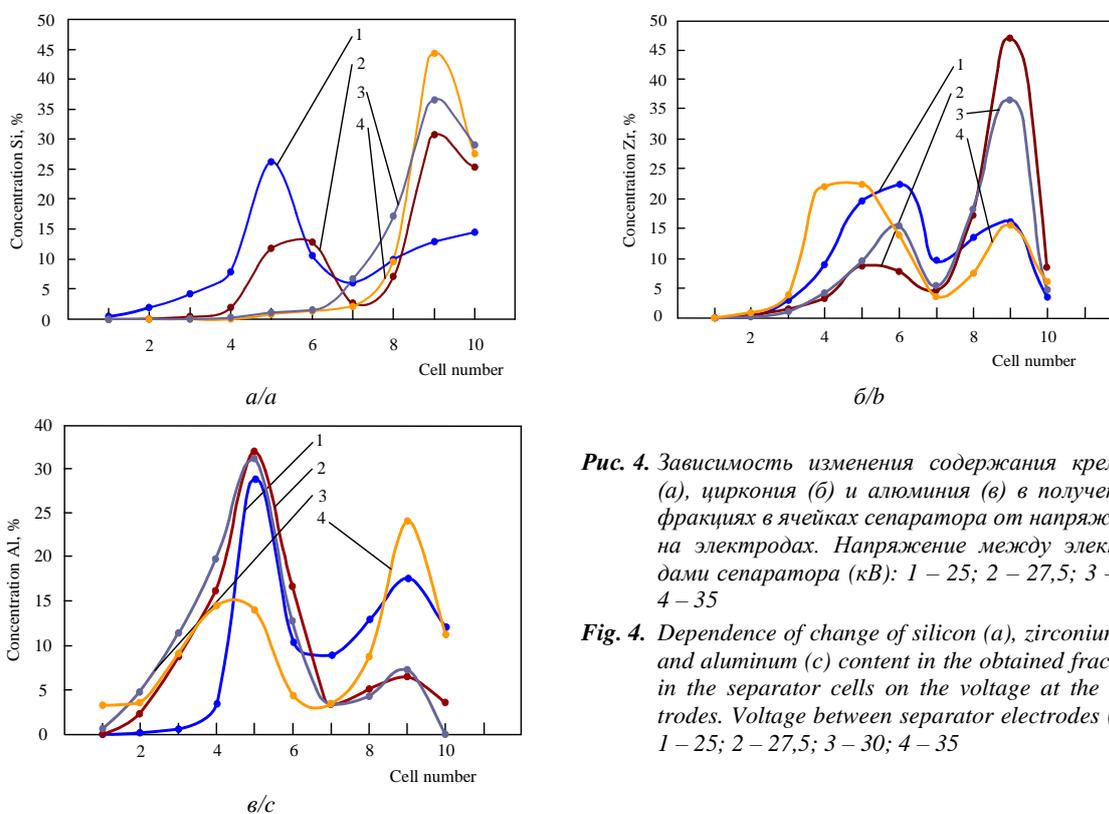


Рис. 4. Зависимость изменения содержания кремния (а), циркония (б) и алюминия (в) в полученных фракциях в ячейках сепаратора от напряжения на электродах. Напряжение между электродами сепаратора (кВ): 1 – 25; 2 – 27,5; 3 – 30; 4 – 35

Fig. 4. Dependence of change of silicon (a), zirconium (b) and aluminum (c) content in the obtained fractions in the separator cells on the voltage at the electrodes. Voltage between separator electrodes (kV): 1 – 25; 2 – 27,5; 3 – 30; 4 – 35

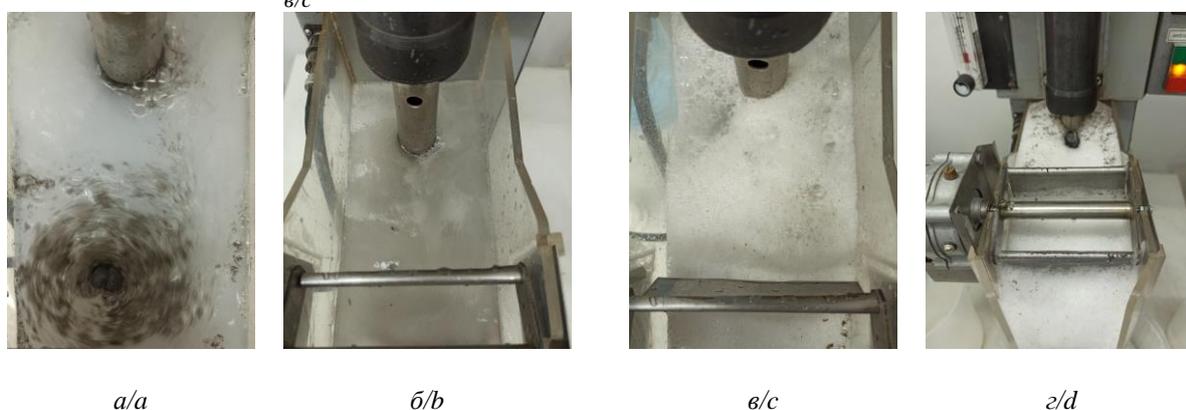


Рис. 5. Основные стадии процесса флотации: а) перемешивание пробы в воде; б) начало процесса; в) образование пены; г) удаление пенного продукта

Fig. 5. Main stages of flotation: a) mixing the sample in water; b) beginning of the process; c) foam formation; d) foam product removal

Изменение концентрации и степени обогащения титана (η) в пенный продукт от времени флотации представлены на рис. 6. Показано, что основная флотация протекает за 8 минут. Концентрация TiO_2 в пенной фракции возрастает с 30,45 до 37,13 %. Необходимо отметить, что количество полученного продукта со временем уменьшается.

Наибольшая степень обогащения, равная 84 %, достигается в течение 10 минут флотации. Однако концентрация титана в продукте постепенно снижается из-за попадания в него большого количества примесей. Таким образом, оптимальное время флотации изменяется в пределах от 5 до 10 мин, а наилучшие показатели достигаются через 8 мин после начала процесса.

Влияние количества олеата натрия на эффективность обогащения ильменита

В процессе флотации олеат натрия (NaOI) используют в качестве вспенивателя и собирателя для выделения частиц руды в пенную фазу. Концентрация NaOI является важным параметром, поскольку она влияет на способность к пенообразованию и на время проведения процесса. Если концентрация NaOI слишком велика, то процесс обогащения протекает быстро, но из-за слишком большого количества пены вместе с целевым компонентом руды в пенном продукте будут присутствовать другие примеси. Это приводит к тому, что степень извлечения продукта будет высокой, а содержание TiO_2 в нем – низким. Если концентрация NaOI слишком мала, то пенообразующая способность снижается, время проведения процесса сокращается, количество полученного пенного продукта уменьшается, что влияет на эффективность процесса. Поэтому концентрация NaOI является одним из основных параметров флотации.

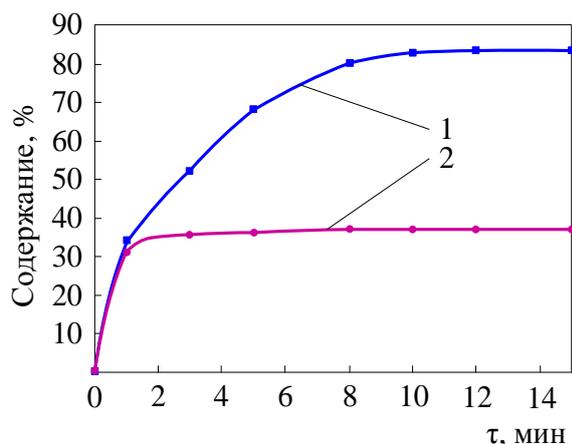


Рис. 6. Влияние времени на эффективность флотации: 1 – концентрация TiO_2 в продукте; 2 – степень обогащения титана

Fig. 6. Influence of time on flotation efficiency: 1 – TiO_2 concentration in the product; 2 – beneficiation degree of titanium

Для проведения исследований использовали 4 образца ильменитовой руды массой по 20 г, в которые добавляли 0,25; 0,5; 0,75 и 1,0 г NaOI. Полученные смеси тщательно перемешивали в течение 3 минут. Затем каждый из образцов (по отдельности) помещали во флотационную машину и смешивали с водой (объем 3 л). При этом NaOI растворялся в воде с образованием пенной фазы. Концентрация NaOI в растворах составила 0,09; 0,18; 0,27 и 0,36 г/л соответственно. Исследования проводили при $pH \sim 7$. Для корректировки кислотности среды использовали растворы 1 М NaOH и 0,8 М H_2SO_4 . На рис. 7 показаны результаты изменения концентрации и степени обогащения титана в пенную фракцию от концентрации NaOI.

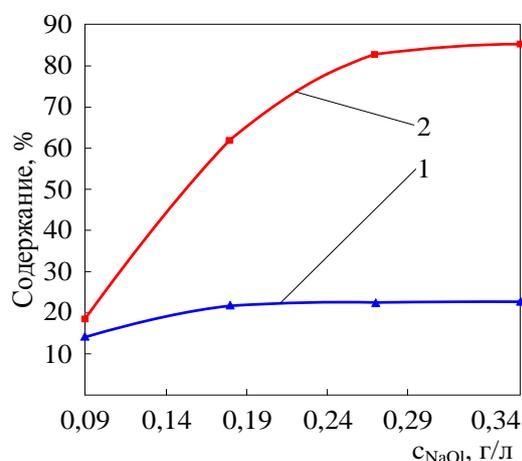


Рис. 7. Влияние концентрации NaOI на эффективность флотации: 1 – концентрация TiO_2 в продукте; 2 – степень обогащения титана

Fig. 7. Influence of NaOI concentration on flotation efficiency: 1 – TiO_2 concentration in the product; 2 – beneficiation degree of titanium

В растворе NaOI с концентрацией 0,09 г/л количество пены очень мало. На поверхности водной фазы образуется тонкая пленка пены. Частицы ильменитовой руды, переходящие из водного раствора в пенную пленку, не удерживаются в ней и переходят обратно в водную фазу. Процесс разделения происходит очень медленно. Из-за плохого разделения количество примесей в пенном продукте увеличивается. В него переходит только ~24 % твердой фазы от исходного количества, а степень извлечения не превышает 20 %.

При концентрации NaOI, равной 0,18 г/л, количество пенного продукта возрастает. Частицы ильменитовой руды начинают удерживаться слоем пены. В этих условиях время флотации не превышает 3 минут. Степень извлечения продукта через 3 минуты достигла 61 %, а содержание твердой фазы в нем составило ~36 %.

С увеличением концентрации NaOI в растворе до 0,27 и 0,36 г/л образуется достаточное для проведения флотации количество пенного продукта, которое

остаётся постоянным в течение 10 минут. Скорость образования продукта высокая, степень извлечения титана более 80 %, а содержание твердой фазы в продукте более 37 %.

Количество NaOH, необходимое для проведения флотации, зависит от кислотности рабочей среды. При величине pH=2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 и 10 выполнены исследования по изучению влияния кислотности среды на количество добавляемого NaOH. На рис. 8 показано, что в нейтральной и щелочной средах (при pH=6–9) для обеспечения высокой скорости образования пены в раствор объемом 3 л достаточно добавить 1 г NaOH, а с увеличением кислотности среды при pH=5 и 4 количество NaOH возрастает до 2,5 и 3 г соответственно.

Флотация (появление пены) начинается только при pH=3. При pH=2 пена вообще не образуется. Поэтому при увеличении кислотности среды необходимо использовать большее количество NaOH. Чем ниже pH среды (чем выше кислотность), тем большее количество NaOH необходимо добавлять в раствор.

Таким образом флотация протекает только при концентрации NaOH не менее 0,27 г/л. Степень обогащения титана может достигать 80 % при концентрации в пенной фракции ~37 % TiO₂. Флотацию ильменитовой руды лучше проводить в слабокислой или нейтральной средах (при pH=5–7).

Влияние концентрации TiO₂ в руде на эффективность флотации

На рис. 9, а показано, что эффективность флотации сильно зависит от концентрации титана в исходной руде. Чем больше концентрация титана в руде, тем выше степень извлечения и тем выше концентрация титана в полученном продукте. Это можно объяснить тем, что чем большее количество примесей находится в исходной руде, тем большее влияние они будут оказывать на флотацию ильменита. В то же время эти примеси будут переходить в пенную фазу и всплывать вместе с ильменитом.

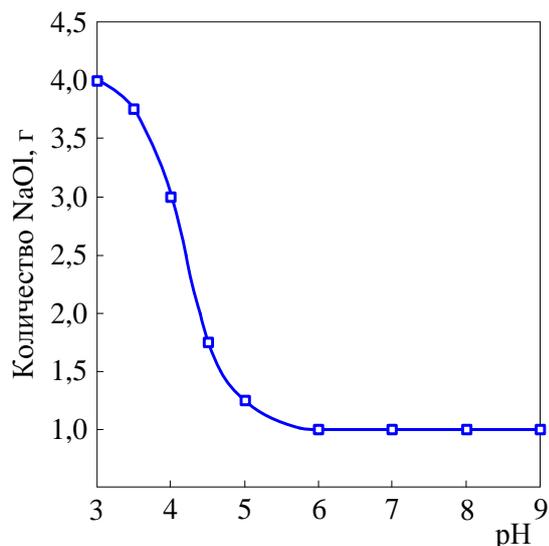


Рис. 8. Влияние кислотности среды на количество NaOH в процессе флотации

Fig. 8. Influence of medium acidity on the amount of NaOH in flotation

Кроме того, показатели процесса флотации ильменита улучшаются при его предварительной обработке. Такую обработку проводят окислителями и восстановителями для изменения заряда поверхности частиц. В результате возрастает реакционная способность коллектора (NaOH) и значительно улучшаются флотационные свойства частиц. В процессе окисления катионов Fe²⁺, находящихся на поверхности частиц ильменита, кислородом воздуха образуются Fe³⁺ по реакции: Fe²⁺–e⁻↔Fe³⁺. Комплексообразующая способность Fe³⁺ с коллектором гораздо выше, чем Fe²⁺, поэтому катионы Fe³⁺ будут переходить в пенную фазу. Эту особенность можно использовать и для разделения рутила и ильменита флотационным методом. Для этого необходимо провести процесс восстановления катионов Fe³⁺ в Fe²⁺. В этих условиях камерный продукт будет обогащаться ильменитом, а пенная фракция – рутилом. Разделение улучшается в среде H₂SO₄, NaF и Pb(NO₃)₂.

Эффективность флотации возрастает при концентрации TiO₂ в руде более 20 % и степени обогащения более 80 %. Концентрация TiO₂ в обогащенной фракции может достигать ~36 %. На рис. 9, б показаны результаты исследований изменения степени обогащения от концентрации TiO₂ в ильменитовой руде. Исследования проведены при pH=3,4–7 в течение 10 минут. Концентрация NaOH в исходном растворе равна 0,33 г/л.

Показано, что при концентрации титана в руде 25 % и выше степень обогащения изменяется незначительно и составляет ~86 %. При концентрации титана в руде менее 25 % концентрация TiO₂ в обогащенной фракции возрастает гораздо быстрее. Например, при концентрации TiO₂ в руде менее 40 % концентрация TiO₂ в пенной фракции возрастает с 38,91 до 43,60 (~на 5 %). На рис. 9, б показано, что при концентрации TiO₂ в исходной руде более 40 % концентрация TiO₂ в полученном продукте увеличивалась гораздо медленнее, хотя степень обогащения была высокой и достигла ~86 %. Причину этого можно объяснить высокой концентрацией FeO в руде, при которой ее флотационные свойства недостаточно хорошие. Следовательно, при использовании олеата натрия в качестве коллектора при флотации ильменита не обеспечивается полнота отделения титановых минералов от примесей. Для устранения этого недостатка флотацию необходимо проводить с помощью вспомогательных веществ (добавок).

Влияние добавок на эффективность отделения титана

Вспомогательные вещества (добавки) – это вещества, повышающие эффективность процесса. В процессе флотации вспомогательные вещества будут способствовать эффективному отделению тяжелых минералов от песков, одновременно увеличивая степень обогащения тяжелых минералов. Например, таким способом можно отделить тяжелые минералы (рутил, ильменит и циркон) от пустой породы (квар-

цевых песков) и отделить ильменит от рутила и циркона.

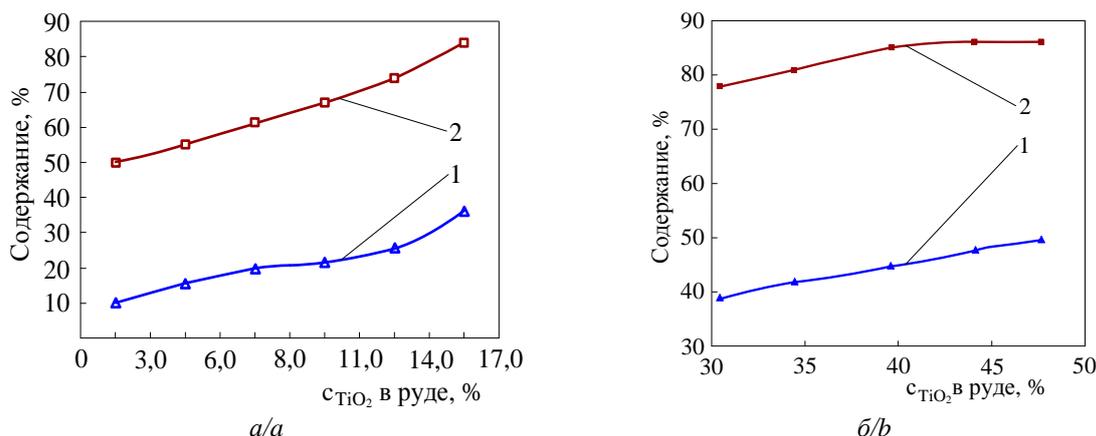


Рис. 9. Влияние концентрации TiO_2 в ильменитовой руде и пенной фракции на эффективность флотации (а), степень обогащения и концентрацию титана в пенной фракции (б): 1 – концентрация TiO_2 в пенной фракции; 2 – степень обогащения титана

Fig. 9. Influence of TiO_2 concentration in ilmenite ore and foam fraction on flotation efficiency (a), beneficiation degree and titanium concentration in foam fraction (b): 1 – TiO_2 concentration in the foam fraction; 2 – beneficiation degree of titanium

В качестве добавок применяют:

- ингибитор кварцевых песков – силикат натрия (Na_2SiO_3), способствующий отделению кварца и циркона от титаносодержащих минералов;
- анионный ингибитор – фторид натрия NaF , способствующий образованию анионных комплексов и подавляющий флотацию легких компонентов в рудной смеси;
- катионный вспомогательный компонент – ацетат свинца ($Pb(CH_3COO)_2$), улучшающий флотационные свойства тяжелых минералов в смеси.

Влияние силиката натрия на эффективность флотации

В процессах обогащения для подавления флотируемости кварцевых песков и увеличения флотационных свойств титановых руд в качестве ингибитора используют кремнефторид натрия Na_2SiF_6 . Недостаток его применения – сильная коррозия флотационного оборудования во фторидных средах. Изучим возможности использования силиката натрия (Na_2SiO_3) в качестве ингибитора кварцевых песков. Исследования проведены в

диапазоне концентраций Na_2SiO_3 от 0,083 до 0,5 г/л. На рис. 10, а показаны результаты влияния Na_2SiO_3 на флотационные свойства ильменитовой руды.

Показано, что с увеличением концентрации Na_2SiO_3 от 0,083 до 0,25 г/л эффективность флотации возрастает, концентрация Ti и степень обогащения постепенно увеличиваются. Однако при дальнейшем увеличении концентрации Na_2SiO_3 до 0,5 г/л эффективность процесса постепенно падает. Следовательно, оптимальная концентрация Na_2SiO_3 при флотации ильменитовой руды не превышает 0,25 г/л.

При проведении исследований по влиянию кислотности среды на степень обогащения ильменита с добавкой 0,25 г/л Na_2SiO_3 показано, что ее величина достигает 80 % в диапазоне $pH=4-7$ (рис. 10, б). Таким образом, в присутствии Na_2SiO_3 не только значительно снижаются флотационные свойства кварцевых песков, но и возрастает степень обогащения ильменита. Это также важно при отделении рутила от ильменита, когда значение pH изменяется с нейтрального ($pH=7$) до слабокислого ($pH=4$).

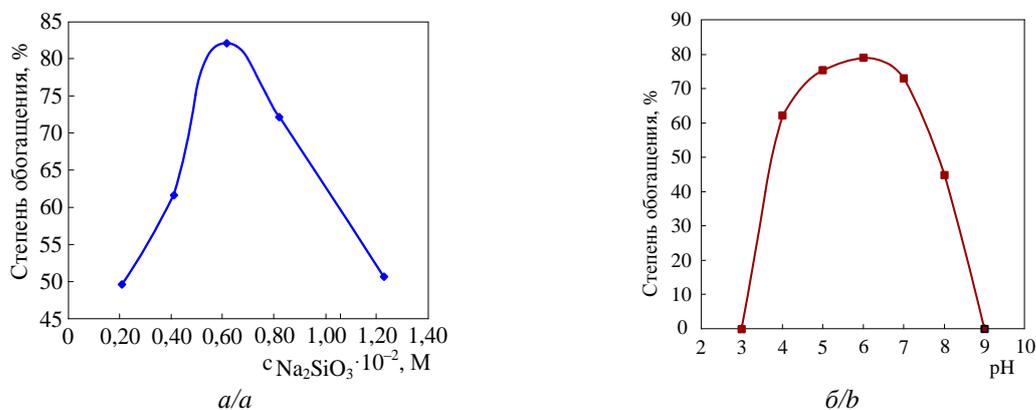


Рис. 10. Влияние концентрации силиката натрия (а) и pH среды при концентрации Na_2SiO_3 0,25 г/л (б) на эффективность обогащения ильменита: Состав водной фазы – ильменит- $NaOH$ - Na_2SiO_3

Fig. 10. Influence of sodium silicate concentration (a) and the medium pH at Na_2SiO_3 concentration of 0,25 g/l (b) on the efficiency of ilmenite beneficiation: composition of the aqueous phase – ilmenite- NaOl - Na_2SiO_3

Влияние ацетата свинца
 на степень обогащения ильменита

Обычно флотационные свойства тяжелых минералов, входящих в состав ильменита, изучают в присутствии $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ [25]. Однако при гидролизе этой соли образуется азотная кислота, которая понижает pH среды. Это отрицательно влияет на процесс флотации и приводит к увеличению добавляемого в раствор количества NaOl . Поэтому при проведении исследований по изучению влияния добавок Pb^{2+} на флотационные свойства ильменита использовали ацетат свинца $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2$. При его добавлении величина pH раствора практически не изменяется. Показано, что при концентрации $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, равной $8 \cdot 10^{-4}$ М, степень обогащения ильменита составляет ~80 % и при дальнейшем увеличении его концентрации практически не изменяется (рис. 11, а).

В диапазоне pH=4–12 исследовано влияние кислотности среды на степень обогащения ильменита с добавкой $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2$. Показано, что наибольшая эффективность флотации достигается в диапазоне pH=6–8 при степени обогащения более 80 % (рис. 11, б). Минимальная концентрация $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, необходимая для проведения процесса, составляет $\sim 8 \cdot 10^{-4}$ М. Таким образом, $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ улучшает флотацион-

ные свойства ильменитовой руды, поэтому может использоваться в качестве добавки (активатора), улучшающей показатели процесса.

Кроме того, в кислой среде, при pH=4,5–6,5 (рис. 12, а), при использовании фторида натрия обеспечивается максимальная эффективность флотации по сравнению с другими веществами. В этих условиях степень обогащения ильменита превышает 80 %, а при pH=5–6 достигает ~85 % (рис. 12, б). Следовательно, при использовании NaF в качестве ингибитора анионов степень обогащения ильменита стремится к максимальным значениям. При концентрации фторида натрия, равной $1 \cdot 10^{-2}$ М, возрастает степень обогащения и улучшается эффективность флотации.

Изменение степени обогащения ильменита в зависимости от pH среды при использовании в качестве ингибиторов и вспомогательных компонентов Na_2SiO_3 , $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ и NaF в процессе флотации ильменита представлено на рис. 13. Показано, что наиболее высокая степень обогащения ильменитовой руды достигается при концентрациях 0,025 г/л NaOl , 0,25 г/л Na_2SiO_3 , $8 \cdot 10^{-4}$ М $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, $1 \cdot 10^{-2}$ М NaF – в диапазонах pH=5–7, pH=4–7, pH=6–8 и pH=4,5–6,5 соответственно.

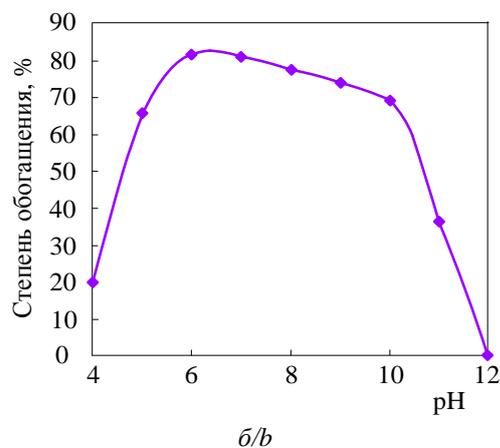
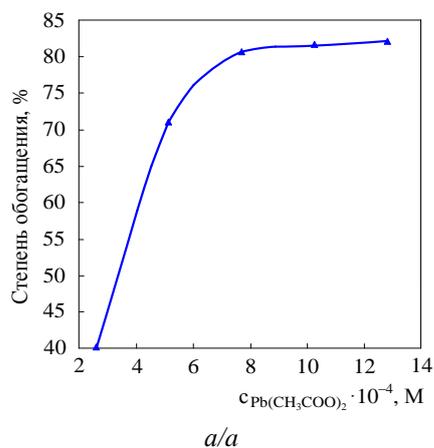
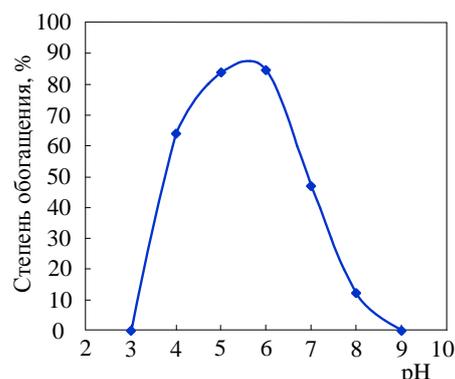
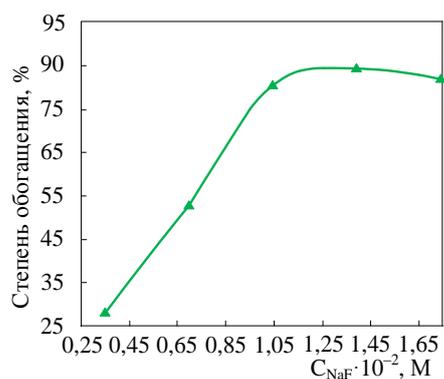


Рис. 11. Зависимость изменения степени обогащения ильменита от концентрации $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ (а) и от pH среды (б) (при концентрации $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ $8 \cdot 10^{-4}$ М)

Fig. 11. Dependence of the change in ilmenite beneficiation degree on $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ concentration (a) and on the medium pH (b) (at the concentration of $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ – $8 \cdot 10^{-4}$ М)



a/a

b/b

Рис. 12. Влияние NaF (а) и pH среды (б) при концентрации NaF $1 \cdot 10^{-2}$ М на флотационные свойства ильменита
Fig. 12. Influence of NaF (a) and medium pH (b) at the NaF concentration of $1 \cdot 10^{-2}$ M on ilmenite flotation properties

**Электролиз тетрафторида титана
 в расплаве фторидных солей**

Для выбора состава солевого расплава изучены температуры плавления различных смесей солей фторидов и хлоридов щелочных и щелочноземельных металлов. Показано, что наименьшей температурой плавления, равной $454 \text{ }^\circ\text{C}$, обладает эвтектика, имеющая состав LiF (0,465 М)–NaF (0,115 М)–KF (0,42 М) [26]. При добавлении в эту эвтектику 0,03 М TiF_4 ее температура возрастает до $510 \text{ }^\circ\text{C}$. Для проведения электролиза и удержания фторидного расплава в жидком состоянии необходим перегрев на $40\text{--}50 \text{ }^\circ\text{C}$, поэтому процесс необходимо проводить при $550\text{--}560 \text{ }^\circ\text{C}$. Образующийся расплав обладает рядом преимуществ. Потенциал разложения KF ($E^\circ = -2,925 \text{ В}$) выше по сравнению с NaF ($E^\circ = -2,713 \text{ В}$) и LiF ($E^\circ = -2,495 \text{ В}$). Аналогичное значение для TiF_4 ($E^\circ = -1,683 \text{ В}$), поэтому довольно легко провести процесс электролитического восстановления титанового порошка в эвтектической смеси фторидов щелочных металлов.

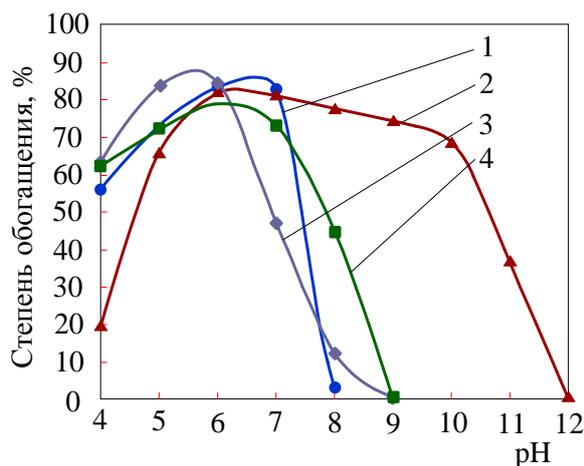


Рис. 13. Сравнение эффективности использования различных добавок в процессе флотационного обогащения ильменитовой руды: 1 – ильменит с NaOl; 2 – ильменит с NaOl и $8 \cdot 10^{-4}$ М $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2$; 3 – ильменит с NaOl и $1 \cdot 10^{-2}$ М NaF; 4 – ильменит с NaOl и $0,25 \text{ г/л Na}_2\text{SiO}_3$

Fig. 13. Comparison of the efficiency of using various additives in the flotation concentration of ilmenite ore: 1 – ilmenite with NaOl; 2 – ilmenite with NaOl and $8 \cdot 10^{-4}$ M $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2$; 3 – ilmenite with NaOl and $1 \cdot 10^{-2}$ M NaF; 4 – ilmenite with NaOl and $0,25 \text{ g/l Na}_2\text{SiO}_3$

Для выделения титанового порошка из катодного осадка необходим реагент, в котором компоненты солевого расплава (LiF, NaF, KF и K_2TiF_6) хорошо растворяются, а Ti-порошок остается в твердом состоянии. Такими свойствами обладает безводный HF, поэтому при взаимодействии осадка с HF Ti-порошок отделяется от солей электролита. При электролизе на аноде образуется фтор, но из-за высокой температуры

электролита анодный эффект происходит очень редко. KF медленно накапливается в расплаве, поскольку его большая часть выносится с катодным продуктом. NaF и LiF в электролите не влияют на электролиз, даже если их содержание в электролите достигает 50 %.

Для запуска электролизера его внутренний объем дегазировали, откачивая воздух и создавая в нем давление не более 100 мм рт.ст. Для удаления фторсодержащих газов электролит нагревали до $1000\text{--}1300 \text{ }^\circ\text{C}$. Затем электролизер заполняли предварительно очищенным аргоном. После этого в электролизере в токе Ag наплавляли фториды лития, натрия, калия и K_2TiF_6 . Для очистки электролита от солей элементов, обладающих высокой плотностью, и воды при разности потенциалов $1,3\text{--}1,8 \text{ В}$ и нагревании до $550 \text{ }^\circ\text{C}$ получали очищенный от примесей электролит. Увеличив силу тока I до $100\text{--}200 \text{ А}$, катодную плотность тока до $D_K = 2,7\text{--}3,0 \text{ А/см}^2$ и напряжение до $4,4\text{--}4,9 \text{ В}$, осаждали титановый порошок на никелевом катоде. При этом масса выделившегося титана приближалась к 60 % от теоретически возможной, а степень извлечения – к 84–87 %. Скорость выделения продукта электролиза на катоде составила $0,5 \text{ г/А-час}$. Одновременно на графитовом аноде происходило выделение фтора.

При электролизе K_2TiF_6 катодную плотность тока можно изменять в диапазоне от $0,003$ до $1,50 \text{ А/см}^2$. При ее величине $0,05 \text{ А/см}^2$ и ниже частицы образующегося осадка имеют пластинчатую форму, а при дальнейшем возрастании катодной плотности тока (D_K) на катоде образуются частицы дендритной формы. При увеличении D_K до $6,5 \text{ А/см}^2$ на катоде образуется порошок, имеющий аморфную структуру, который при незначительных механических сотрясениях сползает с катода в электролит. Выделить титан, имеющий аморфную структуру, из электролита довольно трудно. В связи с тем, что полученный порошок обладает высокой окисляемостью на воздухе, в дальнейшем перевести титан в слиток практически невозможно.

При уменьшении концентрации TiF_4 (менее $0,01 \text{ М}$) в расплаве фторидного электролита на границе раздела катод–расплав появлялись вспышки, поэтому необходимо постоянно пополнять электролит тетрафторидом титана. Для выделения титанового порошка из образовавшегося осадка необходимо сначала удалить катод из расплава, а затем охладить в среде аргона. При этом электролит в электролизере также переходил в твердое состояние. В полученном таким образом осадке содержалось до 33 % титана, остальное – фторидные соли электролита. Полученный материал измельчали, промывали уайт спиритом, из образовавшейся пульпы выделяли твердую фазу, которую высушивали ацетоном или этанолом. В табл. 2 показан химический и гранулометрический анализы тита-

нового порошка, полученного электролизом предварительно очищенного K_2TiF_6 и технической чистоты. Изменение выхода по току и по титану от начальной

концентрации K_2TiF_6 и температуры приведены на рис. 14.

Таблица 2. Химический и гранулометрический составы титанового порошка, полученного электролизом смеси $LiCl-KCl-NaCl-K_2TiF_6$

Table 2. Chemical and granulometric compositions of titanium powder obtained by electrolysis of a mixture of $LiCl-KCl-NaCl-K_2TiF_6$

Исходное соединение Initial material	Крупность класса, мм Class size, mm						Химический состав Chemical composition				RB переплавленного металла RB of remelted metal	
	0,51	0,154	0,112	0,075	0,048	-0,048	Zr	C	N	O		
Неочищенный K_2TiF_6 Raw K_2TiF_6												
Технической чистоты Technical purity	2,8	31	22	15,8	18	15,4	99,3	0,047	0,011	0,041		85
Предварительно очищенный Pre-cleaned material	13,7	30–50	15–18	7,6–12,7	8,4–19,8	5,2–17,6	99,8	0,03	0,002	0,05–0,07		84–85

В диапазоне концентраций 10–36 % K_2TiF_6 при 500–550 °С и катодной плотности тока $D_K=4,0$ А/см² выполнены исследования по изучению влияния концентрации K_2TiF_6 в расплаве. Максимальный выход по току получен при содержании в расплаве 25–30 % K_2TiF_6 . Оптимальная температура электролиза равна 520–540 °С. При проведении исследований с изменением начальной D_K от 0,9 до 6,8 А/см² сделан вывод о том, что наилучшие результаты получаются при 3,5–4,0 А/см². Степень выделения титана по силе тока составила 60–65 %, по массе полученного титанового порошка – 50–60 %. В образовавшемся катодном осадке находилось не менее 30 % металлического титана.

Перед отделением титанового порошка от застывшего электролита его измельчали до крупности 8–10 мм. Затем в герметичной аппаратуре измельченный продукт при температурах от –40 до –60 °С отмывали безводным жидким HF [27], затем при пониженном давлении и 50–60 °С для окончательного высушивания применяли этанол или/и ацетон. В результате в синтезированном титановом порошке содержание примесей было минимальным. Авторами показано, что при проведении отмывки в течение 3–4 часов полученный титановый порошок практически не окисляется. Гранулометрический состав очищенного порошка представлен в табл. 3, химический состав – в табл. 4.

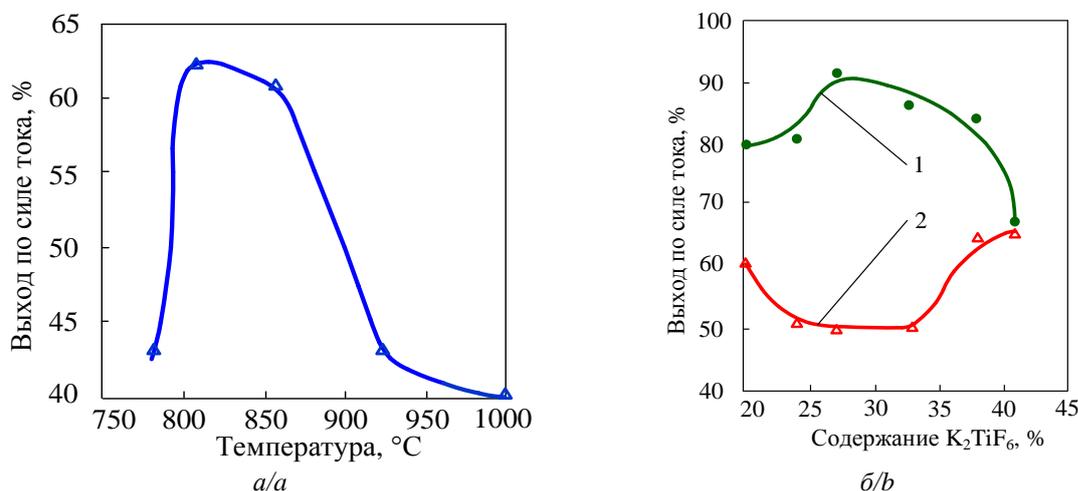


Рис. 14. Зависимость изменения выхода по току и металлу от температуры (а) и начальной концентрации K_2TiF_6 (б): 1 – выход по титану; 2 – выход по току

Fig. 14. Dependence of current and metal efficiency on temperature (a) and initial concentration of K_2TiF_6 (b): 1 – titanium recovery rate; 2 – current utilization rate

Таблица 3. Гранулометрический состав отмывтого титанового порошка

Table 3. Granulometric composition of the washed titanium powder

Размер частиц, мм Particle size, mm	+0,275	-0,275	-0,157	-0,108	-0,072	-0,058
Содержание/Content, %	5–11	7–9	14–21	9–12	16–21	31–39

После получения титанового слитка методом электронно-лучевой плавки твердость компактного титана составила НВ=165–175 МПа и он обладал высокой пластичностью. Из него и титановых сплавов были изготовлены различные изделия, например кольца, толщина стенок которых не превышала 0,4 мм.

Таблица 4. Концентрация примесей в полученном порошке электролитического титана

Table 4. Content of impurities in the washed powder of electrolytic titanium

Примеси Impurities	Концентрация примесей, % Impurity concentration, %		Элементы Elements	Концентрация примесей, % Impurity concentration, %	
	в титановом порошке in titanium powder	в исходном K_2TiF_6 in raw K_2TiF_6		в титановом порошке in titanium powder	в исходном K_2TiF_6 in raw K_2TiF_6
O	0,06	–	Si	0,04	0,09
N	0,002	–	Cr	<0,004	0,04
C	<0,04	–	Co	0,04	0,09
Fe	0,013	0,035	Mg	<0,01	–
Ni	0,007	<0,005	Mo	<0,01	–
Cu	<0,0009	0,0009	Ce	0,0019	–
Ti	0,0019	0,009	B	0,9 г/т	–
Mn	0,0018	<0,00182	W	<0,009	–

Заключение

При проведении исследований по обогащению ильменитовых руд и химической переработке полученных концентратов месторождения Ха Тинь (Вьетнам) показано, что:

- в процессе электростатической сепарации при увеличении напряжения между электродами сепаратора до 30 кВ тяжелые титановые компоненты, концентрирующиеся в 1–6 ячейках, можно отделить от пустой породы, собирающейся в 8–10 ячейках сепаратора;
- во флотационном процессе при использовании в качестве собирателя (коллектора) олеата натрия (NaOl) диапазон изменения pH среды составляет 5–7;

- с увеличением pH среды возрастает концентрация NaOl; при pH среды меньше 2 флотация невозможна, поскольку не происходит образования пены; продолжительность проведения процесса изменяется в пределах 5–10 мин; оптимальное время – 8 мин;
- при использовании в качестве ингибитора Na_2SiO_3 эффективность флотации снижается, но концентрация титана в пенной фракции возрастает, поэтому Na_2SiO_3 можно использовать для увеличения концентрации целевых компонентов в обогащенной фракции;
- в процессе обогащения ильменита в присутствии $\sim 8 \cdot 10^{-4}$ М $Pb(CH_3COO)_2$ увеличивается диапазон оптимальных значений pH среды (pH = 5–10), однако при этом степень обогащения снижается с ~ 85 до ~ 82 %;
- среди исследованных ингибиторов и добавок специфическими свойствами обладает фторид натрия; в среде $1 \cdot 10^{-2}$ М NaF степень обогащения ильменита возрастает до 85 %. В то же время диапазон оптимальных значений pH среды уменьшается и смещается в кислую среду (pH=4–6);
- в ходе электролитического синтеза титанового порошка подтвержден состав солевых компонентов щелочных металлов (0,465 М LiF–0,115 М NaF–0,42 М KF), обладающих минимальной температурой плавления, равной 454 °С;
- при добавлении в указанную эвтектику 0,03 М TiF_4 ее температура возрастает на 40–50 °С, но при 550–560 °С возможно осуществить процесс электролиза с выходом по току ~ 60 %, степенью выделения титана – 84–87 % и скоростью его катодного осаждения не менее 0,5 г/А·час;
- в процессе электролиза образуется титановый порошок, химический и гранулометрический составы которого, а также твердость, отвечают требованиям к материалу для изготовления изделий из компактного титана и его сплавов.

Представленные в статье исследования поддержаны СЕ Программой Томского политехнического Университета и Вьетнамского института по Атомной энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kroll W.J. Ductile titanium // Trans. Electrochem. Soc. – 1940. – V. 112. – P. 35–47.
2. Reactive jet and cyclonic attrition analysis of ilmenite in chemical looping combustion systems / T. Nelson, J.G. Watt, D. Laudal, H. Feilen, M. Mann, S. Srinivasacharb // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2019. – V. 91. – Article number 102837.
3. Rejith R.G., Sundararajan M. Combined magnetic, electrostatic, and gravity separation techniques for recovering strategic heavy minerals from beach sands // Marine Georesources & Geotechnology. – 2018. – V. 36. – № 8. – P. 959–965.
4. Preconcentration of ultrafine ilmenite ore using a superconducting magnetic separator / S. Shen, Z. Yuan, J. Liu, Q. Meng, H. Hao // Powder Technology. – 2020. – V. 360. – P. 1–9.
5. Эдильбаев А.И. Технология сухого обогащения ильменитовых руд Сатпаевского месторождения // Горный журнал. – 2009. – № 6. – С. 70–71.
6. Обогащение черного титаномагнетитового концентрата методом мокрой магнитной сепарации / А.С. Атамаджиди, К.В. Гончаров, Т.В. Олюнина, Г.Б. Садыхов // Цветные металлы. – 2018. – № 9. – С. 19–24.
7. Гришкин Н.Н. Исследование на обогатимость ильменит-рутил-цирконовых песков Тарского месторождения с получением титаносодержащих концентратов // Обогащение руд. – 2005. – № 4. – С. 47–48.
8. Минеральный состав отходов обогащения титаномагнетитовых руд Кусинского месторождения (Южный Урал) / В.И. Попова, В.А. Попов, В.А. Муфтахов, В.А. Котляров // Минералогия. – 2016. – № 2. – С. 70–81.
9. Махоткина Е.С., Шубина М.В. Химическая переработка отходов обогащения титаномагнетитовых руд Кусинского месторождения // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2018. – Т. 9. – № 2. – С. 71–73.
10. Шавакулева О.П. Разработка комбинированной технологии обогащения труднообогатимой титано магнетитовой руды Копанского месторождения: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Магнитогорск, 2007. – 19 с.
11. Чижевский В.Б., Шавакулева О.П. Обогащение титаномагнетитовых руд с целью получения кондиционного ильменитового

- го концентрата // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2013. – № 4. – С. 10–13.
12. Semi-continuous magnesium-thermal method for producing pure titanium: Patent 8007562 B2 USA. Fil. 08.16.2010; Publ. 04.30.2011.
 13. Doblin C., Chryst A., Monch A. Titanium powder from the TiRO™ process // Key Engineering Materials. – 2012. – V. 520. – P. 95–100.
 14. Hansen D.A., Gerdemann S.J. Producing titanium powder by continuous vapor-phase reduction // JOM. – 1998. – V. 50. – № 11. – P. 56–58.
 15. Van Vuuren D.S., Oosthuizen S.J., Heydenrych M.D. Titanium production via metallothermic reduction of TiCl₄ in molten salt: Problems and products // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2011. – V. 111. – № 3. – P. 141–147.
 16. Froes F.H. Titanium and other light metals: let's do something about cost // JOM. – 1998. – V. 50. – № 9. – P. 15.
 17. Chen G.Z., Fray D.J., Farthing T.W. Direct electrochemical reduction of titanium dioxide to titanium in molten calcium chloride // Nature. – 2000. – V. 407. – P. 361–364.
 18. Okabe T.H., Oda T., Mitsuda Y. Titanium powder production by preform reduction process (PRP) // Journal of Alloys and Compounds. – 2004. – V. 364. – № 1–2. – P. 156–163.
 19. Jiao S.Q., Zhu H.M. Electrolysis of Ti₂CO solid solution prepared by TiC and TiO₂ // Journal of Alloys and Compounds. – 2007. – V. 438. – P. 243–246.
 20. Suzuki R.O., Ono K. Direct reduction processes for titanium oxide in molten salt // Journal of the Minerals, Metals and Materials Society. – 2007. – V. 59. – № 1. – P. 68–71.
 21. Titanium metal production via oxycarbide electrorefining / D. Jewell, S.Q. Jiao, M. Kurtanjek, D.J. Fray. International Titanium Association, 2012. URL: https://cdn.ymaws.com/titanium.org/resource/resmgr/2010_2014_papers/JewellDaniel_2012.pdf (дата обращения 15.12.2021).
 22. Применение процесса флотации для обогащения ильменитовых руд из Вьетнама / Ш.Х. Ле, Т.Б. Киеу, В.А. Карелин, И.И. Жерин, Н.В. Карелина, А.А. Смороков // Бутлеровские сообщения. – 2021. – Т. 67. – № 8. – С. 1–9.
 23. Thermodynamics and kinetics research of the fluorination process of the concentrate rutile / V.A. Karelin, Son Hai Le, N.V. Karelina, A.N. Strashko, A.V. Sazonov, H.M.T. Le // Metals. – 2022. – V. 12. – Iss. 1. – Article Number 34.
 24. Fluorination of rutile, electrochemical reduction of titanium fluoride to titanium, and its separation from the electrolyte salts melt / V.A. Karelin, F.A. Voroshilov, A.N. Strashko, A.V. Sazonov, N.V. Karelina // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2020. – V. 55. – Iss. 5. – P. 1111–1118.
 25. Bulatovic S.M. Handbook of flotation reagents: chemistry, theory and practice. V. 2: Flotation of gold, PGM and oxide minerals // 25. Flotation of Titanium Minerals. – P. 180. – September 1, 1991. URL: https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/910106/mod_resource/content/1/25---Flotation-of-Titanium_2010_Handbook-of-Flotation-Reagents--Chemistry--T.pdf (дата обращения 15.09.2021).
 26. Сухотин А.М. Справочник по электрохимии. – Л.: Химия, 1981. – 488 с.
 27. Titanium powder segregation out of cathode deposit of titanium electrolyzers / V.A. Karelin, A.N. Strashko, V.I. Sobolev, A.V. Sazonov, N.V. Karelina // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2018. – V. 53. – Iss. 5. – P. 856–863.

Поступила 10.01.2022 г.

Информация об авторах

Карелин В.А., доктор технических наук, профессор отделения ядерного топливного цикла Инженерной ядерно-технологической школы Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Ле Хай Шон, начальник лаборатории Института технологии радиоактивных и редкоземельных элементов Вьетнамского института по Атомной энергии.

Карелина Н.В., аспирант отделения ядерного топливного цикла Инженерной ядерно-технологической школы Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Ле Хуонг Тхи Май, доктор технических наук, профессор Высшего университета науки и технологий Вьетнамской академии науки и технологий.

UDC 546.161.541.127/.127.4

PROCESSES OF ELECTROSTATIC SEPARATION AND FLOTATION IN THE BENEFICIATION OF ILMENITE ORES FROM VIETNAM AND CHEMICAL PROCESSING OF THE OBTAINED CONCENTRATES

Vladimir A. Karelin¹,
vakarelin@tpu.ru

Son H. Le²,
son.hut2006@gmail.com

Nadezhda V. Karelina¹,
nvkarelina@yandex.ru

Huong Le Thi Mai³,
huonghvc@gmail.com

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

² Institute for Technology of Radioactive and Rare Earth Elements, Vietnam Atomic Energy Institute,
48, Lang Ha, Dong Da, Hanoi, 11513, Vietnam.

³ Graduate University of Science and Technology, Vietnam academy of Science and Technology,
Hoang Quoc Viet street, Cau Giay district, Vietnam.

The relevance of the study is determined by the creation of a fundamentally new method for the synthesis of titanium powders of high purity from ilmenite ores of Vietnam deposits, containing a mixture of ilmenite with rutile in the heavy fraction. This is one of the priority areas for the integrated development of deposits of rare and rare earth elements in Vietnam.

The main aim: selection of conditions, methods and sequence of technological operations for the beneficiation of Vietnamese ilmenite ores and their subsequent chemical processing to obtain high-purity titanium.

Objects: ilmenite ore of the Ha Tinh deposit (Vietnam) with a high content of oxides of titanium, iron, zirconium and a low content of silicon, aluminum, rare earth elements, vanadium, as well as ilmenite concentrate obtained as a result of enrichment of the original ilmenite ore.

Methods: in the beneficiation process – electrostatic separation, flotation, the use of collectors, activators and depressants added to flotation reagents; in the electrolytic synthesis of titanium – the use of a low-melting eutectic of fluoride salts of alkali metals with the addition of titanium tetrafluoride; selection of the conditions for starting the electrolyzer, cathode current density, current and voltage for the deposition of titanium on the cathode; investigation of the optimal conditions for the release of titanium powder at low temperatures using anhydrous hydrogen fluoride.

Results. The prospects of using the methods of electrostatic separation and flotation in the dressing of Vietnamese ilmenite ores of the Ha Tinh deposit are shown. An ilmenite concentrate with a titanium dioxide content of more than 50 % was obtained. The advantages of using the method of direct fluorination of an ilmenite concentrate with gaseous fluorine are substantiated, which makes it possible to ensure both the completeness of the decomposition of the solid phase and to separate the fluorides of titanium, niobium, vanadium and silicon that pass into the gas phase from those remaining in the condensed state – fluorides of iron, zirconium, hafnium and cerium. This allows you to optimize the number of stages in the subsequent processing of titanium tetrafluoride and the synthesis of metallic titanium. In titanium electrolysis, the authors have substantiated the use of composition of the eutectic of fluoride salts of alkali metals LiF (0,465 M)-NaF (0,115 M)-KF (0,42 M), which has a minimum melting point (454 °C) and the range of changes in the concentration of K₂TiF₆ (25–30 %). In this case, the values of current density and current efficiency approach the maximum values of 3,5–4,0 A/cm² and 60–65 %, respectively. The content of impurities in titanium powder does not exceed 0,135 %, which meets the requirements for the manufacture of products from compact titanium.

Key words:

Ilmenite ore and concentrate from Vietnam, beneficiation by electrostatic separation and flotation, electrolysis in low-melting eutectic of alkali metal and titanium fluorides, granulometric and chemical compositions of titanium powder.

The research introduced in the paper are supported by the Strategic Development Program of the Tomsk Polytechnic University and Vietnam Atomic Energy Institute.

REFERENCES

1. Kroll W.J. Ductile titanium. *Trans. Electrochem. Soc.*, 1940, vol. 112, pp. 35–47.
2. Nelson T., Watt J.G., Laudal D., Feilen H., Mann M., Srinivasacharb S. Reactive jet and cyclonic attrition analysis of ilmenite in chemical looping combustion systems. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2019, vol. 91, Article number 102837.
3. Rejith R.G., Sundararajan M. Combined magnetic, electrostatic, and gravity separation techniques for recovering strategic heavy minerals from beach sands. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2018, vol. 36, no. 8, pp. 959–965.
4. Shen S., Yuan Z., Liu J., Meng Q., Hao H. Preconcentration of ultrafine ilmenite ore using a superconducting magnetic separator. *Powder Technology*, 2020, vol. 360, pp. 1–9.

5. Edilbaev A.I. Technology of ilmenite ores dry enrichment of the Satpaevsky deposit. *Mining journal*, 2009, no. 6, pp. 70–71. In Rus.
6. Atmadzhidi A.S., Goncharov K.V., Olyunina T.V., Sadyhov G.B. Beneficiation of crude titanomagnetite concentrate by wet magnetic separation. *Non-ferrous metals*, 2018, no. 9, pp. 19–24. In Rus.
7. Grishkin N.N. Washability analysis of the of ilmenite-rutile-zircon sands of the Tara deposit with the production of titanium-containing concentrates. *Ore beneficiation*, 2005, no. 4, pp. 47–48. In Rus.
8. Popova V.I., Popov V.A., Muftahov V.A., Kotlyarov V.A. Mineral composition of tailings of titanomagnetite ores beneficiation of the Kusinsky deposit (Southern Ural). *Mineralogy*, 2016, no. 2, pp. 70–81. In Rus.
9. Shubina M.V., Mahotkina E.S. Chemical processing of tailings of titanomagnetite ores of the Kusinskoye deposit. *Actual problems of modern science, technology and education*, 2018, vol. 9, no. 2, pp. 71–73. In Rus.
10. Shavakuleva O.P. *Razrabotka kombinirovannoy tekhnologii obogashcheniya trudnoobogatimoy titano magnetitovoy rudy Kopanskogo mestorozhdeniya*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Development of a combined technology for enrichment of refractory titanium-magnetite ore of the Kopanskoye deposit. Cand. Diss. Abstract]. Magnitogorsk, 2007. 19 p.
11. Chizhevskiy V.B., Shavakuleva O.P. Beneficiation of titanomagnetite ores in order to obtain conditioned ilmenite concentrate. *Bulletin of the Moscow State Technical University named after G.I. Nosov*, 2013, no. 4, pp. 10–13.
12. Goldsteins L. *Semi-continuous magnesium-thermal method for producing pure titanium*. Patent 8007562 B2. USA, 2011.
13. Doblin C., Chryst A., Monch A. Titanium powder from the TiRO™ process. *Key Engineering Materials*, 2012, vol. 520, pp. 95–100.
14. Hansen D.A., Gerdemann S.J. Producing titanium powder by continuous vapor-phase reduction. *JOM*, 1998, vol. 50, pp. 56–58.
15. Van Vuuren D.S., Oosthuizen S.J., Heydenrych M.D. Titanium production via metallothermic reduction of TiCl₄ in molten salt: Problems and products. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2011, vol. 111, no. 3, pp. 141–147.
16. Froes F.H. Titanium and other light metals: let's do something about cost. *JOM*, 1998, vol. 50, no. 9, pp. 15.
17. Chen G.Z., Fray D.J., Farthing T.W. Direct electrochemical reduction of titanium dioxide to titanium in molten calcium chloride. *Nature*, 2000, vol. 407, pp. 361–364.
18. Okabe T.H., Oda T., Mitsuda Y. Titanium powder production by preform reduction process (PRP). *Journal of Alloys and Compounds*, 2004, vol. 364, no. 1–2, pp. 156–163.
19. Jiao S.Q., Zhu H.M. Electrolysis of Ti₂CO solid solution prepared by TiC and TiO₂. *Journal of Alloys and Compounds*, 2007, vol. 438, pp. 243–246.
20. Suzuki R.O., Ono K. Direct reduction processes for titanium oxide in molten salt. *Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, 2007, vol. 59, no. 1, pp. 68–71.
21. Jewell D., Jiao S.Q., Kurtanek M., Fray D.J. *Titanium metal production via oxycarbide electrorefining*. International Titanium Association, 2012. Available at: https://cdn.ymaws.com/titanium.org/resource/resmgr/2010_2014_papers/JewellDaniel_2012.pdf (accessed 15 December 2021).
22. Le Sh.H., Kieu T.B., Karelin V.A., Zherin I.I., Karelina N.V., Smorokov A.A. Application of flotation process for beneficiation of ilmenite ores from Vietnam. *Butlerov messages*, 2021, vol. 67, no. 8, pp.1–9.
23. Karelin V.A., Son Hai Le, Karelina N.V., Strashko A.N., Sazonov A.V., Le Huang M.T. Thermodynamics and kinetics research of the fluorination process of the concentrate rutile. *Metals*, 2022, vol. 12, Iss. 1, Article Number 34.
24. Karelin V.A., Voroshilov F.A., Strashko A.N., Sazonov A.V., Karelina N.V. Fluorination of rutile, electrochemical reduction of titanium fluoride to titanium, and its separation from the electrolyte salts melt. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 2020, vol. 55, Issue 5, pp. 1111–1118.
25. Bulatovic S.M. Handbook of flotation reagents: chemistry, theory and practice. Vol. 2: Flotation of gold, PGM and oxide minerals. *Flotation of Titanium Minerals*. 180 p. September 1, 1991. (eBook ISBN: 9780080932095 Paperback ISBN: 9781493302413). Available at: https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/910106/mod_resource/content/1/25---Flotation-of-Titanium_2010_Handbook-of-Flotation-Reagents--Chemistry--T.pdf (accessed 15 September 2021).
26. Suhotin A.M. *Spravochnik po elektrohimii* [Handbook of electrochemistry]. Leningrad, Khimiya Publ., 1981. 488 p.
27. Karelin V.A., Strashko A.N., Sobolev V.I., Sazonov A.V., Karelina N.V. Titanium powder segregation out of cathode deposit of titanium electrolyzers. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 2018, vol. 53, Iss. 5, pp. 856–863.

Received: 10 January 2022.

Information about the authors

Vladimir A. Karelin, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Son H. Le, head of the laboratory, Institute for Technology of Radioactive and Rare Earth Elements, Vietnam Atomic Energy Institute.

Nadezhda V. Karelina, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Huong Le Thi Mai, Dr. Sc., professor, Graduate University of Science and Technology, Vietnam academy of Science and Technology.

УДК 62-83:621.313

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ ШЕСТИМАССОВОЙ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ЗАКРЫТОГО ИСПОЛНЕНИЯ

Ершов Михаил Сергеевич¹,
msershov@yandex.ru

Феоктистов Евгений Алексеевич²,
Eugene.Feoktistov@yandex.ru

¹ Российский государственный университет нефти и газа
(национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина,
Россия, 119991, г. Москва, пр. Ленинский, 65, корп. 1.

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Россия, 141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

Актуальность исследования определена тем, что тепловые режимы работы асинхронных двигателей во многом определяют их надежность. В настоящее время хорошо проработаны вопросы расчета установившихся тепловых режимов двигателей. Вопросы практического расчета переходных тепловых процессов проработаны меньше и ограничены численным моделированием многомассовых схем или аналитическими решениями для моделей с несколькими массами. В данной работе предложена методика и получено аналитическое решение для типовой шестимассовой модели тепловых процессов асинхронного двигателя закрытого исполнения – Total Enclosed Fan Cooled. Полученные аналитические решения системы неоднородных линейных дифференциальных уравнений выражаются рядом, включающим постоянную составляющую и экспоненциальные члены, убывающие во времени, один из которых является доминирующим, определяющим регуляризацию процесса нагрева и охлаждения машины. Полученные аналитические решения позволяют лучше понять закономерности тепловых процессов двигателей при изменении режимов их работы и могут служить основанием для прогнозирования процессов нагрева и охлаждения в системах релейной защиты асинхронных двигателей закрытого исполнения.

Цель: разработать методику аналитических решений для многомассовых термодинамических моделей электрических машин, получить аналитическое решение для типовой шестимассовой системы асинхронного двигателя закрытого исполнения и выполнить анализ полученных результатов.

Объекты: асинхронные двигатели в закрытом исполнении.

Методы: аналитическое решение системы неоднородных дифференциальных уравнений.

Результаты. Разработана методика аналитических решений для многомассовых термодинамических моделей электрических машин, получено аналитическое решение для шестимассовой системы асинхронного двигателя закрытого исполнения и выполнен анализ полученных результатов, установлены закономерности регуляризации процессов нагрева объекта исследования.

Ключевые слова:

Асинхронный двигатель, закрытое исполнение, термодинамическая модель, система неоднородных дифференциальных уравнений, аналитическое решение, анализ.

Введение

Асинхронные двигатели мощностью до 100 кВт обычно выполняются в закрытом обдуваемом исполнении, в котором применена искусственная циркуляция охлаждающего воздуха с помощью вентиляторов [1, 2] – Total Enclosed Fan Cooled (TEFC) [3, 4].

Такие машины получили широкое распространение во всех отраслях промышленности. В нефтяной и газовой промышленности на долю двигателей в закрытом обдуваемом исполнении приходится свыше 50 % численного состава двигателей. Асинхронные двигатели серий АО, 4А, АИР, РА, 5А, 6А являются основными в приводах систем водоподготовки и водоснабжения, вентиляции, механизированной добычи нефти станками-качалками и в других производствах добычи и переработки нефти и газа, где не требуется применения взрывозащищенного оборудования. Надежность двигателей во многом определяется тепловыми режимами их работы, нагревом обмоток двигателей. Для теплового расчета асинхронных двига-

телей обычно применяется метод эквивалентных тепловых схем [1–4], которые рассчитываются относительно характерных режимов [5] с определением стационарных температур основных элементов многомассовых типовых схем. Более сложной является задача расчета переходных тепловых процессов, связанных с изменением режимов работы двигателей, требующая построения термодинамических моделей. Обычно такие задачи решаются только в численном виде. Аналитические решения ограничены случаями одно-, двух- и трехмассовых термодинамических моделей [6–8]. В то же время аналитические решения для термодинамических моделей позволяют увидеть и лучше понять особенности и закономерности тепловых процессов электрических машин при изменении режимов их работы, на которых строятся алгоритмы работы цифровых защит двигателей [9–12].

Постановка и исходные данные задачи

Задачей данной статьи является разработка методики аналитических решений для многомассовых

термодинамических моделей электрических машин, получение аналитического решения для шестимассовой системы асинхронного двигателя закрытого исполнения, выполнение анализа и выявление закономерностей нагрева двигателя при изменении режима его работы. Под аналитическим решением понимается получение зависимостей температуры элементов двигателя во времени, при этом параметры (коэффициенты) зависимостей рассчитываются через параметры тепловой схемы машины. Для выполнения исследований была разработана математическая модель короткозамкнутого асинхронного двигателя (АД) закрытого обдуваемого исполнения. Модель построена на базе типовой шестимассовой тепловой схемы [1, 2], приведенной на рис. 1.

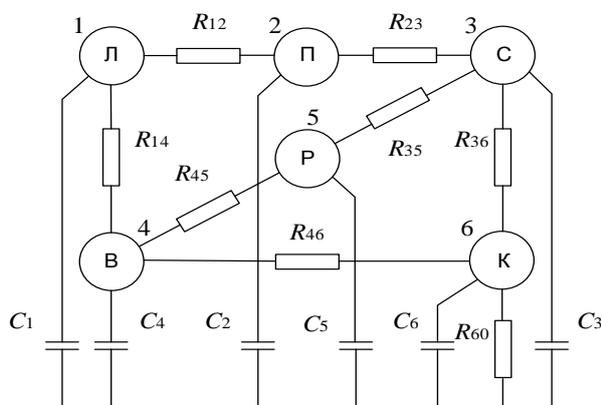


Рис. 1. Тепловая схема АД закрытого исполнения: 1. Л – лобовая часть статорной обмотки; 2. П – пазовая часть статорной обмотки; 3. С – статор; 4. В – воздух; 5. Р – ротор; 6. К – корпус; R_{ik} – соответствующие тепловые сопротивления; C_i – теплоемкости элементов (узлов) схемы

Fig. 1. Thermal diagram of the closed-circuit IM: 1. Л – the frontal part of the stator winding; 2. П – the grooved part of the stator winding; 3. С – the stator; 4. В – air; 5. Р – the rotor; 6. К – the housing; R_{ik} – the corresponding thermal resistances; C_i – the heat capacity of the elements (nodes) of the circuit

Математическая модель нестационарных тепловых процессов двигателя представляет собой систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{d\tau_1}{dt} &= \frac{(-\Lambda_1\tau_1 + \Lambda_{12}\tau_2 + \Lambda_{14}\tau_4 + \Delta P_1)}{C_1}; \\ \frac{d\tau_2}{dt} &= \frac{(\Lambda_{12}\tau_1 - \Lambda_2\tau_2 + \Lambda_{23}\tau_3 + \Delta P_2)}{C_2}; \\ \frac{d\tau_3}{dt} &= \frac{(\Lambda_{23}\tau_2 - \Lambda_3\tau_3 + \Lambda_{35}\tau_5 + \Lambda_{36}\tau_6 + \Delta P_3)}{C_3}; \\ \frac{d\tau_4}{dt} &= \frac{(\Lambda_{14}\tau_1 - \Lambda_4\tau_4 + \Lambda_{45}\tau_5 + \Lambda_{46}\tau_6 + \Delta P_4)}{C_4}; \\ \frac{d\tau_5}{dt} &= \frac{(\Lambda_{35}\tau_3 + \Lambda_{45}\tau_4 - \Lambda_5\tau_5 + \Delta P_5)}{C_5}; \\ \frac{d\tau_6}{dt} &= \frac{(\Lambda_{36}\tau_3 + \Lambda_{46}\tau_4 - \Lambda_6\tau_6 + \Delta P_6)}{C_6}, \end{aligned} \quad (1)$$

где τ_i – значение превышения температуры i -го узла над температурой окружающей среды; Λ_{ik} – взаимная тепловая проводимость между i -м и k -м узлами схемы; Λ_i – узловая тепловая проводимость i -го узла; C_i – теплоемкость i -го узла; ΔP_i – потери мощности в i -м узле.

Взаимные тепловые проводимости определяются как величины, обратные соответствующим тепловым сопротивлениям. Значения узловых тепловых проводимостей определяются как сумма проводимостей всех связанных с данным узлом ветвей. Влияние температуры на теплоемкости и теплопроводности в режимах реальных значений температур незначительно, на первых этапах исследования им можно пренебречь [4, 13]. В этом случае система дифференциальных уравнений (1) является линейной.

В качестве объекта исследования переходных процессов нагревания и охлаждения выбран асинхронный короткозамкнутый двигатель закрытого обдуваемого исполнения типа 4А112М4 мощностью 5,5 кВт; напряжение $U_{ном}=380$ В; КПД $\eta_{ном}=0,85$; скольжение $s_{ном}=0,036$. Данный тип двигателей относится по степени защиты от воздействия среды к категории IP44 и по типу охлаждения IC0141.

Основные исходные данные для расчетов взяты из работы [1] и составили:

- тепловые сопротивления схемы равны следующим значениям:

$$R_{12} = 0,443; R_{14} = 0,1358; R_{23} = 0,0432; R_{35} = 0,1562;$$

$$R_{36} = 0,0286; R_{45} = 0,1643; R_{46} = 0,0711; R_{60} = 0,0296, \quad \frac{\text{К}}{\text{Вт}},$$

- вектор теплоемкостей элементов схемы имеет вид

$$C_i = (1611; 1383; 7885; 4,4; 8256; 5034), \quad \frac{\text{Дж}}{\text{К}}.$$

При определении теплоемкости воздуха его расход принят равным $0,0785 \text{ м}^3/\text{с}$.

Электрические потери в статорной обмотке определяются по формуле

$$\Delta P_{эл.1} = 3I_1^2 r_1,$$

где I_1 – ток статорной обмотки; r_1 – сопротивление статорной обмотки.

Потери в лобовой и пазовой части статорной обмотки распределены пропорционально длине соответственно лобовой и пазовой частей статорной обмотки. Мощность потерь в стали статора определяется как сумма мощности основных потерь в стали и половины добавочных потерь $\Delta P_3 = \Delta P_{мг} + 0,5\Delta P_{доб}$. Потери в четвертом и шестом элементе приняты равными четвертой части механических потерь $\Delta P_4 = \Delta P_6 = 0,25\Delta P_{мех}$. Потери в пятом элементе определены как сумма электрических потерь в обмотке ротора и половина добавочных потерь $\Delta P_5 = \Delta P_{эл.2} + 0,5\Delta P_{доб}$. Значение магнитных потерь в статоре, механических и добавочных потерь принято равным соответственно 25, 10 и 5 % от величины общих потерь, определяемых по значениям мощности на валу двигателя и КПД $\Delta P = P(1-\eta)/\eta$. Мощность электрических потерь в роторе определена произведением скольжения на электромагнитную мощность, в свою очередь опреде-

ляемую как разность общих потерь, электрических и магнитных потерь в статоре

$$\Delta P_{эл.2} = sP_{эм} = s(\Delta P - \Delta P_{эл.1} - \Delta P_{мг.}) [5].$$

Вектор потерь мощностей в элементах схемы для номинального режима имеет вид

$$\Delta P_i = (291; 225; 289; 10; 278; 10), \text{ Вт.}$$

Методика аналитического решения для термодинамической модели

Если подставить в систему уравнений (1) численные значения, то получим неоднородную систему линейных дифференциальных уравнений, которую удобно представить в матричном виде

$$\dot{\boldsymbol{\tau}}(t) = \mathbf{A} \cdot \boldsymbol{\tau}(t) + \mathbf{b}, \quad (2)$$

где $\dot{\boldsymbol{\tau}}(t)$ – вектор-столбец производных превышения температуры (6×1); \mathbf{A} – матрица коэффициентов (6×6); $\boldsymbol{\tau}(t)$ – вектор-столбец превышения температур; \mathbf{b} – вектор-столбец свободных членов (6×1).

Тогда соответствующая системе (2) однородная система линейных дифференциальных уравнений запишется в виде

$$\dot{\boldsymbol{\tau}}(t) = \mathbf{A} \cdot \boldsymbol{\tau}(t). \quad (3)$$

Известно, что общее решение системы (2) есть сумма общего решения системы (3) и любого частного решения системы (2). В нашем случае матрица \mathbf{A} и вектор-столбец \mathbf{b} имеют следующий вид

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -0,02315 & 0,01401 & 0 & 0,00914 & 0 & 0 \\ 0,01632 & -0,03306 & 0,01673 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,00293 & -0,00818 & 0 & 0,00081 & 0,00443 \\ 0,33471 & 0 & 0 & -0,79269 & 0,13833 & 0,31965 \\ 0 & 0 & 0,00078 & 0,00074 & -0,00151 & 0 \\ 0 & 0 & 0,00694 & 0,00279 & 0 & -0,01645 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{b} = \begin{pmatrix} 0,18063 \\ 0,16269 \\ 0,03665 \\ 0,02272 \\ 0,03367 \\ 0,00199 \end{pmatrix}.$$

На первом шаге найдем общее решение однородной системы (3). Для этого необходимо найти все собственные числа λ_i и соответствующие им собственные векторы \mathbf{h}_i матрицы \mathbf{A} . Из последних в свою очередь составим так называемую фундаментальную матрицу решений системы (3). В дальнейшем обозначим ее буквой \mathbf{H} . При обработке в Matlab [14] собственные числа удобно хранить в виде следующего вектор-столбца

$$\boldsymbol{\lambda} = \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \\ \lambda_5 \\ \lambda_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0,79792 \\ -0,04388 \\ -0,00070 \\ -0,00290 \\ -0,01187 \\ -0,01778 \end{pmatrix}.$$

Все собственные числа являются вещественными и различными, что говорит о том, что общее решение однородной системы уравнений будет иметь следующий вид

$$\boldsymbol{\tau}_{i.od} = \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \dots \\ \tau_6 \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^6 K_i \cdot e^{\lambda_i t} \cdot \mathbf{h}_i, \quad (4)$$

где K_i – некоторые вещественные константы, определяемые ниже.

Определив с помощью стандартных процедур Matlab собственные векторы, составим фундаментальную матрицу решений

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} 0,01180 & -0,48503 & 0,37558 & -0,46591 & 0,80421 & 0,13018 \\ -0,00025 & 0,84731 & 0,36677 & -0,51256 & 0,45851 & -0,20864 \\ -0,00002 & -0,07466 & 0,34277 & -0,46920 & -0,20390 & -0,31741 \\ -0,99992 & -0,19918 & 0,36020 & -0,24656 & 0,28944 & 0,39631 \\ 0,00093 & 0,00483 & 0,65644 & 0,39291 & -0,00533 & -0,00283 \\ 0,00358 & 0,03920 & 0,21509 & -0,29136 & -0,13277 & 0,82566 \end{pmatrix}$$

Напомним, что в ней i -й столбец является i -м собственным вектор-столбцом \mathbf{h}_i . Таким образом, общее решение однородной системы (3) получено.

На втором шаге найдем частные решения неоднородной системы (2). В силу того, что подойдет любое частное решение, будем искать его в виде набора постоянных функций

$$\boldsymbol{\tau}_{i.nod} = \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \dots \\ \tau_6 \end{pmatrix}_{nod} = \boldsymbol{\alpha} = \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \dots \\ \alpha_6 \end{pmatrix}.$$

Значение вектора $\boldsymbol{\alpha}$ определим, формально, подставив его в систему уравнений (2). Полагая при этом, что в установившемся режиме, то есть при $t \rightarrow \infty$, справедливо $\dot{\boldsymbol{\tau}}(t) = \mathbf{0}$, получим следующую систему уравнений

$$\mathbf{A} \cdot \boldsymbol{\alpha} = -\mathbf{b}. \quad (5)$$

Численные значения матрицы \mathbf{A} и вектора \mathbf{b} приведены выше. Решение системы уравнений (5) относительно вектора $\boldsymbol{\alpha}$, осуществленное в Matlab, имеет вид

$$\boldsymbol{\alpha} = \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \alpha_5 \\ \alpha_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 70,596312 \\ 66,978656 \\ 53,730829 \\ 56,382307 \\ 77,283585 \\ 32,382400 \end{pmatrix}.$$

Таким образом, получили решение исходной системы, которое с учетом выражения (4) примет вид

$$\boldsymbol{\tau}_i = \boldsymbol{\tau}_{i.od} + \boldsymbol{\tau}_{i.nod} = \sum_{i=1}^6 K_i \cdot e^{\lambda_i t} \cdot \mathbf{h}_i + \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \dots \\ \alpha_6 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Значения вещественных констант K_i в уравнении (6) однозначно определяются начальными условиями, принятыми из следующих физических соображений:

1) работа двигателя начинается из холодного состояния, то есть $\tau(0)=0$; 2) в начальный момент времени температура не меняется скачком, то есть $\dot{\tau}(0) = \dot{\tau}(-0) = 0$. Подставляя эти условия в формулу (6), получим систему линейных алгебраических уравнений

$$\mathbf{H} \cdot \mathbf{K} = -\mathbf{a}, \quad (7)$$

где $\mathbf{H}=(h_1|h_2|h_3|h_4|h_5|h_6)$ – фундаментальная матрица решений; \mathbf{K} – вектор-столбец вещественных констант.

Решая систему уравнений (7) относительно \mathbf{K} , получим

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ K_4 \\ K_5 \\ K_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0,07543 \\ -0,47099 \\ -131,75953 \\ 23,27201 \\ -13,24502 \\ 1,20965 \end{pmatrix}.$$

Выполнив перемножение вектора \mathbf{K} и матрицы \mathbf{H} на основании выражения (6), получим аналитическое решение исходной системы дифференциальных уравнений (1) для принятых начальных условий в виде

$$\begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{pmatrix} = e^{-0,79792 \cdot t} \cdot \begin{pmatrix} -0,000890 \\ 0,000019 \\ 0,000002 \\ 0,075420 \\ -0,000070 \\ -0,000270 \end{pmatrix} + e^{-0,04388 \cdot t} \cdot \begin{pmatrix} 0,228445 \\ -0,399078 \\ 0,035167 \\ 0,093812 \\ -0,002276 \\ -0,018462 \end{pmatrix} + e^{-0,00070 \cdot t} \cdot \begin{pmatrix} -49,486777 \\ -48,325970 \\ -45,163586 \\ -47,459274 \\ -86,492311 \\ -28,340459 \end{pmatrix} + e^{-0,00290 \cdot t} \cdot \begin{pmatrix} -10,842774 \\ -11,985086 \\ -10,986716 \\ -5,827311 \\ 8,836382 \\ -6,802409 \end{pmatrix} + e^{-0,01187 \cdot t} \cdot \begin{pmatrix} -10,651789 \\ -6,073007 \\ 2,700687 \\ -3,833686 \\ 0,070643 \\ 1,758576 \end{pmatrix} + e^{-0,01778 \cdot t} \cdot \begin{pmatrix} 0,157472 \\ -0,252377 \\ -0,383956 \\ 0,479394 \\ -0,003423 \\ 0,998760 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 70,596312 \\ 66,978656 \\ 53,730829 \\ 56,382307 \\ 77,283585 \\ 32,382400 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Таким образом, изменение температуры каждой массы системы во времени можно представить как линейную комбинацию шести экспонент и постоянной составляющей, соответствующей установившемуся значению температуры элемента системы по завершению теплового переходного процесса. Напри-

мер, нагрев первого элемента определяется следующей суммой экспонент и постоянной составляющей

$$\begin{aligned} \tau_1(t) = & -0,000890 \cdot e^{-0,79792 \cdot t} + \\ & +0,228445 \cdot e^{-0,04388 \cdot t} - 49,486700 \cdot e^{-0,00070 \cdot t} - \\ & -10,842774 \cdot e^{-0,00290 \cdot t} - 10,651789 \cdot e^{-0,01187 \cdot t} + \\ & +0,157472 \cdot e^{-0,01778 \cdot t} + 70,596312. \end{aligned}$$

Согласно (8) нагрев остальных элементов определяется следующими выражениями

$$\begin{aligned} \tau_2(t) = & 0,000019 \cdot e^{-0,79792 \cdot t} - \\ & -0,399078 \cdot e^{-0,04388 \cdot t} - 48,325970 \cdot e^{-0,00070 \cdot t} - \\ & -11,985086 \cdot e^{-0,00290 \cdot t} - 6,073007 \cdot e^{-0,01187 \cdot t} - \\ & -0,252377 \cdot e^{-0,01778 \cdot t} + 66,978656; \\ \tau_3(t) = & 0,000002 \cdot e^{-0,79792 \cdot t} + \\ & +0,035167 \cdot e^{-0,04388 \cdot t} - 45,163586 \cdot e^{-0,00070 \cdot t} - \\ & -10,986716 \cdot e^{-0,00290 \cdot t} + 2,700687 \cdot e^{-0,01187 \cdot t} - \\ & -0,383956 \cdot e^{-0,01778 \cdot t} + 53,730829; \\ \tau_4(t) = & 0,075420 \cdot e^{-0,79792 \cdot t} + \\ & +0,093812 \cdot e^{-0,04388 \cdot t} - 47,459274 \cdot e^{-0,00070 \cdot t} - \\ & -5,827311 \cdot e^{-0,00290 \cdot t} - 3,833686 \cdot e^{-0,01187 \cdot t} + \\ & +0,479394 \cdot e^{-0,01778 \cdot t} + 56,382307; \\ \tau_5(t) = & -0,000070 \cdot e^{-0,79792 \cdot t} - \\ & -0,002276 \cdot e^{-0,04388 \cdot t} - 86,492311 \cdot e^{-0,00070 \cdot t} + \\ & +8,836382 \cdot e^{-0,00290 \cdot t} + 0,070643 \cdot e^{-0,01187 \cdot t} - \\ & -0,003423 \cdot e^{-0,01778 \cdot t} + 77,283585; \\ \tau_6(t) = & -0,000270 \cdot e^{-0,79792 \cdot t} - \\ & -0,018462 \cdot e^{-0,04388 \cdot t} - 28,340459 \cdot e^{-0,00070 \cdot t} - \\ & -6,802409 \cdot e^{-0,00290 \cdot t} + 1,758576 \cdot e^{-0,01187 \cdot t} + \\ & +0,998760 \cdot e^{-0,01778 \cdot t} + 32,382400. \end{aligned} \quad (9)$$

Анализ результатов

На рис. 2 приведены графики температур элементов системы при изменении мощности потерь от нулевых значений до значений потерь мощности в номинальном режиме.

На рис. 3, 4 приведены графики основных составляющих и результирующие кривые нагрева лобовой части обмотки статора и ротора. На рисунках пронумерованы только две первых экспоненциальных составляющих с наименьшими показателями степеней экспоненциальных составляющих (1. $\lambda_3=-0,0007$; 2. $\lambda_4=-0,0029$), поскольку остальные составляющие малы и практически сливаются с осью абсцисс.

Полученные аналитические решения (9) соответствуют теореме Г.М. Кондартьева [15], согласно которой процесс нагрева системы из однородных изотропных тел (с одинаковой во всех направлениях теплопроводностью) выражается рядом, включающим постоянную составляющую и экспоненциальные члены, абсолютные значения которых убывают во времени. Постоянный член и коэффициенты – сомножители экспоненциальных функций – конечны и не зависят от времени.

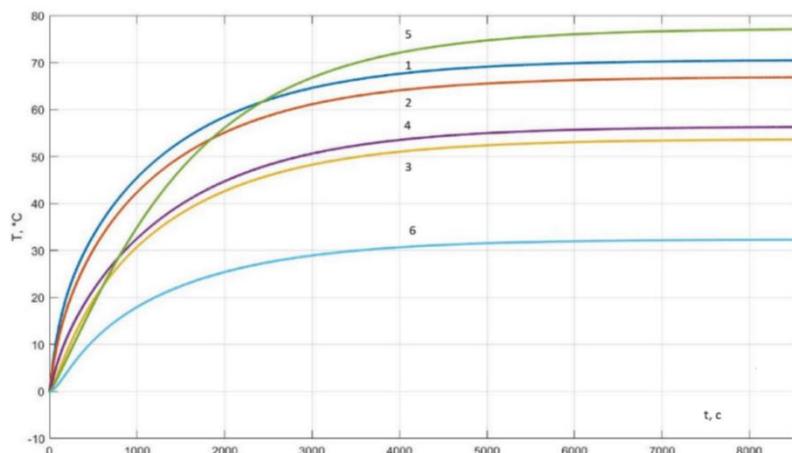


Рис. 2. Графики превышения температуры элементов системы. Номера кривых соответствуют номерам элементов тепловой схемы двигателя

Fig. 2. Graphs of the excess temperature of the system elements. The numbers of the curves correspond to the numbers of the elements of the thermal circuit of the engine

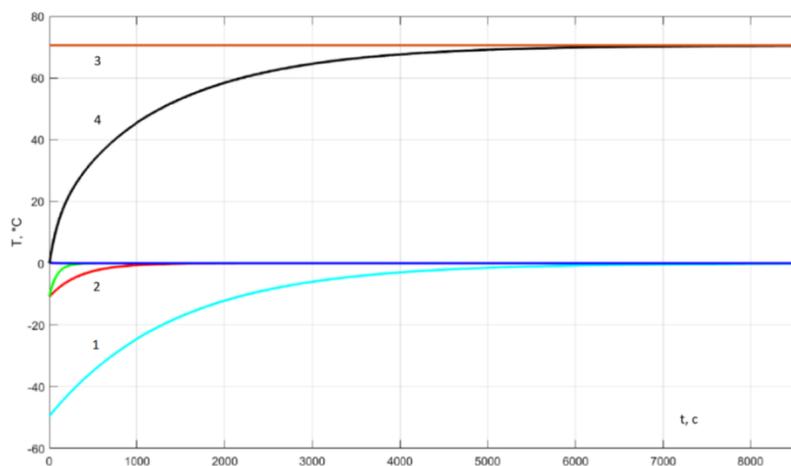


Рис. 3. Основные составляющие и результирующий график нагрева лобовой части обмотки статора: 1 – третья экспоненциальная составляющая; 2 – четвертая экспоненциальная составляющая; 3 – постоянная составляющая; 4 – результирующий график нагрева

Fig. 3. Main components and the resulting heating graph of the frontal part of the stator winding: 1 – the third exponential component; 2 – the fourth exponential component; 3 – the constant component; 4 – the resulting heating graph

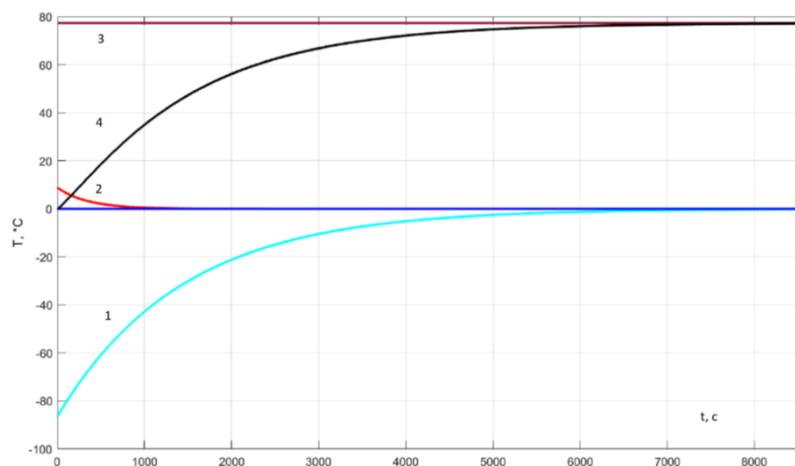


Рис. 4. Основные составляющие и результирующий график нагрева ротора: 1 – третья экспоненциальная составляющая; 2 – четвертая экспоненциальная составляющая; 3 – постоянная составляющая; 4 – результирующий график нагрева

Fig. 4. Main components and the resulting heating graph of the rotor: 1 – the third exponential component; 2 – the fourth exponential component; 3 – the constant component; 4 – the resulting heating graph

При этом среди экспоненциальных слагаемых доминирующим является один основной член с максимальной постоянной времени, определяемой отношением $T_{\max}=1/\min\{\lambda_i\}$, $\forall i$. Здесь λ_i – показатель степени экспонент, называемый темпом теплового процесса [15, 16]. В рассматриваемом примере $T_{\max}=1/0,0007=1429$ с. Остальные экспоненциальные члены ряда скоро становятся пренебрежимо малыми по сравнению с основным [15], то есть через какое-то время, в качестве которого можно взять утроенное значение второй по величине постоянной времени из слагаемых экспонент, изменение температуры будет следовать простому экспоненциальному закону.

Тепловой режим, подчиняющийся экспоненциальному закону, называется регулярным (упорядоченным) режимом. В рассматриваемом примере можно считать, что процесс нагрева становится регулярным через время $T_{\text{рег}}=3 \cdot (1/0,0029)=1034$ с. Это значение составляет около 70 % от значения постоянной времени основной экспоненциальной слагаемой. С учетом значений коэффициентов – множителей экспонент, время регуляризации будет еще меньше. Регуляризация тепловых процессов позволяет проще решать практические задачи термометрии, калориметрии и прогнозирования процессов нагрева и охлаждения электрических машин [17–20].

Так, после регуляризации теплового процесса через время $t > T_{\text{рег}}$ по результатам трех измерений температуры можно определить постоянную времени $T_n=T_{\max}$ [21]. Причем из полученных решений (9) следует, что измерения можно проводить на любом элементе системы, в том числе измеряя температуру на наиболее доступном для измерения температуры элементе – корпусе двигателя

$$T_n = \frac{\Delta t}{\ln\left(\frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_3 - \tau_2}\right)}, \quad (10)$$

где Δt – интервал времени между измерениями; τ_1 , τ_2 , τ_3 – измеренные на трех моментах времени значения превышения температуры над температурой окружающей среды.

На рис. 5 приведены значения ошибок при определении постоянной времени нагрева электродвигателя в зависимости от времени, температура при котором принимается за начальную точку отсчета τ_1 , и места измерения температуры, в качестве которого выбраны лобовая часть обмотки статора и корпус двигателя. Интервал времени между измерениями принят равным $\Delta t=500$ с. Уменьшение времени начала отсчета температуры τ_1 до 1000 с приведет к увеличению отрицательного значения ошибки определения постоянной времени T_n до минус 6 %. То есть с вполне приемлемой точностью можно определить по-

стоянную времени нагрева двигателя по формуле (10) по нескольким измерениям температуры после регуляризации процесса нагрева двигателя

Вместе с тем именно при изменении режимов работы, в частности, при изменении нагрузки, температура обмотки статора, а это основная величина, характеризующая тепловое состояние двигателя, изменяется с темпом, который превосходит темп изменения экспоненты с наибольшей постоянной. И алгоритмы работы цифровой защиты должны это учитывать. При наличии аналитического решения в распоряжении разработчиков защит оказывается информация и о меньших постоянных модели, определяющих темп нагрева обмотки статора на начальном этапе.

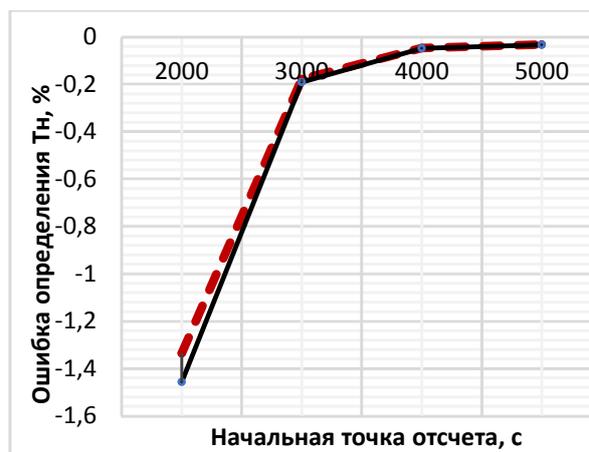


Рис. 5. Зависимость ошибки экспериментального определения постоянной времени асинхронного двигателя 4A112M4 от времени начала измерений и от элемента системы, на котором проводятся измерения: на лобовой части статорной обмотки (пунктирная линия); на корпусе двигателя (сплошная линия)

Fig. 5. Dependence of the error of the experimental determination of the asynchronous motor 4A112M4 time constant on the time of the beginning of measurements and on the system element on which measurements are carried out: on the frontal part of the stator winding (dotted line); on the motor housing (solid line)

Заключение

Разработана методика аналитических решений для многомассовых термодинамических моделей электрических машин. Получено аналитическое решение для шестимассовой системы асинхронного двигателя закрытого исполнения, и выполнен анализ полученных результатов. Установлены закономерности регуляризации процессов нагрева объекта исследования, даны рекомендации по экспериментальному определению постоянной времени асинхронного двигателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сипайлов Г.А., Санников Д.И., Жадан В.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах. – М.: Высшая школа, 1989. – 239 с.
2. Жадан В.А., Говязова С.В. Тепловой расчет электрических машин закрытого исполнения с естественным охлаждением и

оробранным корпусом // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 7. – С. 174–178.

3. Boglietti A., Cavagnino A., Staton D. Thermal analysis of TEFC induction motors // IEEE IAS Annual Meeting. – Salt Lake City: UK, 2003. – P. 849–856.

4. Boglietti A., Cavagnino A., Staton D.A. TEFC Induction motors thermal models: a parameter sensitivity analysis // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2005. – V. 41. – № 3. – P. 756–763.
5. German-Galkin S., Sakharov V., Tarnapowicz D. Energy characteristics of asynchronous electric drive // Management Systems in Production Engineering. – 2019. – V. 27. – № 1. – P. 51–54. DOI: 10.1515/mspe-2019-0009.
6. Метельков В.П. О расчете параметров двухмассовой термодинамической модели асинхронного двигателя // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2016. – Т. 16. – № 1. – С. 58–65. DOI: 10.14529/power160109.
7. Анучин А.С., Федорова К.Г. Двухмассовая тепловая модель асинхронного двигателя // Электротехника. – 2014. – № 2. – С. 21–25.
8. Оценка теплового состояния электродвигателей переменного тока компрессорных станций магистральных газопроводов / А.М. Зюзев, О.В. Крюков, В.П. Метельков, С.Г. Михальченко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 332. – № 1. – С. 88–96.
9. Математические модели нагрева и охлаждения для микропроцессорного реле тепловой защиты / Г.А. Бугаев, Е.Ю. Леонтьев, Д.В. Ерохин, Д.В. Павлова // Электротехника. – 2001. – № 2. – С. 51–54.
10. Тепловая модель асинхронного двигателя для целей релейной защиты / А.В. Булычев, Е.Ю. Ерохин, Н.Д. Поздеев, О.А. Филичев // Электротехника. – 2011. – № 1. – С. 26–30.
11. Thermal modelling of an alternator for use in a prediction system / J. Graham, R. Dixon, K. Gregory, J. Pearson // Proc. of 2012 UKACC International Conference on Control (CONTROL 2012). – Cardiff: UK, 2012. – P. 455–460. DOI: 10.1109/CONTROL.2012.6334673.
12. Fundamentals of a motor thermal model and its applications in motor protection / B. Venkataraman, B. Godsey, W. Premerlani, E. Shulman, M. Thakur, R. Midence // Protective Relay Engineers, 58th Annual Conference. – USA, 2005. – P. 11–28. DOI: 10.1109/CPRE.2005.1430428.
13. Modeling of thermal process in the energy system «electrical network – asynchronous motor» / V. Kuznetsov, M. Tryputen, V. Tytiuk, Zh. Rozhnenko, S. Levchenko, V. Kuznetsov // E3S Web of Conferences ICSF. – 2021. – P. 1–6. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128005003> (дата обращения 15.11.2021).
14. Roland P. MATLAB for electrical and computer engineering students and professional with Simulink. – Edison: SciTech Publ., NJ. University of Illinois at Chicago, 2013. – 662 p.
15. Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим. – М.: Государственное изд-во технико-теоретической литературы, 1954. – 408 с.
16. Hanappier N., Charkaluk E., Triantafyllidis N. A coupled electromagnetic-thermomechanical approach for the modeling of electric motors // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 2021. – V. 149. – Article ID 104315. – P. 1–31. DOI: 10.1016/j.jmps.2021.104315.
17. Zocholl S. Optimizing motor thermal models // Proc. Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference, 2007. ICPS 2007. – Edmonton, Alberta, Canada, 2007. – P. 33–41.
18. Borodin M.Yu., Borodin E.M., Metelkov V.P. Application of integral equations for analysis of electrodynamic and thermal processes in electric drive // Proc. 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2016). – Chelyabinsk, Russia, 2016. – P. 1–4.
19. Хомченко Д.Н., Ковалев Г.В. Исследование влияния повышенной плотности тока на процесс нагрева тягового двигателя электровоза // Вестник РГУПС. – 2019. – № 1. – С. 46–52.
20. Staton D., Boglietti A., Cavagnino A. Solving the more difficult aspects of electric motor thermal analysis in small and medium size industrial induction motors // IEEE Transaction on Energy Conversion. – 2005. – V. 20. – № 3. – P. 620–628.
21. Коренчиак Д., Себок М., Гуттен М. Тепловое измерение и его применение для диагностики масляных трансформаторов распределительных сетей // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2019. – Т. 62. – № 6. – С. 583–594. URL: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-583-594> (дата обращения 15.11.2021).

Поступила 02.02.2022 г.

Информация об авторах

Ершов М.С., доктор технических наук, профессор кафедры теоретической электротехники и электрификации нефтяной и газовой промышленности Российского государственного университета нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина.

Феоктистов Е.А., студент Московского физико-технического института (национальный исследовательский университет).

UDC 62-83:621.313

ANALYTICAL SOLUTION FOR A SIX-MASS THERMODYNAMIC MODEL OF A TEFC INDUCTION MOTOR

Mikhail S. Ershov¹,
msershov@yandex.ru

Eugene A. Feoktistov,
Eugene.Feoktistov@yandex.ru

¹ National University of Oil and Gas «Gubkin University»,
65, bld. 1, Leninsky avenue, Moscow, 119991, Russia.

² Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),
9, Institutsky lane, Dolgoprudny, 141701, Russia.

The relevance of the study is determined by the fact that the thermal operating modes of asynchronous motors largely determine their reliability. Currently, the issues of calculating the steady-state thermal modes of engines are well developed. The issues of practical calculation of transient thermal processes have been worked out less and are limited to numerical modeling of multi-mass schemes or analytical solutions for models with multiple masses. In this paper, a technique is proposed and an analytical solution is obtained for a typical six-mass model of thermal processes of a closed-circuit asynchronous motor – Total Enclosed Fan Cooled. The obtained analytical solutions of a system of inhomogeneous linear differential equations are expressed by a series including a constant component and exponential terms decreasing in time, one of which is dominant, determining the regularization of the machine heating and cooling. The obtained analytical solutions allow us to better understand the patterns of thermal processes of engines when their operating modes change and can serve as the basis for predicting heating and cooling in relay protection systems of asynchronous motors of closed design.

Objective: to develop a methodology for analytical solutions for multi-mass thermodynamic models of electric machines, to obtain an analytical solution for a typical six-mass closed-circuit asynchronous motor system and to analyze the results obtained.

Objects: asynchronous motors in closed design.

Methods: analytical solution of a system of inhomogeneous differential equations.

Results. The authors have developed the method of analytical solutions for multi-mass thermodynamic models of electric machines, obtained the analytical solution for a six-mass system of a closed-circuit asynchronous motor, analyzed the results obtained and established the regularities of the object of study heating regularization.

Key words:

Inductions motor, Total Enclosed Fan Cooled, thermodynamic model, system of inhomogeneous differential equations, analytical solution, analysis.

REFERENCES

- Sipailov G.A., Sannikov D.I., Zhadan V.A. *Teplovye, gidravlicheskie i aerodinamicheskie rasschety v elektricheskikh mashinakh* [Thermal, hydraulic and aerodynamic calculations in electric machines]. Moscow, Vishaya Shkola Publ., 1989. 239 p.
- Zhadan V.A., Govyazova S.V. Thermal calculation of closed-circuit electric machines with natural cooling and a finned body. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2005, vol. 308, no. 7, pp. 174–178. In Rus.
- Boglietti A., Cavagnino A., Staton D. Thermal analysis of TEFC induction motors. *Proceeding IEEE IAS Annual Meeting*. Salt Lake City, UK, October 12–16, 2003. pp. 849–856.
- Boglietti A., Cavagnino A., Staton D. TEFC induction motors thermal models: a parameter sensitivity analysis. *IEEE Transactions on Industry Applications*, May/June 2005, vol. 41, no. 3, pp. 756–763.
- German-Galkin S., Sakharov V., Tarnapowicz D. Energy characteristics of asynchronous electric drive. *Management Systems in Production Engineering*, 2019, vol. 27, no. 1, pp. 51–54. DOI: 10.1515/mspe-2019-0009.
- Metelkov V.P. On calculating the parameters of a two-mass thermodynamic model of an asynchronous motor. *Bulletin of the South Ural State University. Series «Energetika»*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 58–65. In Rus.
- Anuchin A.S., Fedorova K.G. A two-mass thermal model of induction motor. *Russian Electrical Engineering*, 2014, vol. 85, Iss. 2, pp. 83–86.
- Zyuzev A.M., Kryukov O.V., Metelkov V.P., Mikhailchenko S.G. Assessment of the thermal state of AC electric motors of compressor stations of main gas pipelines. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 332, no. 1, pp. 88–96. In Rus.
- Bugaev G.A., Leontiev E.Yu., Erokhin D.V., Pavlova D.V. Mathematical models of heating and cooling for a microprocessor relay of thermal protection. *Electrical Engineering*, 2001, no. 2, pp. 51–54. In Rus.
- Bulychev A.V., Erokhin E.Yu., Pozdeev N.D., Filichev O.A. Thermal model of an asynchronous motor for relay protection purposes. *Electrical Engineering*, 2011, no. 1, pp. 26–30. In Rus.
- Graham J., Dixon R., Gregory K., Pearson J. Thermal modelling of an alternator for use in a prediction system. *Proc. of 2012 UKACC International Conference on Control (CONTROL 2012)*. Cardiff, UK, 3–5 September, 2012. pp. 455–460.
- Venkataraman B., Godsey B., Premerlani W., Shulman E., Thakur M., Midence R. Fundamentals of a motor thermal model and its applications in motor protection. *Protective Relay Engineers, 58th Annual Conference*. USA, 2005. pp. 11–28.
- Kuznetsov V., Tryputen M., Tytiuk V., Rozhnenko Z., Levchenko S., Kuznetsov V. Modeling of thermal process in the energy system «electrical network – asynchronous motor». *E3S Web of Conferences ICSF*, 2021, pp. 1–6. Available at: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128005003> (accessed 15 November 2021).
- Roland P. *MATLAB for electrical and computer engineering students and professional with Simulink*. Edison, SciTech Publ., NJ. University of Illinois at Chicago, 2013. 662 p.
- Kondratiev G.M. *Regularny teplovoy rezhim* [Regular thermal regime]. Moscow, State Publ. house of Technical and Theoretical Literature, 1954. 408 p.
- Hanappier N., Charkaluk E., Triantafyllidis N. A coupled electromagnetic-thermomechanical approach for the modeling of electric

- motors. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2021, vol. 149, pp. 1–31. DOI: 10.1016/j.jmps.2021.104315.
17. Zocholl S. Optimizing motor thermal models. *Proceeding. Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference, ICPS 2007*. Edmonton, Alberta, Canada, 6–11 May 2007. pp. 33–41.
 18. Borodin M.Yu., Borodin E.M., Metelkov V.P. Application of integral equations for analysis of electrodynamic and thermal processes in electric drive. *2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2016)*. Chelyabinsk, Russia, 19–20 May 2016. pp. 1–4.
 19. Khomchenko D.N., Kovalev G.V. Investigation of the effect of increased current density in brushes on heating an electric locomotive traction motor. *Vestnik RGUPS*, 2019, no. 1, pp. 46–52. In Rus.
 20. Staton D., Boglietti A., Cavagnino A. Solving the more difficult aspects of electric motor thermal analysis in small and medium size industrial induction motors. *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 2005, vol. 20, no. 3, pp. 620–628.
 21. Korenciak D., Sebok M., Gutten M. Thermal measurement and its application for diagnostics of distribution oil transformers. *Energetika Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*, 2019, vol. 62, no. 6, pp. 583–594. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-583-594> (accessed 15 November 2021).

Received: 2 February 2022.

Information about the authors

Mikhail S. Ershov, Dr. Sc., professor, National University of Oil and Gas «Gubkin University».

Eugene A. Feoktistov, student, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University).

УДК 622.24

ТЕХНОЛОГИЯ ОЧИСТКИ И РЕЦИКЛИНГА БУРОВОГО РАСТВОРА

Третьяк Александр Александрович¹,
13050465@mail.ru

Яценко Елена Альфредовна¹,
tksiww@yandex.ru

Борисов Константин Андреевич¹,
13020165@mail.ru

Карельская Екатерина Витальевна¹,
karelskaya_1992@mail.ru

¹ Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова,
Россия, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132.

Актуальность исследования обусловлена тем, что бурение скважин является основным видом работ при разведке нефтегазовых георесурсов. При этом, по оценке специалистов, ежегодно образуется более 5 миллионов м³ бурового шлама, из которого только 4 % перерабатывается для нужд производства. Проблема выделения шлама из бурового раствора и его переработка в настоящее время стоит остро как никогда. Выполненные экспериментальные исследования позволили установить влияние постоянного магнитного поля на буровой раствор и на содержание твердой фазы, а также на структуру образца высушенной корки. Выполненные исследования химического состава буровых шламов Морозовского и Восточно-Чумаковского месторождений Краснодарского края позволили разработать технологию и рекомендовать изготовление пропанта непосредственно в полевых условиях, на месторождении.

Цель: разработать эффективную технологию очистки и рециклинга бурового раствора и предложить способ получения пропанта непосредственно на участках буровых работ.

Объекты: скважины, сооружаемые при разведке георесурсов на Морозовском и Восточно-Чумаковском месторождении Краснодарского края.

Методы: экспериментальные исследования бурового раствора с целью улучшения качества его очистки, лабораторные исследования состава шлама и рециклинг для получения пропанта.

Результаты. Решение поставленных задач позволило предложить эффективную схему очистки бурового раствора с использованием устройства для омагничивания в постоянном магнитном поле. Выявлен механизм ускорения выпадения бурового шлама в осадок. Изучение раствора под микроскопом позволило выявить кластерные структуры, способствующие увеличению вязкости раствора на 20 %, снижению водоотдачи до двух раз, увеличению интенсивности выноса шлама на поверхность и снижению коррозии до 30 %. Установлено время релаксации бурового раствора – в течение 20 часов после омагничивания в постоянном магнитном поле напряженностью 2200 эрстед.

Ключевые слова:

Буровой шлам, очистка бурового раствора, омагничивание, рециклинг, получение пропанта, геоэкология.

Введение

Бурение скважин является основным видом работ при разведке георесурсов. Основной объем работ приходится на бескерновое бурение с помощью долот различной конструкции. Ежегодно в России буровые организации бурят несколько тысяч скважин различного назначения и различной глубины, при этом образуются миллионы кубических метров бурового шлама.

Несмотря на большое количество разработок в области использования буровых отходов, исследования и опытно-промышленные работы в этой области остаются актуальными до настоящего времени. Известно, что буровой шлам оказывает негативное воздействие на геоэкологическую систему ввиду сложного минералогического состава, содержания в нем нефтепродуктов и токсичных химических добавок [1–3]. Таким образом, разработка технологии использования отходов бурения, образующихся при сооружении нефтегазовых скважин, или так называемый рециклинг, является актуальной научной задачей. Развитие промышленности стимулирует рост объемов буровых работ на углеводородное сырье, что оказы-

вает негативное воздействие на геологическую систему ввиду получения большого количества бурового шлама [4–6]. По оценке специалистов, объем бурового шлама составляет более 5 млн м³ в год, при этом доля переработки бурового шлама не превышает 4 % в год [7–9].

Государственные экологические и надзорные службы ежегодно ужесточают экологические требования к утилизации отходов, образующихся при сооружении нефтегазовых скважин, поэтому нефтегазовые компании в последнее время уделяют большое внимание решению этих вопросов.

Буровые растворы, используемые при бурении скважин Морозовского и Восточно-Чумаковского месторождения Краснодарского края, имеют сложную структуру и реологические свойства. Применяют в основном полимер-бентонитовые буровые растворы на основе лигносульфатов, имеющие следующий состав: бентонит (30–40 кг/м³), Na₂CO₃ (1,0–2,0 кг/м³), NaOH (1,0 кг/м³), КССБ (10–20 кг/м³), КМЦ 500 (1–3 кг/м³), буровой детергент (1 кг/м³), ГПАА (1–2 кг/м³), пеногаситель (0,3 кг/м³), смазывающая добавка (3–6 кг/м³).

Данные буровые растворы на заключительном этапе бурения имеют высокую плотность (2100 кг/м^3), большие значения статистического ($30\text{--}40/60\text{--}90 \text{ дПа}$) и динамического напряжения сдвига ($30\text{--}40 \text{ Па}\cdot\text{с}$). Буровые растворы с таким составом необходимы для безаварийного бурения скважин в рассмотренных геологических условиях [10, 11].

Исходя из вышеизложенного, была предложена технология обработки бурового раствора постоянным магнитным полем как для улучшения реологических

свойств бурового раствора, так и с целью увеличения процента выхода бурового шлама на поверхность. В целом предложенный способ обработки бурового раствора направлен на уменьшение зашламованности скважины буровыми отходами.

В ходе экспериментальных исследований было выявлено влияние постоянного магнитного поля на буровой раствор. Прежде всего, была установлена зависимость толщины полимерглинистой корки от содержания твердой фазы (рис. 1).

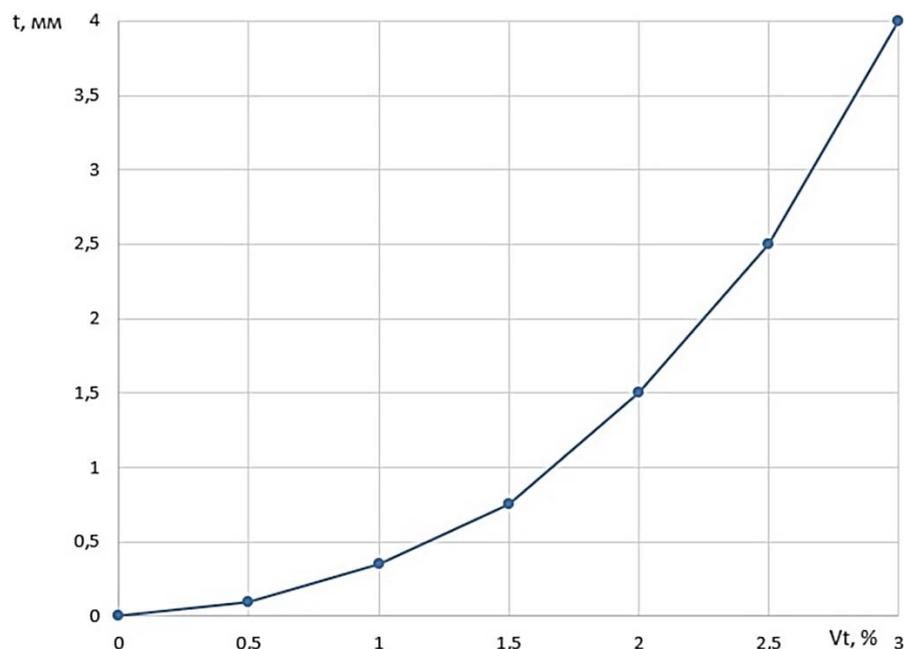


Рис. 1. Влияние содержания твердой фазы (V_t , %) на толщину полимерглинистой корки (t , мм)

Fig. 1. Influence of the solid phase content (V_t , %) on the thickness of the polymer clay crust (t , mm)

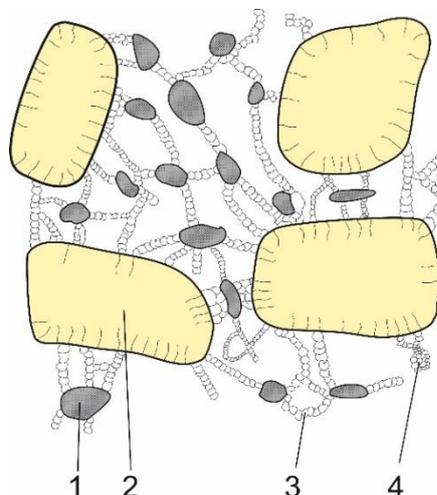
Основными объектами исследований были полимерные корки буровых растворов, полученные на приборе ВМ-6, после их высушивания [10–13]. Изучение высушенных корок производилось на микроскопе QUANTA 200 (рис. 2–4).

Изучение высушенных корок бурового раствора под микроскопом до и после омагничивания показывает, что происходит необратимая коагуляция бурового шлама.

Во время обработки бурового раствора в постоянном магнитном поле с напряженностью 2200 эрстед частицы шлама коагулируют между собой, укрупняются и, как результат, происходит ускорение до 30 % выпадения шлама в осадок. При этом образуются коллоидные структуры в виде молекул-диполей (рис. 5) и, как результат, водоотдача бурового раствора уменьшается в два раза, а вязкость увеличивается на 20 %.

Рис. 2. Структура высушенного образца корки бурового раствора, увеличенная в 10^9 раз: 1 – частицы глины; 2 – частицы песка; 3 – агрегаты коллоидных частиц; 4 – агрегаты коллоидных частиц высокой степени агрегации

Fig. 2. Structure of the dried drilling mud sample, enlarged by 10^9 times: 1 – clay particles; 2 – sand particles; 3 – aggregates of colloidal particles; 4 – aggregates of colloidal particles with high degree of aggregation



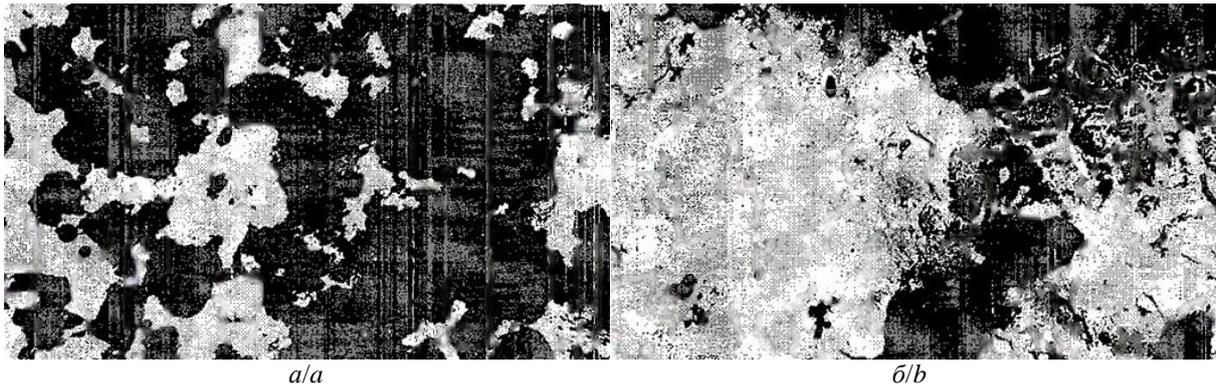


Рис. 3. Фотографии фильтрационной корки бурового раствора в процессе бурения, увеличенные в $1,9 \times 10^4$ раз: а) до магнитной обработки; б) после магнитной обработки

Fig. 3. Photos filter cake of drilling mud while drilling, increased by $1,9 \times 10^4$ times: a) before magnetic treatment; b) after magnetic treatment

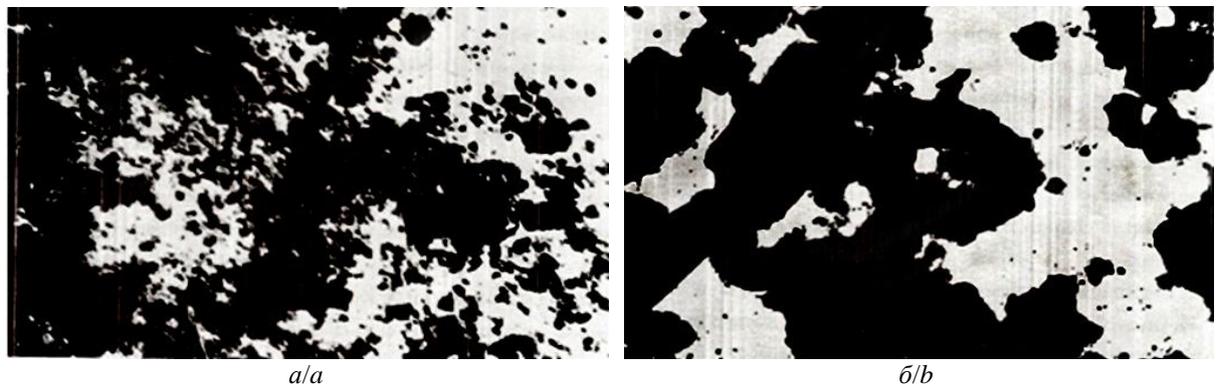


Рис. 4. Фотографии фильтрационной корки бурового раствора до начала буровых работ, увеличенные в $1,9 \times 10^4$ раз: а) до магнитной обработки; б) после магнитной обработки

Fig. 4. Photos filter cake of drilling mud before drilling, increased by $1,9 \times 10^4$ times: a) before magnetic treatment; b) after magnetic treatment

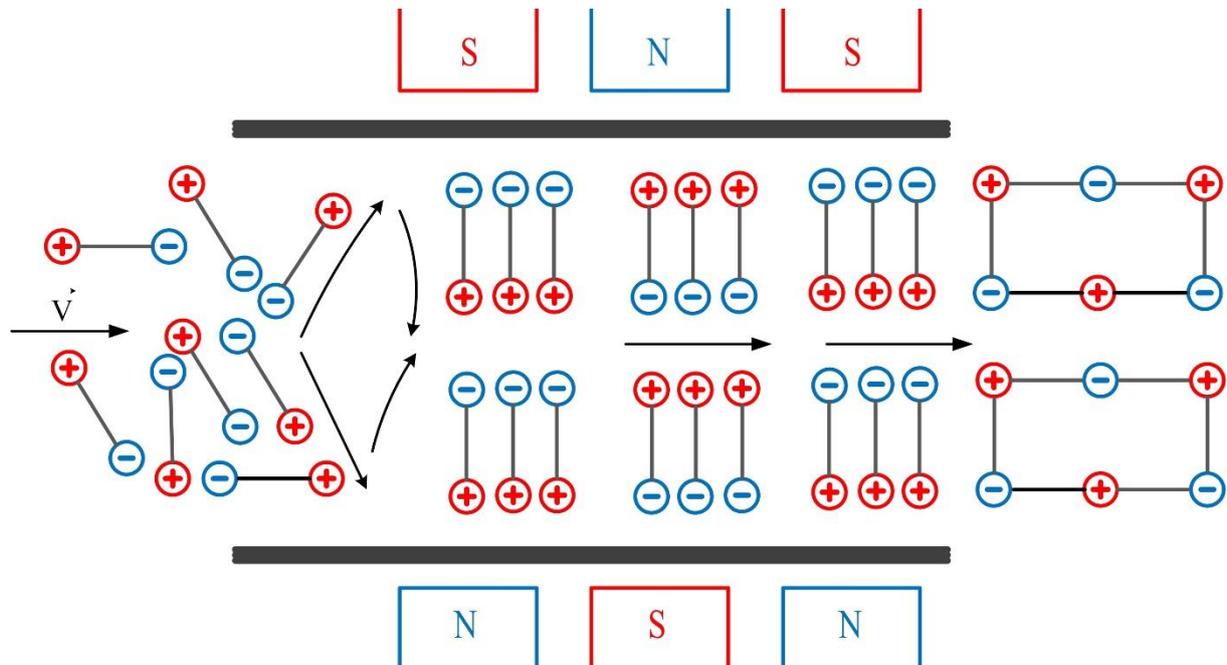


Рис. 5. Схема кластерных структур бурового раствора при прохождении его через постоянное магнитное поле

Fig. 5. Diagram of cluster structures of drilling mud when it passes through a constant magnetic field

Таким образом, структурообразование за счет дипольного взаимодействия в коллоидном растворе является главным, определяющим.

Описанная картина изменений структуры и свойств раствора под влиянием магнитного поля может быть использована при расчетах параметров и выборе приборов, применяемых для омагничивания [11, 13–15].

Лабораторно-экспериментальные исследования выполнялись при напряженности 2200 эрстед, скорости пропускания бурового раствора 0,3 м/с, температуре 20 °С. Время обработки бурового раствора в

устройстве для омагничивания составляло 40 минут в замкнутом цикле.

Как показывают экспериментальные опыты, время «памяти» обработанного раствора и характер релаксационной зависимости (рис. 6) изменяются во времени. В течение 24 часов омагниченный буровой раствор теряет свои свойства. Исходя из этого, предлагается омагничивание раствора на буровой установке выполнять в замкнутом цикле. С целью решения обозначенных выше проблем нами предложена схема омагничивания промывочной жидкости в замкнутом цикле, которая показана на рис. 7.

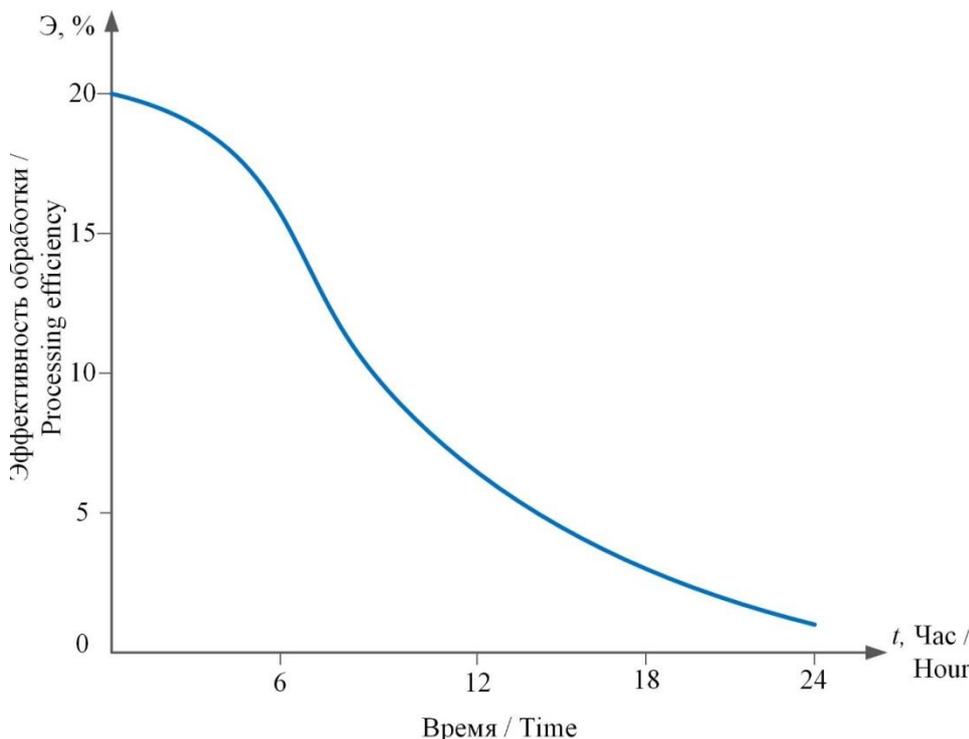


Рис. 6. Релаксационная кривая омагничивания бурового раствора

Fig. 6. Relaxation curve of drilling fluid magnetization

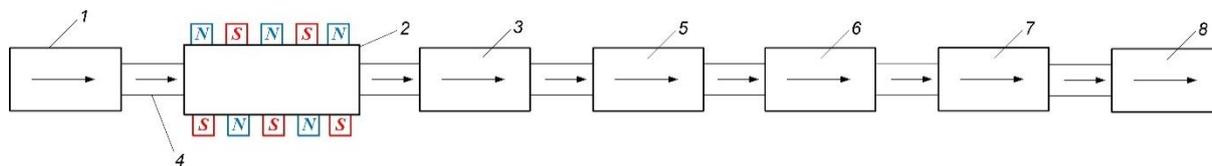


Рис. 7. Схема омагничивания промывочной жидкости в замкнутом цикле: 1 – буровой насос; 2 – блок омагничивания; 3 – нагнетательный шланг; 4 – манифольд; 5 – вертлюг-сальник; 6 – ведущая бурильная труба; 7 – бурильная труба; 8 – долото

Fig. 7. Scheme of magnetization of the washing liquid in a closed cycle: 1 – drilling pump; 2 – magnetization unit; 3 – discharge hose; 4 – manifold; 5 – swivel oil seal; 6 – lead drill pipe; 7 – drill pipe; 8 – chisel

Нами впервые на установке для омагничивания было установлено, что воздействие постоянным магнитным полем существенно меняет параметры промывочных жидкостей. На способ обработки бурового раствора и устройство для его обработки была подана заявка на изобретение и получен патент RU № 2255199.

С целью возможного применения бурового шлама для производства пропанта были выполнены лабораторные исследования физико-химических, минерало-

гических и биологических свойств образцов отобранного шлама на Морозовском и Восточно-Чумаковском месторождениях Краснодарского края. Концепция оксидов в буровом шламе определялась на вакуумном спектрометре.

Для определения фазового состава образцы буровых шламов Морозовского и Восточно-Чумаковского месторождений были исследованы с помощью рентгеновского порошкового дифрактометра ARL XTRA

(Thermo Fisher Scientific). Интерпретация полученных данных проводилась с использованием базы данных ICDD (The International Center for Diffraction Data).

Анализ рентгенограмм Морозовского и Восточно-Чумаковского месторождений показал, что основной фазой в исследуемом буровом шламе является кварц (SiO_2), находящийся в количестве около 11–30 %. Другими же фазами являются монтмориллонит ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot n\text{H}_2\text{O}$), содалит ($3\text{Na}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{NaCl}$), барит (BaSO_4) и кальцит (CaCO_3). Наличие данных веществ в составе бурового шлама говорит о возможности его использования при синтезе качественных пропантов.

Наиболее важным для синтеза алюмосиликатных пропантов является наличие в буровом шламе кварца.



Рис. 8. Внешний вид пропанта (температура спекания 1000 °C)

Fig. 8. Proppant appearance (sintering temperature 1000 °C)

На рис. 8, 9 представлен внешний вид образцов пропанта, полученного из бурового шлама при температуре спекания 1000 и 900 °C соответственно.

Таким образом, выполненные лабораторно-экспериментальные исследования позволили разработать и предложить технологию рециклинга бурового шлама непосредственно в полевых условиях, на месторождении, с использованием попутного газа для обжига пропанта. Технологическая схема универсального перерабатывающего буровой шлам комплекса показана на рис. 10 [16–18].



Рис. 9. Внешний вид пропанта (температура спекания 900 °C)

Fig. 9. Proppant appearance (sintering temperature 900 °C)



Рис. 10. Технологическая схема универсального перерабатывающего буровой шлам комплекса

Fig. 10. Technological scheme of the universal processing drilling mud complex

Внедрение универсального перерабатывающего буровой шлам комплекса непосредственно в полевых условиях позволит получить качественный пропант из бурового шлама, при этом решаются вопросы рекультивации, обжига, транспортировки и хранения пропанта.

Выполненный экономический анализ предлагаемой технологии обработки бурового раствора показал, что при расчете экономической эффективности в разных регионах необходимо учитывать районный коэффициент цен на услуги по утилизации отходов, образующихся при сооружении скважин различного назначения [19–22].

Выводы

Выполненные экспериментальные исследования бурового раствора и бурового шлама, отобранного на бурящихся скважинах в Краснодарском крае, позволили сделать следующие выводы:

- воздействие на буровой раствор постоянным магнитным полем в замкнутом цикле омагничивания способствует увеличению вязкости до 20 %, снижению водоотдачи до 2-х раз, увеличению интенсивности выпадения шлама до 30 %;
- исследуемый буровой раствор, омагниченный в постоянном магнитном поле напряженностью 2200 эрстед, удерживает магнитные свойства до 24 часов;
- обобщены и систематизированы результаты исследований по синтезу алюмосиликатных пропантов, выполнены оценки фазового, химического, минералогического и гранулометрического составов буровых отходов, получаемых при сооружении скважин Морозовского и Восточно-Чумаковского месторождений;
- разработаны рекомендации по использованию отходов бурения Морозовского и Восточно-Чумаковского месторождений для изготовления пропантов с целью гидравлического разрыва пласта;
- использование бурового шлама позволит получить дополнительный источник сырьевых материалов для алюмосиликатных пропантов и сократить количество отходов при сооружении нефтегазовых скважин;
- применение отходов бурения при синтезе эффективных алюмосиликатных пропантов позволит минимизировать техногенное воздействие буровых нефтегазовых компаний на окружающую среду, а также сократить расходы на содержание отходов на полигонах, высвободить и вернуть в хозяйственный оборот значительные площади земельных угодий, занимаемые отвалами;
- разработаны технологические основы для создания и выпуска легкого, прочного, а также востребованного в настоящее время пропанта;
- предлагаемые разработки по технологии очистки и рециклингу бурового шлама позволяют решить проблему обращения с отходами непосредственно на участках буровых работ, что даст значительный экономический и экологический эффект для буровых компаний.

Работа выполнена в ЮРГПУ (НПИ) при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках Соглашения № 20-79-10142 «Разработка эффективной технологии синтеза алюмосиликатных пропантов с использованием отходов бурения нефтегазовых скважин Южного федерального округа» (руководитель А.А. Третьяк).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cobb M., Irvine M., Fichera M. Gas development, drill cuttings disposal – best practicable environmental option. – Edinburgh: ERM Worldwide Group Ltd, 2019. – 38 p.
2. Caenn R., Darley H.C.H., Gray R.G. Chapter 14. Drilling and drilling fluids waste management // Composition and properties of drilling and completion fluids (7th ed.). – Cambridge: Gulf Professional Publishing, 2017. – P. 597–636.
3. Environmental fates and effects of ocean discharge of drill cuttings and associated drilling fluids from offshore oil and gas operations / D. Sanzone, J. Neff, D. Lewis, N. Vinhateiro, J. Blake // IOGP Report 543. – March 2016. – P. 4–10.
4. Идентификация отходов бурения и их использование / А.А. Третьяк, Е.А. Яценко, С.А. Онофриенко, Е.В. Карельская // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 2. – С. 36–43.
5. Влияние добавок металлургического шлама на процессы синтеза пропантов на основе буровых шламов / Е.А. Яценко, Б.М. Гольцман, А.А. Третьяк, А.А. Чумаков // Черные металлы. – 2021. – № 8. – С. 49–53.
6. Hasan A.R., Kabir C.S. Two-phase flow in vertical and inclined annuli // International Journal of Multiphase Flow. – March 1992. – V. 18 (2). – P. 279–293.
7. Губа А.С., Плетнева Н.И., Явич М.Ю. Идентификация отходов бурения // Нефть, газ, новации. – 2019. – № 11. – С. 82–86.
8. Матвиенко В.В., Кузнецова В.А., Цеханский М.В. К вопросу о современных методах переработки и утилизации отходов бурения // Нефть и газ Сибири. – 2017. – № 3 (28). – С. 147–151.
9. Третьяк А.А., Рыбальченко Ю.М. Теоретические исследования по управлению буровым раствором в осложненных условиях // Известия высших учебных заведений Северо-Кавказский регион. Технические науки. Приложение. – 2006. – № 7. – С. 56–61.
10. Буровой раствор для строительства скважин в сложных условиях / А.А. Третьяк, Ю.М. Рыбальченко, С.И. Лубянова, Ю.Ю. Турунтаев, К.А. Борисов // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 2. – С. 28–31.
11. Высокоингибированный буровой раствор: пат. Рос. Федерация, № 2303047, заявл. 05.10.06; опубл. 20.07.07. Бюл. № 20. – 6 с.
12. Применение физических полей для регулирования свойств буровых растворов и тампонажных материалов / Н.М. Шерстнев, С.П. Шандин, С.И. Толоконский, Н.О. Черская, А.В. Уголева // Российский химический журнал. – 1995. – № 5. – Т. 39. – С. 22–26.
13. Hudgins C.M. Jr. Chemical use in North Sea oil and gas E&P // Journal of Petroleum Technology. – January 1994. – V. 46 (01). – P. 67–74.
14. Осипов Ю.Б. Поведение глинистых суспензий в магнитном поле // Геология. – 1964. – Сер. № 4. – С. 15–19.
15. О некоторых особенностях влияния электромагнитного поля на движение ионов в потоке раствора / В.К. Погодин, Ю.Я. Голгер, В.И. Классен, П.А. Смыслов // Применение магнитной обработки воды в энергетике. Материалы Всесоюзного совещания. – Новосибирск, 1967. – С. 20–24.
16. Буровой раствор и управление его реологическими свойствами при бурении скважин в осложненных условиях / В.Ф. Чихоткин, А.Я. Третьяк, Ю.М. Рыбальченко, М.Л. Бурда // Бурение на нефть. – 2007. – № 7–8. – С. 58–60.
17. Differential-sticking mechanisms and a simple wellsite test for monitoring and optimizing drilling mud properties / P.I. Reid, G.H. Meeten, P. Clark, B.D. Chambers, A. Gilmour, M.W. Sanders //

- SPE Drilling & Completion. – June 2000. – V. 15. – № 15 (2). – P. 97–104. DOI: 10.2118/64114-PA.
18. Наноструктурированный, высокоингибированный буровой раствор: пат. Рос. Федерация, № 2708849, заявл. 24.01.19; опубл. 12.12.19. Бюл. № 35. – 8 с.
 19. Можжерин А.В., Коржавин А.Ю. Исследование остаточной проводимости алюмосиликатных и магнезиально-кварцевых пропантов при циклических нагрузках // Бурение и нефть. – 2017. – № 5. – С. 42–45.
 20. Можжерин А.В., Коржавин А.Ю. Керамический пропант или песок? // Сфера. Нефть и газ. – 2018. – № 1. – С. 92–95.
 21. BP p.l.c Statistical Review of World Energy 2019. 68th ed. – UK: Pureprint Group Limited, 2019. – 61 p.
 22. Prospects for the use of drilling slurries for the synthesis of aluminosilicate propanants / E. Yatsenko, A. Tretyak, A. Chumakov, D. Golovko // Materials Today: Proceedings. – 2021. – V. 38. – P. 4. – P. 1886–1888. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.08.575.

Поступила 24.12.2021 г.

Информация об авторах

Третьяк А.А., доктор технических наук, доцент, профессор кафедры нефтегазовой техники и технологий Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) им. М.И. Платова.

Яценко Е.А., доктор химических наук, профессор, заведующая кафедрой общей химии и технологии силикатов Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) им. М.И. Платова.

Борисов К.А., кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазовой техники и технологий Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) им. М.И. Платова.

Карельская Е.В., ассистент кафедры нефтегазовой техники и технологий Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) им. М.И. Платова.

UDC 622.24

DRILLING MUD CLEANING AND RECYCLING TECHNOLOGY

Alexander A. Tretyak¹,
13050465@mail.ru

Elena A. Yatsenko¹,
tksiww@yandex.ru

Konstantin A. Borisov¹,
13020165@mail.ru

Ekaterina V. Karelskaya¹,
karelskaya_1992@mail.ru

¹ M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),
132, Prosveshcheniya street, Novocheboksak, Russia.

The relevance of the study is caused by the fact that well drilling is the main type of work in the exploration of oil and gas geo-resources. At the same time, according to experts, more than 5 million m³ of drilling mud is formed annually, of which only 4 % is processed for production needs. The problem of sludge extraction from drilling mud and its processing is now more acute than ever. The experimental studies made it possible to establish the effect of a constant magnetic field on a nanostructured highly inhibited drilling mud and on the content of the solid phase, as well as on the structure of the dried crust sample. The performed studies of the chemical composition of drilling mud from the Morozovsky and Vostochno-Chumakovsky deposits of the Krasnodar region allowed us to develop a technology and recommend the production of proppant directly in field environment.

Goal: to develop an effective technology for cleaning and recycling drilling mud and to propose a method for obtaining propane directly at drilling sites.

Objects: wells constructed during exploration of geo-resources at the Morozovsky and Vostochno-Chumakovsky deposits of Krasnodar region.

Methods: experimental studies of drilling mud in order to improve the quality of its purification, laboratory studies of the composition of sludge and recycling to obtain proppant.

Results. The solution of the tasks set allowed us to propose an effective scheme for cleaning drilling mud using a device for magnetization in a constant magnetic field. The mechanism of acceleration of drilling sludge precipitation has been revealed. The study of the solution under a microscope revealed cluster structures that contribute to the increase in the viscosity of the solution by 20 %, decrease in water loss by up to two times, increase in the intensity of sludge removal to the surface and decrease in corrosion by up to 30 %. The relaxation time of the drilling mud – within 20 hours after magnetization in a constant magnetic field with a strength of 2200 oersted – was established.

Key words:

Drilling returns, drilling mud cleaning, magnetization, recycling, proppant production, geo-ecology.

The research was carried out at the SRSPU (NPI) and financially supported by the Russian Science Foundation within the agreement no. 20-79-10142 «Development of the effective technology of the synthesis of aluminosilicate proppants using the oil and gas well drilling wastes in Southern Federal District» (project leader A.A. Tretyak).

REFERENCES

- Cobb M., Irvine M., Fichera M. *Gas development, drill cuttings disposal – best practicable environmental option*. Edinburgh, ERM Worldwide Group Ltd., 2019. 38 p.
- Caenn R., Darley H.C.H., Gray R.G. Ch. 14 – Drilling and drilling fluids waste management. *Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids* (7th ed.). Cambridge, Gulf Professional Publ., 2017. pp. 597–636.
- Sanzone D., Neff J., Lewis D., Vinhateiro N., Blake J. Environmental fates and effects of ocean discharge of drill cuttings and associated drilling fluids from offshore oil and gas operations. *IOGP Report 543*, March 2016. pp. 4–10.
- Tretyak A.A., Yatsenko E.A., Onofrienko S.A., Karelskaya E.V. Identification of drilling waste and their use. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 2, pp. 36–43. In Rus.
- Yatsenko E.A., Goltzman B.M., Tretyak A.A., Chumakov A.A. Influence of metallurgical cuttings additives on proppant synthesis processes based on drill cuttings. *Chernye Metally*, 2021, no. 8, pp. 49–53. In Rus.
- Hasan A.R., Kabir S. Two-phase flow in vertical and inclined annuli. *International Journal of Multiphase Flow*, March 1992, no. 18 (2), pp. 279–293.
- Guba A.S., Pletneva N.I., Yavich M.Yu. Drilling waste identification. *Oil, gas, innovations*, 2019, no. 11, pp. 82–86. In Rus.
- Matvienko V.V., Kuznetsova V.A., Tsekhanov M.V. About the issue of modern methods of processing and disposal of drilling waste. *Oil and Gas of Siberia*, 2017, no. 3, pp. 147–151. In Rus.
- Tretyak A.Ya., Rybalchenko Yu. M. Theoretical research on drilling fluid management in complicated conditions *Izvestiya of higher educational institutions. North Caucasian region. Technical science. Application*, 2006, no. 7, pp. 56–61. In Rus.
- Tretyak A.A., Rybalchenko Yu.M., Lubyanova S.I., Turuntaev Yu.Yu., Borisov K.A. Drilling fluids for the construction of wells in complex conditions. *Oil industry*, 2016, no. 2, pp. 28–31. In Rus.
- Tretyak A.Ya., Mnatsakanov V.A., Zaretsky V.S., Shamanov S.A., Frolov P.A., Chikhotkin V.F., Rybalchenko Yu.M. *Vysokoingibirovanny burovoy rastvor* [Highly inhibited drilling mud]. Patent RF, no. 2303047, 2007.
- Sherstnev N.M., Shandin S.P., Tolokonsky S.I., Cherskaya N.O., Ugoleva A.V. *Primenenie fizicheskikh poley dlya regulirovaniya svoystv burovnykh rastvorov i tamponazhnykh materialov* [Application of physical fields to control the proper ties of drilling fluids and grouting materials]. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 1995, vol. 39, no. 5, pp. 22–26.

13. Hudgins C.M. Jr. Chemical use in North Sea oil and gas E&P. *Journal of Petroleum Technology*, January 1994, vol. 46 (01), pp. 67–74.
14. Osipov Yu.B. Povedenie glinistykh suspenziy v magnitnom pole [Behavior of clay suspensions in a magnetic field]. *Geologiya*, 1964, no. 4, pp. 15–19.
15. Pogodin V.K., Golger Yu.Ya., Klassen V.I. O nekotorykh osobennostyakh vliyaniya elektromagnitnogo polya na dvizhenie ionov v potoke rastvora [On some features of electromagnetic field influence on the movement of ions in the flow of solution]. *Primenenie magnitnoy obrabotki vody v energetike. Materialy Vsesoyuznogo soveshchaniya* [Application of magnetic water treatment in power engineering. Materials of the All-Union meeting]. Novosibirsk, 1967, pp. 20–24.
16. Chikhotkin V.F., Tretyak A.Ya., Rybalchenko Yu.M., Burda M.L. Drilling fluid and control of its rheological properties when drilling wells in difficult conditions. *Drilling for oil*, 2007, no. 7–8, pp. 58–60. In Rus.
17. Reid P.I., Meeten G.H., Clark P., Chambers B.D., Gilmour A., Sanders M.W. Differential-sticking mechanisms and a simple wellsite test for monitoring and optimizing drilling mud properties. *SPE Drilling & Completion*, June 2000, vol. 15, no. 15 (2), pp. 97–104. DOI: 10.2118/64114-PA.
18. Tretyak A.A., Onofrienko S.A. *Nanostrukturirovanny, vysokoingibirovanny burovoy rastvor* [Nanostructured, highly inhibited drilling mud]. Patent RF, no. 2708849, 2019.
19. Mozhzherin A.V., Sakulin A.V., Skurikhin V.V., Korzhavin A.U. Studies of the residual conductivity of alumino-silicate and magnesian-quartz proppants under cyclic loads. *Drilling and Oil*, 2017, no. 5, pp. 42–45. In Rus.
20. Mozhzherin A.V., Korzhavin A.Yu. Ceramic proppant or sand? *Sphere. Oil and gas*, 2018, no. 1, pp. 92–95. In Rus.
21. *BP p.l.c Statistical Review of World Energy 2019*. 68th ed. UK, Pureprint Group Limited, 2019. 61 p.
22. Yatsenko A.E., Tretyak A., Golovko D. Prospects for the use of drilling slurries for the synthesis of aluminosilicate proppants. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 38, P. 4. pp. 1886–1888.

Received: 24 December 2021.

Information about the authors

Alexander A. Tretyak, Dr.Sc., professor M.I. Platov South Russian State Polytechnic University (NPI).

Elena A. Yatsenko, Dr.Sc., professor, head of the General chemistry and technology of silicates department, M.I. Platov South Russian State Polytechnic University (NPI).

Konstantin A. Borisov, Cand. Sc., associate professor, M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI).

Ekaterina V. Karelskaya, assistant, M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI).

УДК 622.691.24

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕОРГАНИЗОВАННЫХ ВЫБРОСОВ ПРИРОДНОГО ГАЗА В АТМОСФЕРУ

Байков Игорь Равильевич¹,
pte@rusoil.net

Китаев Сергей Владимирович¹,
svkitaev@mail.ru

Шаммазов Айрат Мингазович^{2,1},
info@rusoil.net

Зубаилов Гаджихмед Исмаилович³,
adk_gadzi@niigaz.ru

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Россия, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

² Академия наук Республики Башкортостан,
Россия, 450008, г. Уфа, ул. Кирова, 15

³ Научно-Технический центр «Оценка соответствия» АО «Гипрониигаз»,
Россия, 410012, г. Саратов, пр. Кирова, 54.

Актуальность. Природный газ в настоящее время является безальтернативным углеводородным ресурсом, используемым преимущественно как топливо. Основным компонентом природного газа является метан, его содержание в газе превышает 95 %. При транспортировании природного газа по трубопроводам неизбежно появляются неорганизованные выбросы через разъемные соединения. Метан относится к парниковым газам и приводит к потеплению климата. Парижское соглашение, ратифицированное Россией, предполагает сокращение выбросов парниковых газов для снижения нагрузки на окружающую среду. Результаты, рассмотренные в статье, являются актуальными, т. к. приведенные рекомендации позволят повысить эффективность контроля за неорганизованными выбросами метана в окружающую среду.

Цель: разработка методики определения объема утечек природного газа в атмосферу через разъемные негерметичные соединения на газопроводах с помощью лазерного детектора метана, регистрирующего величину утечки. Методика предполагает разработку аналитических моделей для пересчета линейной концентрации метана в области утечки в объемные значения.

Объекты: экспериментальная установка, предназначенная для моделирования утечек природного газа в атмосферу. Стенд позволяет моделировать утечки различной интенсивности с помощью специальных сменных заглушек, имеющих отверстия различного диаметра.

Методы. Для обоснования предлагаемых положений использовались методы наименьших квадратов, асимптотических координат, порядковых статистик.

Результаты. Представлена методика количественного определения эмиссии метана через разъемные соединения газотранспортной системы. Для разработки методики был специально спроектирован и изготовлен лабораторный стенд, с помощью которого были получены эмпирические данные для аналитических моделей пересчета линейной концентрации метана в области утечки в объемную концентрацию.

Ключевые слова:

Трубопроводный транспорт газа, утечки природного газа, эмиссия метана, лазерный детектор, мониторинг утечек.

Введение

Парниковые газы оказывают существенное влияние на климат Земли. Значительные выбросы парниковых газов в период промышленного развития привели к нагреву атмосферы, и эти изменения уже ощущаются во всех сферах человеческой деятельности.

Цели по сокращению выбросов определены в Парижском соглашении по климату [1], Постановлении РФ о ратификации Парижского соглашения [2], Стратегии РФ по сокращению выбросов парниковых газов на период до 2050 года [3].

Значительный вклад в парниковый эффект вносят предприятия, добывающие и транспортирующие природный газ. При эксплуатации объектов газовой про-

мышленности неизбежно появляются неорганизованные утечки природного газа в атмосферу. Природный газ содержит в своем составе парниковый газ – метан (более 95 %). Причиной возникновения утечек является ухудшение технического состояния, разгерметизация газопроводов и технологического оборудования вследствие продолжительного срока их эксплуатации.

Места появления утечек могут быть различными – как правило, это разъемные фланцевые или резьбовые соединения. С большой долей вероятности утечки появляются по штоку в месте сальникового уплотнения запорно-регулирующей арматуры. Утечки также могут появиться при повреждении оборудования из-за коррозии. Коррозионные повреждения становятся источником утечки при появлении сквозного отвер-

стия. Трещины на сварных швах также могут стать источником утечек.

Для обнаружения и измерения эмиссии метана применяются различные средства: измерители концентрации метана, термоанемометры, приборы для измерения концентрации метана и расхода газового потока, дистанционный лазерный детектор метана, приборы для измерения концентрации метана и объема утечки – инфракрасные камеры [4–6].

В последнее время опубликованы научные работы, в которых рассматриваются способы обнаружения и мониторинга утечек метана на объектах, использующих в своих технологических сетях метан [7–9]. Значительный вклад в выбросы метана в атмосферу вносят объекты газотранспортной системы единой системы газоснабжения РФ. ПАО «Газпром» непрерывно ведется работа по выявлению и устранению утечек природного газа в соответствии с нормативно-техническими документами [10, 11].

В зарубежных источниках [12–17] приведены результаты исследований по обнаружению и контролю за утечками метана.

В научных работах [18, 20] приводятся научно обоснованные технологические решения по сокращению эмиссии метана в атмосферу на объектах газовой промышленности.

Проведенные исследования показывают, что актуальной является задача количественного определения объема утечек природного газа в атмосферу через негерметичные узлы для повышения эффективности работ по снижению эмиссии парникового газа – метана – в окружающую среду.

В статье приведены результаты разработки методики учета эмиссии метана с применением дистанционного лазерного детектора метана.

Положительной функцией лазерного детектора метана является измерение линейной концентрации метана в области утечки (ppm·м), т. е. концентрации метана на толщину облака утечки. Это и даст возможность перевести линейную концентрацию метана в количественную величину объема утечки с приемлемой точностью по специально разработанным аналитическим зависимостям. В работе применялся портативный лазерный детектор метана Laser methan mini.

Для разработки математических моделей выбран «прямой» метод с применением счетчиков расхода газа в качестве эталонного метода. Для проведения исследований по моделированию объемов утечек различной интенсивности, характеризующих вид утечки, была разработана и изготовлена экспериментальная установка (рис. 1).

На рис. 2 приведен фотоснимок, иллюстрирующий общий вид экспериментальной установки, собранной для моделирования утечек и измерения их объема струйным счетчиком расхода газа.

На рис. 3 приведен фотоснимок экспериментальной установки для моделирования утечек газа и измерения линейной концентрации метана в области утечки лазерным детектором метана.

На рис. 4 приведен фотоснимок области экспериментальной установки со сменной заглушкой с отверстием для моделирования утечек различной интенсивности. Стрелкой указано направление измерительного луча детектора метана при проведении измерений линейной концентрации метана в области утечки.

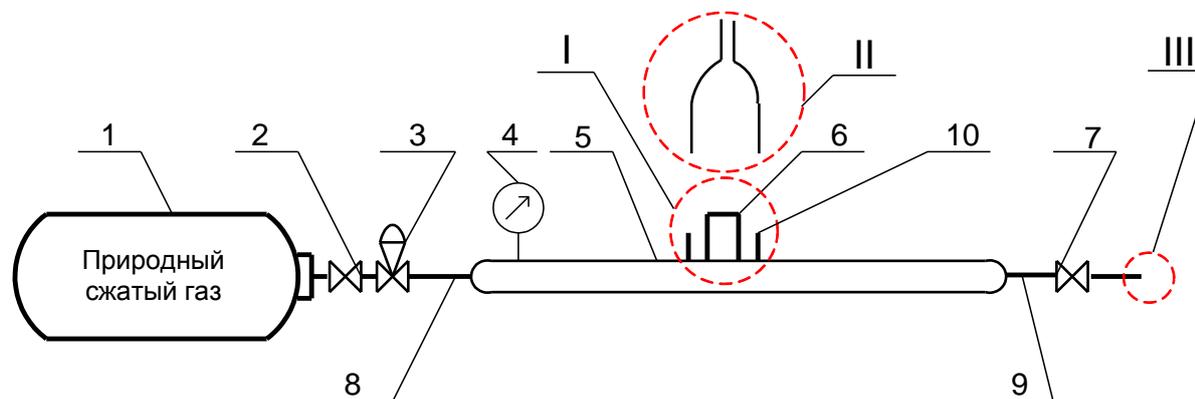


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – баллон со сжатым газом $P=25,0$ МПа; 2 – вентиль $P=25,0$ МПа; 3 – редуктор газовый $P_{вх}=25,0$ МПа, $P_{вых}=0-0,1$ МПа; 4 – манометр образцовый; 5 – имитация участка газопровода ($DN100$, $L=2,0$ м; $P=10,0$ МПа); 6 – бобышка со сменной пробкой; 7 – вентиль $P=10,0$ МПа; 8 – армированный резиновый шланг $P=0,1$ МПа, $L=2,0$ м; 9 – трубка $1/2''$, $L=0,15$ м, $P=10,0$ МПа; 10 – наружная бобышка $4''$. I – узел моделирования утечек газа; II – кожух для подачи газа на счетчик; III – штуцер для сброса остаточного давления газа в стенде

Fig. 1. Scheme of the experimental setup: 1 – compressed gas cylinders, $P=25,0$ MPa; 2 – valve $P=25,0$ MPa; 3 – reducer gas $P_{in}=25,0$ MPa, $P_{out}=0-0,1$ MPa; 4 – gauge exemplary; 5 – simulation of a gas pipeline ($DN100$, $L=2,0$ m; $P=10,0$ MPa); 6 – boss with interchangeable plug; 7 – valve $P=10,0$ MPa; 8 – reinforced rubber hose $P=0,1$ MPa, $L=2,0$ m; 9 – $1/2''$ tube, $L=0,15$ m, $P=10,0$ MPa; 10 – $4''$ outer boss. I – gas leak simulation unit; II – casing for gas supply to the meter; III – fitting for relieving the residual gas pressure in the stand



Рис. 2. Экспериментальная установка для моделирования утечек и измерения их объема струйным счетчиком расхода газа

Fig. 2. Experimental setup for modeling leaks and measuring their volume with a jet gas flow meter



Рис. 3. Экспериментальная установка для моделирования утечек и измерения линейной концентрации метана в области утечки лазерным детектором метана

Fig. 3. Experimental setup for modeling leaks and measuring methane linear concentration in the leakage region by a laser methane detector

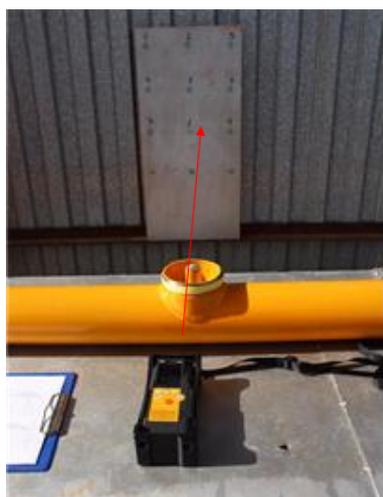


Рис. 4. Фотоснимок области экспериментальной установки со сменной заглушкой с отверстием для моделирования утечек различной интенсивности

Fig. 4. Photograph of the experimental installation area with a replaceable plug with a hole for modeling leaks of different intensity

Работы по измерению расхода газа с утечкой производились с помощью газового счетчика при различных значениях давления газа в газопроводе и различных площадях источника утечки в следующем порядке:

- подключение имитатора газопровода с источником утечки площадью S_1 к баллону с природным газом;
- герметизация и установка изолирующего чехла над источником утечки;
- заполнение газопровода и изолирующего газопровода природным газом;
- настройка заданного давления газа в имитаторе газопровода P_1 ;
- подготовка газового счетчика к эксплуатации в соответствии с руководством по эксплуатации;
- фиксация показаний термометра и барометрического давления;
- фиксация показаний счетного устройства газового счетчика Q_1 ;
- по истечении времени τ фиксация показаний счетного устройства газового счетчика Q_2 ;
- определение расхода газа через источник утечки площадью S_1 при давлении в газопроводе P_1 по формуле: $V_{сч}=(Q_2-Q_1)$.

Измерение величины расхода газа с утечкой производилось струйными счетчиками типа СГБ-1,8 и СГБ-4,0, которые применялись поочередно в зависимости и расхода газа для обеспечения необходимой точности измерений в диапазоне малых расходов

Массовый расход газа Q_m через отверстие, выражаемый в кг/с, определяется из соотношения по формуле (1):

$$Q_m = f c_2, \quad (1)$$

где f – площадь сечения отверстия в негерметичном узле.

Скорость истечения определяется по формуле (2):

$$c_2 = \sqrt{\frac{2k}{k-1} RT_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}. \quad (2)$$

Подставляя выражение (2) в (1), получим выражение (3):

$$Q_m = f \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{v_1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}. \quad (3)$$

Объемный часовой расход газа определяется по формуле (4):

$$Q_p = \frac{Q_m}{\rho} 3600, \quad (4)$$

где ρ – плотность газа.

Из уравнения (4) следует, что массовый секундный расход газа при истечении из трубопровода через отверстие зависит от площади отверстия, свойств газа (k – показатель адиабаты, p_1 – давление газа в трубе, v_1 – удельный объем газа в трубе) и степени его расширения (т. е. давления газа на выходе p_2).

Массовый расход газа с утечкой по формуле (4) может быть рассчитан для давлений в источнике утечки до 1 bar, т. е. при значениях от $\frac{p_2}{p_1} = \beta_{кр} = 0,5$

до $\frac{p_2}{p_1} = 1,0$ теоретические расчеты полностью совпадают с экспериментальными данными. Для интервала значений степени расширения $0 < \frac{p_2}{p_1} < \beta_{кр}$ массовый

расход газа с утечкой может быть рассчитан по другой формуле. Рассмотрим методику расчета массового расхода газа с утечкой для интервала степени расширения $0 < \frac{p_2}{p_1} < \beta_{кр}$. Режим истечения газа из отверстий критический.

Массовый расход газа при истечении из отверстия определяется по формуле (5):

$$Q_m = f \lambda_{кр} \sqrt{\frac{2gp_1}{v_1}}, \quad (5)$$

где $\lambda_{кр}$ – скоростная характеристика расхода газа.

Объемный часовой расход газа с утечкой определяется по формуле (6):

$$Q_p = \frac{Q_m}{\rho} 3600, \quad (6)$$

где ρ – плотность газа.

На рис. 5 приведены экспериментальная и расчетная зависимости расхода газа с утечкой в зависимости от избыточного давления газа в трубе для диаметра отверстия $D=0,35$ мм (в качестве примера).

Расчетные данные получены по формуле (4) для случая, когда $\beta = \frac{p_2}{p_1} = 0,5 - 1,0$.

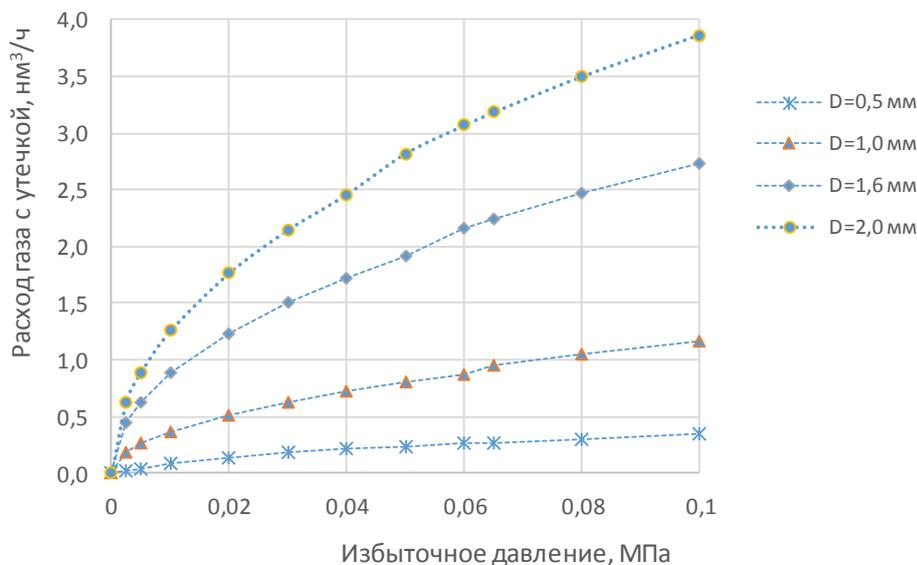


Рис. 6. Характеристики расхода газа с утечкой в зависимости от избыточного давления газа в трубе и диаметра отверстий

Fig. 6. Characteristics of the gas flow rate with leakage depending on the excess gas pressure in the pipe and the diameter of the holes

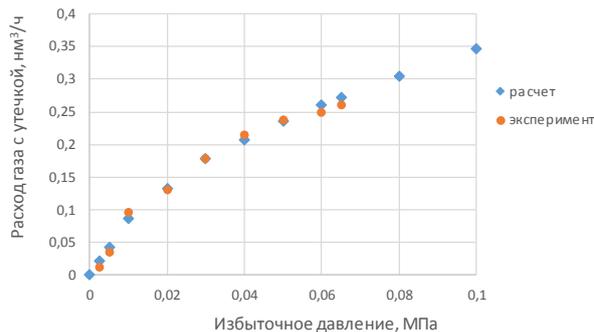


Рис. 5. Зависимость расхода газа с утечкой от избыточного давления газа в трубе для диаметра отверстия $D=0,35$ мм

Fig. 5. Dependence of the gas flow rate with leakage on the excess gas pressure in the pipe for the hole diameter $D=0,35$ mm

Аналогичные зависимости получены и для других диаметров отверстий 0,5; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 2,0 мм. Сравнительный анализ расчетных данных с экспериментальными показал, что расчетные данные хорошо соотносятся с экспериментальными данными $\delta=5\%$.

Аналитическое моделирование характеристик при избыточном давлении в трубе $0 < P_2 \leq 0,1$ МПа

Применяя разработанный стенд, проведены экспериментальные исследования. Давление в источнике утечки поднималось ступенчато, при каждом значении давления фиксировался расход газа с утечкой. Для моделирования утечки использовались съемные заглушки с отверстиями разного диаметра. Полученные зависимости расхода газа от избыточного давления и диаметра отверстий приведены на рис. 6.

Характеристики (рис. 6) представляют собой серию зависимостей от двух параметров: избыточного давления в трубе (P_u) и диаметра отверстия (D), имитирующего утечку. Для представления характеристики (рис. 6) применялся метод асимптотических координат. В результате получена аналитическая зависимость Q_p от P_u и D , формула (7):

$$Q_p = (1,1676D^{1,7525})(13,44(10P_u)^5 - 36,881(10P_u)^4 + 37,29(10P_u)^3 - 17,378(10P_u)^2 + 45,301P_u). \quad (7)$$

На рис. 7 проиллюстрирован график зависимостей линейной концентрации метана в области утечки, полученный по экспериментальным данным для топливного газа.

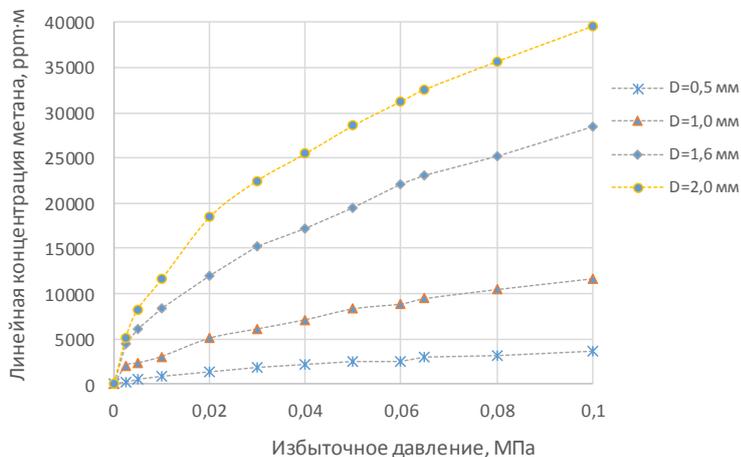


Рис. 7. Зависимости линейной концентрации метана в области утечки от избыточного давления газа в трубе и диаметра отверстия

Fig. 7. Dependences of the linear methane concentration in the leak area on the excess gas pressure in the pipe and the hole diameter

Произведя моделирование методом асимптотических координат получим аналитическую зависимость C_p от P_u и D , формула (8):

$$C_p = (11957D^{1,7525})(10,127(10P_u)^5 - 28,084(10P_u)^4 + 28,924(10P_u)^3 - 14,009(10P_u)^2 + 40,438P_u). \quad (8)$$

Для определения зависимости $Q_p=f(C_p, D)$ выразим D в уравнении (8), получим выражение, формула (9):

$$D = \left[\frac{c_p}{11957 \left(\frac{10,127(10P_u)^5 - 28,084(10P_u)^4 + 28,924(10P_u)^3 - 14,009(10P_u)^2 + 40,438P_u}{11957} \right)^{0,57}} \right] \quad (9)$$

Подставим (9) в (7), получим:

$$Q_p = 0,0001C_p \times \left(\frac{13,44(10P_u)^5 - 36,881(10P_u)^4 + 37,29(10P_u)^3 - 17,378(10P_u)^2 + 45,301P_u}{10,127(10P_u)^5 - 28,084(10P_u)^4 + 28,924(10P_u)^3 - 14,009(10P_u)^2 + 40,438P_u} \right) \quad (10)$$

Формула (10) применима в диапазоне значений избыточного давления газа $0 < P_u < 0,1$ МПа, получена для природного газа с содержанием метана (CH_4) – 86,5 %.

Расход метана в измеренном с утечкой газе определяется по формуле (11):

$$Q_{p(CH_4)} = 8,7 \cdot 10^{-5} C_p \times \left(\frac{13,44(10P_u)^5 - 36,881(10P_u)^4 + 37,29(10P_u)^3 - 17,378(10P_u)^2 + 45,301P_u}{10,127(10P_u)^5 - 28,084(10P_u)^4 + 28,924(10P_u)^3 - 14,009(10P_u)^2 + 40,438P_u} \right) \quad (11)$$

Для определения расхода измеренного газа с утечкой необходим его компонентный состав. Расход по компонентам измеренного с утечкой газа определяется по формуле (12):

$$Q_{pi} = \frac{Q_{p(CH_4)} X_i}{X_{CH_4}}, \quad (12)$$

где X_i – концентрация i -го компонента газа, %; X_{CH_4} – концентрация метана в составе измеренного с утечкой газа, %.

Аналитическое моделирование характеристик при избыточном давлении в трубе $0,1 < P_u \leq 10,0$ МПа

Характеристики расхода метана с утечкой для диапазона давлений $0,1 < P_u < 10,0$ МПа получим расчетным методом по итоговой формуле (6) с учетом того, что расчетные данные хорошо соотносятся с экспериментальными.

На рис. 8 приведены зависимости расхода газа с утечкой в зависимости от избыточного давления и диаметра отверстий.

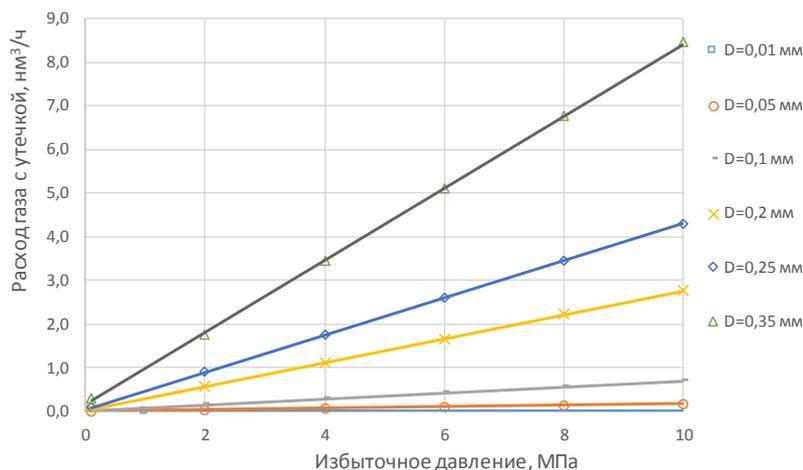


Рис. 8. Характеристики расхода метана с утечкой в зависимости от избыточного давления в трубе и диаметра отверстий

Fig. 8. Characteristics of methane flow with leakage depending on the excess pressure in the pipe and the diameter of the holes

Характеристики (рис. 8) представляют собой серию зависимостей от двух параметров: избыточного давления в трубе ($P_{и}$) и диаметра отверстия (D), имитирующего утечку. Произведя моделирование, получим аналитическую зависимость Q_p от $P_{и}$ и D , формула (13):

$$Q_p = D^2(6,825P_{и} + 0,692). \quad (13)$$

На рис. 9 проиллюстрирован графоаналитический способ определения линейной концентрации метана в области утечки, основанный на экспериментальных данных.

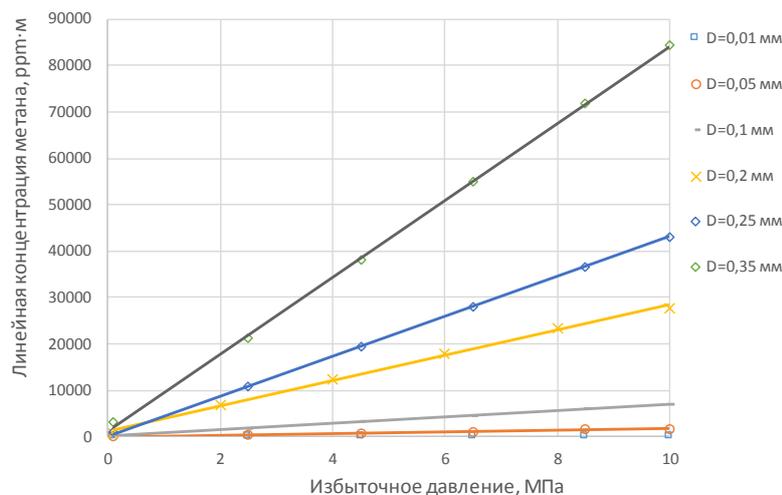


Рис. 9. Графоаналитический способ определения линейной концентрации метана в области утечки, основанный на экспериментальных данных

Fig. 9. Graphoanalytical method for determining the linear methane concentration in the leakage area, based on experimental data

Путем моделирования характеристик (рис. 8) получим аналитическую зависимость C_p от $P_{и}$ и D , формула (14):

$$C_p = D^2(67813,5P_{и} + 3563,32). \quad (14)$$

Для определения зависимости $Q_p = f(C_p, D)$ выразим D в формуле (14), получим выражение:

$$D = \sqrt{\frac{C_p}{(67813,5P_{и} + 3563,32)}}. \quad (15)$$

Подставим формулу (15) в (13), получим:

$$Q_{p(\text{CH}_4)} = \frac{C_p}{(67813,5P_{и} + 3563,32)}(6,825P_{и} + 0,692). \quad (16)$$

Формула (16) применима в диапазоне значений избыточного давления газа $0,1 < P_{и} \leq 10,0$ МПа, полученная для метана (CH_4). Для определения утечки компонентов природного газа используется формула (12).

На основе проведенных исследований аналитическая методика была реализована в виде программы Gas leaks для ПК Microsoft Windows 7, 10 (рабочее окно программы приведено на рис. 10), созданы приложения для смартфонов под Ios и Android.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ		СВОЙСТВА ГАЗА		УТЕЧКИ ГАЗА ПО КОМПОНЕНТАМ	
Название	БТПГ	КОМПОНЕНТЫ ГАЗА	% объем	Расход газа, кг/3ч	Расход газа, кг/ч
Функциональный узел	Кран	Бензол	0	0,0	0,0
Место утечки	В уплотнении штока	Гелий	0,041	0,00000397	0,00000274
Дата/день/месяц/год	05 / 06 / 2020	Углекислый газ	0,01	0,00000097	0,00000067
Время	16 : 02	Деканы	0	0,0	0,0
ПАРАМЕТРЫ УТЕЧКИ		Этан	10,7493	0,00103982	0,00071956
Исходное давление в источнике утечки (P _{ис}) бар	25	Сероводород	0	0,0	0,0
Плотность газа (ρ), кг/м ³	0,692	Изобутан	0,326	0,00002154	0,00002182
ЛИНЕЙНАЯ КОНЦЕНТРАЦИЯ МЕТАНА В УТЕЧКЕ (C_{ли}), ppm/m		Изопентан	0,01	0,00000097	0,00000067
1-я точка измерения	78	Метан	81,2918	0,00796367	0,00544166
2-я точка измерения	75	Несопентан	0,01	0,00000097	0,00000067
3-я точка измерения	77	Азол	2,6823	0,00025847	0,00017955
4-я точка измерения	79	Кислород	0,4001	0,0000387	0,00002678
5-я точка измерения	76	Пропан	4,3205	0,00041794	0,00028921
6-я точка измерения	75	Толуол	0	0,0	0,0
7-я точка измерения	72	Циклогексан	0	0,0	0,0
8-я точка измерения	80	Ксилол	0	0,0	0,0
9-я точка измерения	78	n-Бутан	0,148	0,00001441	0,00000997
Значения вводить через <->		n-Гептан	0	0,0	0,0
<input type="button" value="Расчитать"/>		n-Гексан	0	0,0	0,0
<input type="button" value="Вернуться в главное меню"/>		n-Нонан	0	0,0	0,0
		n-Октан	0	0,0	0,0
		n-Пентан	0,01	0,00000097	0,00000067
		Суммарные утечки газа	100,0	0,00967339	0,00669398

Рис. 10. Рабочее окно программы Gas leaks с примером расчета
 Fig. 10. Gas leaks working window with calculation example

Разработанная методика применима для газов с любым компонентным составом, главное, чтобы в газе присутствовал метан, т. к. прибор Laser methan mini предназначен только для обнаружения метана в метаносодержащих газах. Программа позволяет пересчитать измеренные значения линейной концентрации метана в области утечки с использованием данных по компонентному составу газа с учетом плотности газа и давления в источнике в суммарный расход газа с утечкой в объемном или массовом выражении. Также выводятся сведения по расходу газа с утечкой отдельно по компонентам газа.

Преимуществом разработанной методики является возможность измерения объема утечки газа, содержащего токсичные компоненты. При измерении утечек газа, содержащего сероводород, данный метод будет безопасным для человека, т. к. измерение производится на удалении от места утечки бесконтактным способом. Измерения могут производиться также через стекло, через которое измерительный луч беспрепятственно проникает, что является еще одним достоинством метода, расширяя возможные области его применения на объектах нефтегазовой отрасли.

Предлагаемая методика может найти широкое применение на объектах, в технологических процессах которых используются углеводородные газы, в том числе с содержанием в своем составе токсичных компонентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Парижское соглашение по климату. URL: <http://docs.cntd.ru/document/542655698> (дата обращения: 24.10.2020).
2. Постановление «О принятии Парижского соглашения» от 21 сентября 2019 года № 1228. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72661694/> (дата обращения: 24.10.2020).
3. Стратегия долгосрочного развития российской федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года. URL: https://www.economy.gov.ru/material/file/babacbb75d32d90e28d3298582d13a75/proekt_strategii.pdf (дата обращения: 24.10.2020).
4. De Oliveira Melo R., Costa M.G.F. Detecting natural gas leaks using digital images and novelty filters Filho C.F.F.C. // Lecture Notes in Computer Science. – 2012. – V. 7326 LNAI. – P. 242–249.

Выводы

1. Разработан и изготовлен экспериментальный стенд, позволяющий моделировать утечки газа различной интенсивности. На стенде производятся количественные измерения объема утечек счетчиком расхода газа и линейной концентрации метана в области утечки лазерным детектором метана.
2. На экспериментальном стенде получены эмпирические данные по объему утечек и линейной концентрации метана в области утечки в зависимости от площади отверстия, моделирующего утечку различной интенсивности.
3. Разработаны аналитические зависимости расхода газа с утечкой от избыточного давления газа в источнике утечки и линейной концентрации метана в области утечки для двух режимов истечения газа, определяемых давлением газа $P_{из}=0-0,1$ МПа и $P_{из}=0,1-10,0$ МПа. Установлено, что относительная погрешность моделей не превышает 5 %.
4. Произведено сравнение расчетных данных с экспериментальными, полученными в промышленных условиях. Результаты сравнения расчетных данных с экспериментальными показывают, что различие в результатах не превышает 14 %.
5. Investigation of the spatial distribution of methane sources in the greater toronto area using mobile gas monitoring systems / S. Ars, F. Vogel, C. Arrowsmith, E. Knuckey, J Lavoie., C. Lee, N.M. Pak, J.L. Phillips, D. Wunch, S. Heerah // Environmental Science and Technology. – 2020. – V. 54. – № 24. – P. 15671–15679.
6. Аколова Г.С., Дорохова Е.В., Попов П.В. Оценка объемов потерь метана с утечками от технологического оборудования газотранспортных объектов ОАО «Газпром» // Охрана окружающей среды, энергосбережение и охрана окружающей среды в нефтегазовом комплексе: инновации, технологии, перспективы. – 2013. – № 2. – С. 63–67.
7. Лурье М.В., Мусайлов И.Т., Лысенко Н.О. Эффективный метод расчета утечек газа через сквозные отверстия в стенках газопроводов и сосудов высокого давления // Территория Нефтегаз. – 2020. – № 3–4. – С. 110–116.

8. Математическое моделирование утечки природного газа из трубопровода низкого давления / А.А. Паранук, П.С. Кунина, М.А. Меретуков, Р.Б. Кохужева, Е.В. Рябухин // Перспективы науки. – 2020. – № 11 (134). – С. 215–222.
9. Эминов Р.А., Мурсалов Н.З. Разработка новых методов обнаружения мест утечек углеводородного газа // Контроль. Диагностика. – 2019. – № 5. – С. 60–64.
10. СТО Газпром 027-2006. Типовая программа оценки эмиссии природного газа на объектах ОАО «Газпром». – М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2006. – 43 с.
11. СТО Газпром 031-2007. Методика проведения измерений объемов эмиссии метана в атмосферу на объектах ОАО «Газпром». – М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2007. – 39 с.
12. Natural gas leaks and tree death: a first-look case-control study of urban trees in Chelsea, MA USA / C. Schollaert, E. Polka, M.K. Scammell, R.C. Ackley, A. de Santis // Environmental Pollution. – 2020. – V. 263. – P. 114464.
13. Investigation of the spatial distribution of methane sources in the greater Toronto area using mobile gas monitoring systems / S. Ars, F. Vogel, C. Arrowsmith, E. Knuckey, J. Lavoie, C. Lee, N.M. Pak, J.L. Philips, D. Wunch, S. Heerah // Environmental Science and Technology. – 2020. – V. 54. – № 24. – P. 15671–15679.
14. Hou Q., Zhu W. An ekf-based method and experimental study for small leakage detection and location in natural gas pipelines // Applied Sciences (Switzerland). – 2019. – V. 9. – № 15. – P. 3193.
15. Lukonge A.B., Cao X., Pan Z. Experimental study on leak detection and location for gas pipelines based on acoustic waves using improved Hilbert–Huang transform // Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice. – 2021. – V. 12. – № 1. – P. 40–45.
16. A review of methane gas detection sensors: recent developments and future perspectives / T. Aldhafeeri, M.-K. Tran, R. Vrolyk, M. Pope, M. Fowler // Inventions. – 2020. – V. 5. – № 3. – P. 1–18.
17. Gas leak detection by diode laser absorption spectrometry / R. Uhl, T. Reinhardt, U. Haas, J. Franzke // Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy. – 1999. – V. 54. – № 12. – P. 1737–1741.
18. Иванов Э.С., Китаев С.В. Ресурсосберегающая технология отключения участка магистрального газопровода в ремонт с выработкой газа компрессорной станцией на ГПА и потребителя через газораспределительную станцию // Территория Нефтегаз. – 2015. – № 6. – С. 40–46.
19. Гадельшина А.Р., Китаев С.В., Галикеев А.Р. Практическое решение задачи экономии природного газа путем выработки его разнотипными газоперекачивающими агрегатами, работающими по схеме в параллель // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2016. – № 1. – С. 5–8.
20. Ридель И.А., Дудин А.В. Инновационные методы реализации программы оценки объема эмиссии природного газа на объектах дочерней компании // Газовая промышленность. – 2019. – № 3 (781). – С. 114–119.

Поступила 02.09.2021 г.

Информация об авторах

Байков И.Р., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Китаев С.В., доктор технических наук, профессор, профессор кафедры транспорта и хранения нефти и газа Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Шаммазов А.М., доктор технических наук, академик академии наук Республики Башкортостан; президент Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Зубаилов Г.И., кандидат технических наук, директор Научно-Технического центра «Оценка соответствия» АО «Гипрониигаз».

UDC 622.691.24

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR DETERMINING INORGANIZED EMISSIONS OF NATURAL GAS TO THE ATMOSPHERE

Igor R. Baykov¹,
pte@rusoil.net

Sergey V. Kitaev¹,
svkitaev@mail.ru

Airat M. Shammazov^{2,1},
info@rusoil.net

Gadzhiakhmed I. Zubailov³,
adk_gadzi@niigaz.ru

¹ Ufa State Petroleum Technical University,
1, Kosmonavtov street, Ufa, 450062, Russia.

² Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan,
15, Kirov street, Ufa, 450008, Russia

³ Leading Research and Planning Institute on gas distribution, Giproniigaz PLC,
54, Kirov avenue, Saratov, 410012, Russia.

The relevance of research. Natural gas is currently the uncontested hydrocarbon resource used primarily as a fuel. The main component of natural gas is methane, its content in gas exceeds 95 %. When natural gas is transported through pipelines, fugitive emissions inevitably appear through detachable connections. Methane is a greenhouse gas and leads to climate warming. The Paris Agreement, ratified by Russia, provides for the reduction of greenhouse gas emissions to reduce the burden on the environment. The results discussed in the article are relevant, since these recommendations will improve the efficiency of control over fugitive emissions of methane into the environment.

The purpose of the research was to develop a method for determining the volume of natural gas leaks into the atmosphere through detachable leaky joints on gas pipelines using a laser methane detector that records the amount of leakage. The method involves the development of analytical models for converting the linear methane concentration in the area of the leak into volumetric values.

Objects: an experimental setup designed to simulate natural gas leaks into the atmosphere. The stand allows simulating leaks of varying intensity using special replaceable plugs with holes of different diameters.

Methods. To substantiate the proposed provisions, the methods of least squares, asymptotic coordinates, and order statistics were used.

Results. A technique for quantitative determination of methane emissions through detachable connections of a gas transmission system is presented. To develop the methodology, a laboratory stand was specially designed and manufactured, with the help of which empirical data were obtained for analytical models for converting the linear concentration of methane in the leakage area into volume concentration.

Key words:

Pipeline gas transportation, natural gas leaks, methane emission, laser detector, leak monitoring.

REFERENCES

1. *Parizhskoe soglasenie po klimatu* [The Paris Climate Agreement]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/542655698> (accessed 24 October 2020).
2. *Postanovlenie «O prinyatii Parizhskogo soglasheniya» ot 21 sentyabrya 2019 goda № 1228* [Resolution «On the adoption of the Paris Agreement», September 21, 2019, no. 1228]. Available at: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72661694/> (accessed 24 October 2020).
3. *Strategiya dolgosrochnogo razvitiya rossiyskoy federatsii s nizkim urovнем vybrosov parnikovyykh gazov do 2050 goda* [Strategy for the long-term development of the Russian Federation with a low level of greenhouse gas emissions until 2050]. Available at: https://www.economy.gov.ru/material/file/babacbb75d32d90e28d3298582d13a75/proekt_strategii.pdf (accessed 24 October 2020).
4. De Oliveira Melo R., Costa M.G.F. Detecting natural gas leaks using digital images and novelty filters Filho C.F.F.C. *Lecture Notes in Computer Science*, 2012, vol. 7326 LNAI, pp. 242–249.
5. Ars S., Vogel F., Arrowsmith C., Knuckey E., Lavoie J., Lee C., Pak N.M., Phillips J.L., Wunch D., Heerath S. Investigation of the spatial distribution of methane sources in the greater toronto area using mobile gas monitoring systems. *Environmental Science and Technology*, 2020, vol. 54, no. 24, pp. 15671–15679.
6. Akopova G.S., Dorokhova E.V., Popov P.V. Estimation of methane losses with leaks from technological equipment of Gazprom gas transportation facilities. *Environmental protection, energy saving and environmental protection in the oil and gas complex: innovations, technologies, prospects*, 2013, no. 2, pp. 63–67. In Rus.
7. Lurie M.V., Musailov I.T., Lysenko N.O. An effective method for calculating gas leaks through through holes in the walls of gas pipelines and high-pressure vessels. *Territory Neftegaz*, 2020, no. 3–4, pp. 110–116. In Rus.
8. Paranuk A.A., Kunina PS, Meretukov M.A., Kokhuzheva R.B., Ryabukhin E.V. Mathematical modeling of natural gas leakage from a low-pressure pipeline. *Prospects for science*, 2020, no. 11 (134), pp. 215–222. In Rus.
9. Eminov R.A., Mursalov N.Z. Development of new methods for detecting leaks of hydrocarbon gas. *Control. Diagnostics*, 2019, no. 5, pp. 60–64. In Rus.
10. *STO Gazprom 027-2006. Tipovaya programma otsenki emissii prirodnoogo gaza na obektakh OAO «Gazprom»* [STO Gazprom 027-2006. A standard program for assessing natural gas emissions at Gazprom facilities]. Moscow, LLC «IRC Gazprom» Publ., 2006. 43 p.
11. *STO Gazprom 031-2007. Metodika provedeniya izmerenij obemov emissii metana v atmosferu na obektakh OAO «Gazprom»* [STO Gazprom 11-2005. Methodological guidelines for the calculation

- of gross emissions of hydrocarbons (in total) into the atmosphere in JSC «Gazprom»]. Moscow, LLC «IRC Gazprom» Publ., 2005. 39 p.
12. Schollaert C., Polka E., Scammell M.K., Ackley R.C., DeSantis A. Natural gas leaks and tree death: a first-look case-control study of urban trees in Chelsea, MA USA. *Environmental Pollution*, 2020, vol. 263, pp. 114464.
 13. Ars S., Vogel F., Arrowsmith C., Knuckey E., Lavoee J., Lee C., Pak N.M., Philips J.L., Wunch D., Heerah S. Investigation of the spatial distribution of methane sources in the greater toronto area using mobile gas monitoring systems. *Environmental Science and Technology*, 2020, vol. 54, no. 24, pp. 15671–15679.
 14. Hou Q., Zhu W. An ekf-based method and experimental study for small leakage detection and location in natural gas pipelines. *Applied Sciences (Switzerland)*, 2019, vol. 9, no. 15, pp. 3193.
 15. Lukonge A.B., Cao X., Pan Z. Experimental study on leak detection and location for gas pipelines based on acoustic waves using improved Hilbert–Huang transform. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 2021, vol. 12, no. 1, pp. 40–45.
 16. Aldhafeeri T., Tran M.-K., Vrolyk R., Pope M., Fowler M. A review of methane gas detection sensors: recent developments and future perspectives. *Inventions*, 2020, vol. 5, no 3, pp. 1–18.
 17. Uhl R., Reinhardt T., Haas U., Franzke J. Gas leak detection by diode laser absorption spectrometry. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 1999, vol. 54, no. 12, pp. 1737–1741.
 18. Ivanov E.S., Kitaev S.V. Resource-saving technology of the main gas pipeline section in repair with the production of gas compressor station on the GPU and consumer through a gas distribution station. *Territory Neftegaz*, 2015, no. 6, pp. 40–46. In Rus.
 19. Gadelshina A. R., Kitaev S. V., Galikeev A. R. Practical solution of the problem of saving natural gas by producing it with different types of gas pumping units operating according to the scheme in parallel. *Transportation and storage of petroleum products and hydrocarbon raw materials*, 2016, no. 1, pp. 5–8. In Rus.
 20. Ridel I.A., Dudin A.V. Innovative methods for implementing the program for assessing the volume of natural gas emissions at the facilities of a subsidiary company. *Gas Industry*, 2019, no. 3 (781), pp. 114–119. In Rus.

Received: 2 September 2021.

Information about the authors

Igor R. Baykov, Dr. Sc., professor, head of the Industrial Heat Power Engineering Department, Ufa State Petroleum Technical University.

Sergey V. Kitaev, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technical University.

Airat M. Shammazov, Dr. Sc., academician, Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan; president, Ufa State Petroleum Technical University.

Gadziakhmed I. Zubailov, Can. Sc., director, Scientific and Technical Center «Conformity Assessment» of JSC «Gipronigaz».

УДК 622.24.08

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ АЛМАЗНОГО БУРЕНИЯ

Нескоромных Вячеслав Васильевич¹,
sovair@bk.ru

Попова Марина Сергеевна¹,
zotovz2@bk.ru

Зотов Захар Геннадьевич¹,
alleniram83@mail.ru

Лиу Баочанг²,
liubc@jlu.edu.cn

¹ Сибирский федеральный университет,
Россия, 660025, г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 95.

² Университет Цзилинь,
Китай, 130061, г. Чанчунь, ул. Химинжу, 938.

Актуальность. Из всех известных способов проходки скважин алмазное бурение отличается высокой частотой вращения инструмента на больших глубинах. Такие условия разрушения горной породы требуют особого контроля параметров процесса бурения и их корректировки в случае нарушения баланса системы реализуемых сил. Все параметры процесса бурения в определенной степени взаимосвязаны. Для достижения наибольшей эффективности работы алмазного породоразрушающего инструмента требуется оптимальный механизм его эксплуатации. Анализ ситуации и подбор нужных показателей режима бурения алмазным инструментом довольно трудоемкая работа, которую в производственных условиях необходимо осуществлять непрерывно онлайн, поэтому актуальной является задача разработки автоматизированной системы управления процессом алмазного бурения с целью рациональной организации использования дорогостоящего алмазного инструмента. Автоматизация управления бурением осуществима путем применения современных технологий компьютерного программирования, алгоритм которого должен учитывать все требования оптимизации взаимозависимых параметров процесса бурения.

Целью исследования является разработка алгоритма управления системой алмазного бурения для дальнейшего внедрения его в программное обеспечение.

Объекты: процесс алмазного бурения скважин, технико-экономические показатели бурения и параметры, оказывающие влияние на результаты бурения.

Методы: аналитический метод, метод полного факторного эксперимента, метод моделирования.

Результаты. Основными параметрами, влияющими на итоги проводимых буровых работ, являются механическая скорость бурения, ресурс инструмента и мощность, затрачиваемая на разрушение горной породы. Использование в качестве критерия оптимальности величины углубления за оборот позволяет обеспечить приемлемую скорость бурения и низкие затраты мощности при сохранении высокого ресурса инструмента. Процесс управления алмазным бурением заключается в анализе изменения в конкретный момент времени механической скорости бурения и мощности, на основании которого принимается решение о корректировке величины частоты вращения и осевой нагрузки. Разработан алгоритм управления системой алмазного бурения, который может быть реализован доступным языком программирования.

Ключевые слова:

Бурение, управление, оптимизация, углубление за оборот, механическая скорость бурения, критерий оптимальности, алгоритм, режим бурения.

Введение

На сегодняшний день вращательное бурение различным алмазным буровым инструментом является наиболее перспективным и востребованным. При этом алмазное бурение отличается применением дорогостоящего инструмента, характеризующегося определенной сложностью механизма разрушения горной породы и углубления скважины [1–18]. Технология алмазного бурения предполагает высокочастотное вращение инструмента как на малых, так и на средних, и на больших глубинах [19–23]. Для получения хороших технико-экономических показателей необходимо осуществлять непрерывный контроль параметров процесса бурения с целью их корректировки и достижения оптимальных условий работ.

Наилучших результатов можно добиться лишь в том случае, если полностью реализован ресурс алмазного инструмента при высокой скорости бурения и низких затратах мощности на ее реализацию.

Метод комплексного анализа критериев

Перечисленные цели осуществимы путем применения методики управления процессом бурения на основе комплексного анализа критериев, базирующегося на методе полного факторного эксперимента [1, 6, 10]. В ранее проведенных научных исследованиях [1, 2, 10] данная методология демонстрирует возможности регулирования режимов бурения в наиболее благоприятной области их пределов. Такой подход возможен при наличии современных интерак-

тивных технологий, позволяющих фиксировать в режиме реального времени значения параметров бурения, а именно: частоты вращения (ω), осевой нагрузки (P), механической скорости бурения (v_m) и мощности (N). Собственно управление осуществляется на основе анализа эмпирических моделей зависимостей получаемых данных [1, 10]. Применение метода позволяет обеспечить рациональную обработку породоразрушающего инструмента при наилучших технико-экономических показателях путем регулирования технологии процесса бурения [1, 2, 10].

Рассмотрим особенности технологии бурения алмазным породоразрушающим инструментом (графические отображены на рис. 1). После приработки алмазной коронки на пониженных показателях частоты вращения и осевой нагрузки ($P \downarrow \omega \downarrow$) устанавливается режим постоянной механической скорости бурения (v_m) (линия 1–2, рис. 1). Критерием для определения оптимальной механической скорости бурения выступает показатель RPI , предоставляемый производителем породоразрушающего инструмента, или значение углубления скважины за один оборот ($h_{об}$), являющееся величиной обратной RPI :

$$RPI = \frac{1}{h_{об}}. \quad (1)$$

Как правило, показатель RPI фиксируется для конкретного типа бурового инструмента в виде рекомендуемого интервала значений, поэтому и оптимальное значение величины углубления за оборот может колебаться в определенных пределах (от h_{max} до h_{min}).

Учитывая, что механическая скорость бурения является произведением углубления ($h_{об}$) на частоту вращения (ω):

$$v_m = h_{об} \cdot \omega, \quad (2)$$

имея интервал оптимальных значений $h_{об} = h_{max} \dots h_{min}$, для достижения наилучшего результата величина постоянной механической скорости бурения (v_m) определяется по наибольшему из предложенных значений углубления за оборот – h_{max} . Для достижения заданных технологических условий подбираются такие показатели режимов бурения (P , ω), при которых обеспечена реализация принятой величины h_{max} .

Осевая нагрузка должна быть достаточной для внедрения реза в породу, но не превышать предел прочности породоразрушающего инструмента. В случае чрезмерного увеличения частоты вращения (ω) при неизменной осевой нагрузке (P) сопротивление породы внедрению инструмента начнет расти [9, 18], вследствие чего глубина внедрения реза в породу снизится, что отразится на значениях углубления за оборот и механической скорости бурения [2, 8, 16, 18]. Если увеличить осевую нагрузку ($P \uparrow$), не изменяя значения частоты вращения, значительно повысится мощность, затрачиваемая на разрушение горной породы ($N \uparrow$), при этом, учитывая особенности механизма разрушения горной породы алмазным резцом [2, 18], механическая скорость бурения не возрастет. Показатель мощности ограничен техническими возможностями оборудования и отражается на себесто-

имости буровых работ, любое повышение данного параметра нежелательно и влечет за собой ухудшение технико-экономических результатов. Поэтому в данной ситуации следует повысить осевую нагрузку ($P \uparrow$) и снизить частоту вращения ($\omega \downarrow$), что обеспечит более высокий уровень механической скорости бурения ($v_m \uparrow$) при незначительных изменениях мощности [2, 10]. По данной схеме на протяжении всего процесса бурения, в зависимости от изменения условий, осуществляется регулирование режимов бурения с целью непрерывного поддержания величины углубления за оборот в пределах выбранного значения h_{max} , т. е. $P\omega(f(h_{max}))$ (линия 1–2, рис. 1).

Однако такой механизм управления рационален при неизменном состоянии породоразрушающего инструмента. Со временем инструмент изнашивается и предложенный способ регулирования режимов бурения не приносит требуемых результатов, механическая скорость начинает неизменно падать ($v_m \downarrow$) (линия 2–2', рис. 1). При достижении механической скорости бурения значения, равного рейсовой скорости (v_p) [10], алмазную коронку необходимо изымать, ресурс ее считается исчерпанным. В этом случае размер проходки коронки составит L_1 (рис. 1). Ситуацию можно изменить, уменьшив величину критерия оптимизации – углубления за оборот, так, чтобы ее значение не выходило за пределы рекомендуемого производителем инструмента интервала – $h_{об} = h_2$, если $h_{max} < h_2 < h_{min}$. Таким образом, задав значение углубления за оборот, равное h_2 (в точке 2, рис. 1), можно остановить снижение скорости бурения, подобрав соответствующие заданным условиям режимы бурения (ω , P). Далее (по линии 2–3, рис. 1), придерживаясь вышеописанного механизма управления процессом, бурение осуществляется до тех пор, пока способность реализации заданного углубления не будет исчерпана, что произойдет с повышением уровня износа инструмента (точка 3, рис. 1). Механическая скорость снова приобретет тенденцию к снижению (линия 3–3', рис. 1). Предотвратить в данном случае падение скорости бурения будет возможно уменьшением в очередной раз величины критерия углубления, к примеру, до h_{min} . Таким образом, по мере износа инструмента, снижая значение критерия оптимизации ($h_{об}$), осуществимо увеличение его ресурса (проходка увеличится до L_3 , рис. 1).

Итак, для качественного управления системой алмазного бурения необходимо выделить критерий оптимизации, который должен быть задан в виде интервала оптимальных значений и иметь возможность изменяться в процессе бурения. Принимая в качестве такого параметра величину углубления за оборот, осуществимо управление механической скоростью бурения с учетом ресурса породоразрушающего инструмента.

Помимо этого, для обеспечения рациональности проведения работ необходимой процедурой также является регистрация и манипулирование величиной мощности, затрачиваемой на разрушение горных пород. Таким образом реализуется управление алмазным бурением на основе комплексной оценки оптимальности протекающих процессов.

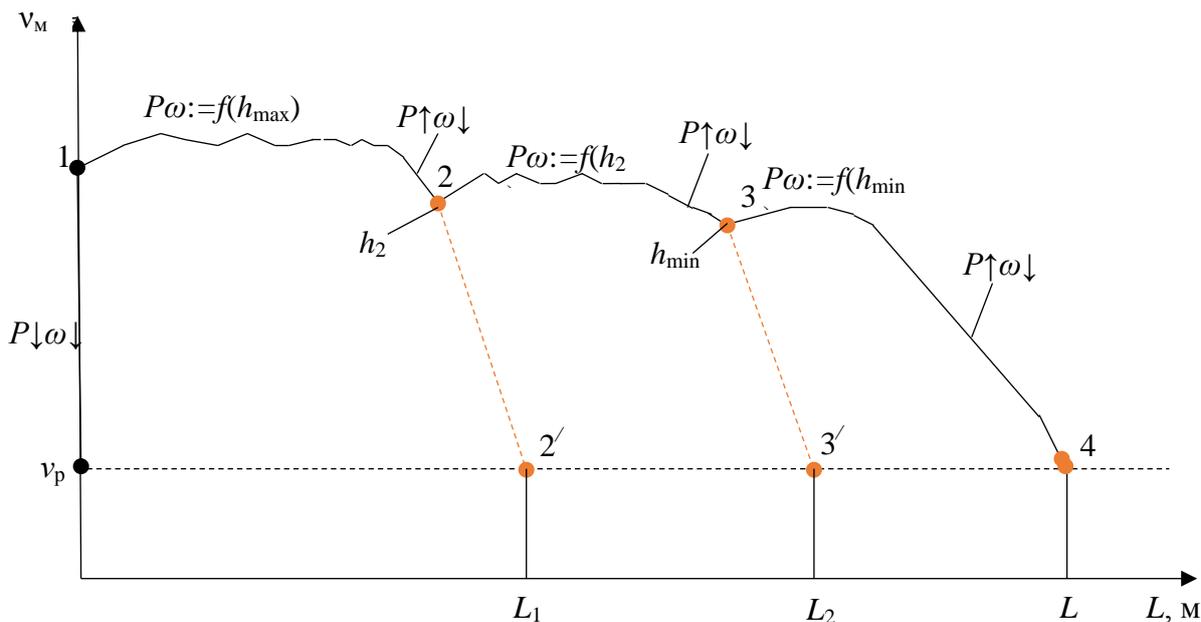


Рис. 1. Графическая интерпретация технологии процесса алмазного бурения
Fig. 1. Graphic interpretation of diamond drilling technology

Оптимальным считается бурение, энергоёмкость (W) которого стремится к минимуму. Учитывая, что данная величина определяется как отношение мощности к механической скорости бурения:

$$W = \frac{N}{v_m}, \quad (3)$$

для понижения энергоёмкости процесса необходимо обеспечение максимальной скорости бурения при минимальных затратах мощности [10].

Алгоритм управления системой алмазного бурения

Реализация предложенной методики целесообразна путем применения технологий компьютерного программирования, в алгоритм которого должны быть заложены описанные циклы управления.

Схематично регулирование алмазным бурением можно представить в виде рис. 2. Вводными являются параметры, фиксируемые датчиками, расположенными на забое скважины. Показатели частоты вращения (ω) и осевой нагрузки (P) в виде импульса передаются на поверхность, где воспринимаются персональным компьютером (ПК) и преобразуются в соответствующие числовые значения. Для описания условий, ограничивающих ресурс инструмента, вводится интервал изменения оптимальных значений углубления за оборот ($h_{об}$) и фиксированное значение рейсовой скорости (v_p). Непрерывно получая информацию о характере режима бурения на забое, программа проводит анализ возможных изменений механической скорости бурения (v_m) и мощности (N), затрачиваемой на разрушение забоя. Имея конкретные значения частоты вращения и осевой нагрузки, путем математических вычислений в каждый момент времени определяется значение механической скорости (по формуле (2)) и мощности (по формуле: $N = P\omega R\mu/97,5$, где

R – радиус торца бурового инструмента и μ – коэффициент сопротивления породы вращению бурового инструмента, заранее заданы как константы процесса). Полученные результаты сравниваются с аналогично определенными в предыдущий период времени. Если показатель механической скорости бурения в данный момент времени (v_i) больше, чем в предыдущий период (v_{i-1}), следовательно, механическая скорость растет ($v_i > v_{i-1} \rightarrow v_m \uparrow$). Если значение мощности в данный момент времени (N_i) меньше, чем в предыдущий (N_{i-1}), делается вывод о том, что затраты мощности снижаются ($N_i < N_{i-1} \rightarrow N \downarrow$), и так далее.

В момент, когда оказывается, что механическая скорость падает ($v_m \downarrow$), а мощность растет ($N \uparrow$), отдается команда о снижении частоты вращения ($\omega \downarrow$) и повышении осевой нагрузки ($P \uparrow$). В период роста и механической скорости бурения ($v_m \uparrow$), и мощности ($N \uparrow$) отдается команда о снижении осевой нагрузки ($P \downarrow$) и повышении частоты вращения ($\omega \uparrow$). Если механическая скорость растет ($v_m \uparrow$), а мощность падает ($N \downarrow$) – о снижении осевой нагрузки ($P \downarrow$) и повышении частоты вращения ($\omega \uparrow$). В случае если многочисленные преобразования не привели к должному результату, программой отдается команда о снижении критерия оптимизации – значения углубления за оборот ($h_{об} \downarrow$), и цикл повторяется (рис. 2).

Перспективы автоматизации алгоритма управления системой алмазного бурения

Автоматизация предложенного алгоритма управления возможна путем использования различных языков программирования, даже такого доступного для пользователей ПК, как язык визуального программирования *TouchDesigner* компании *Derivative*. *TouchDesigner* прост в применении и не требует фун-

даментальных знаний, при этом обладает всеми необходимыми возможностями для интерактивного мультимедийного контента в реальном времени, обладает поддержкой различных устройств, совместим с дру-

гими программами, а главное – компатибелен с датчиками всевозможных типов, что важно при решении поставленной задачи.

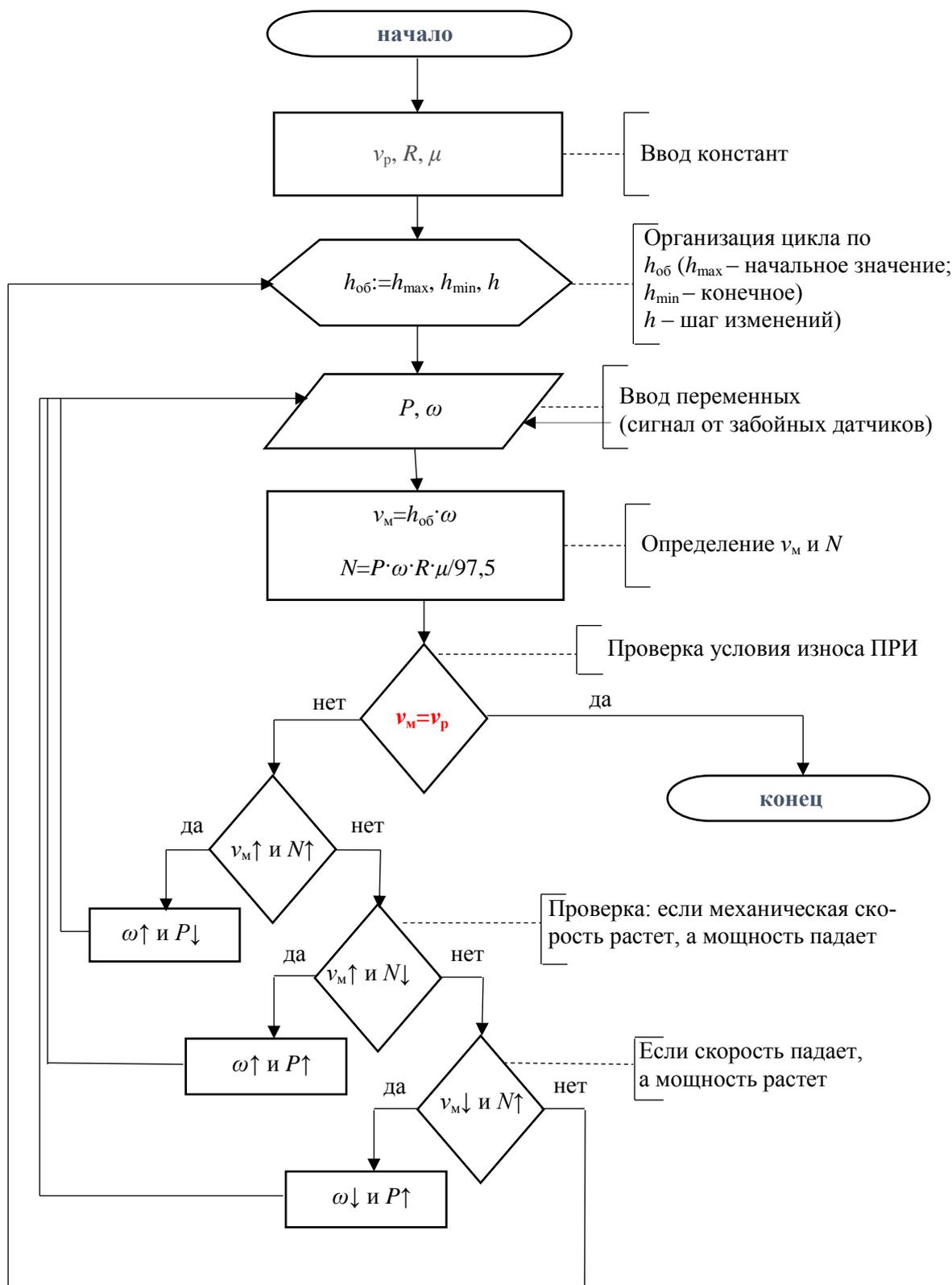


Рис. 2. Схема алгоритма управления алмазным бурением
 Fig. 2. Diagram of the diamond drilling control algorithm

TouchDesigner представлен в виде конструктора блоков с определенными функциями. Его функции разделены на категории: *COMP* – создание диалоговых окон, *TOP* – мультимедиа 2D, *CHOP* – математическая модель, *SOP* – геометрия, *MAT* – материал, *DAT* – база данных и текст. Каждая категория имеет свои возможности и их совокупности отлично дополняют друг друга для реализации проекта.

С целью проверки функциональности языка *TouchDesigner* на первом этапе было разработано программное обеспечение, позволяющее одним кликом преобразовывать полученные в режиме реального времени значения параметров режимов бурения в графическую интерпретацию эмпирических моделей механической скорости бурения, углубления за оборот и энергоёмкости, получаемых по методике [1] (рис. 3, 4).

Принимаемые в режиме реального времени режимные параметры фиксируются программой в модуле «Входные данные» (рис. 3, а). Так как на первом этапе научных исследований совмещение программного обеспечения с реальной системой бурения преждевременно и нерационально, благодаря возможностям языка *TouchDisigne* производится моделирование производственных ситуации. Изменение режимов бурения в заранее заданных пределах осуществляется путем плавного регулирования их значений в соответствующем окне интерфейса программы.

Опираясь на полученную информацию в сегменте «Коэффициенты» (рис. 3, б), производятся все необходимые расчеты, результаты которых выводятся в сегмент «Математическая модель» (рис. 3, в), где и составляются по методике [1] модели, отражающие зависимость механической скорости, мощности и энергоёмкости от режимов бурения.

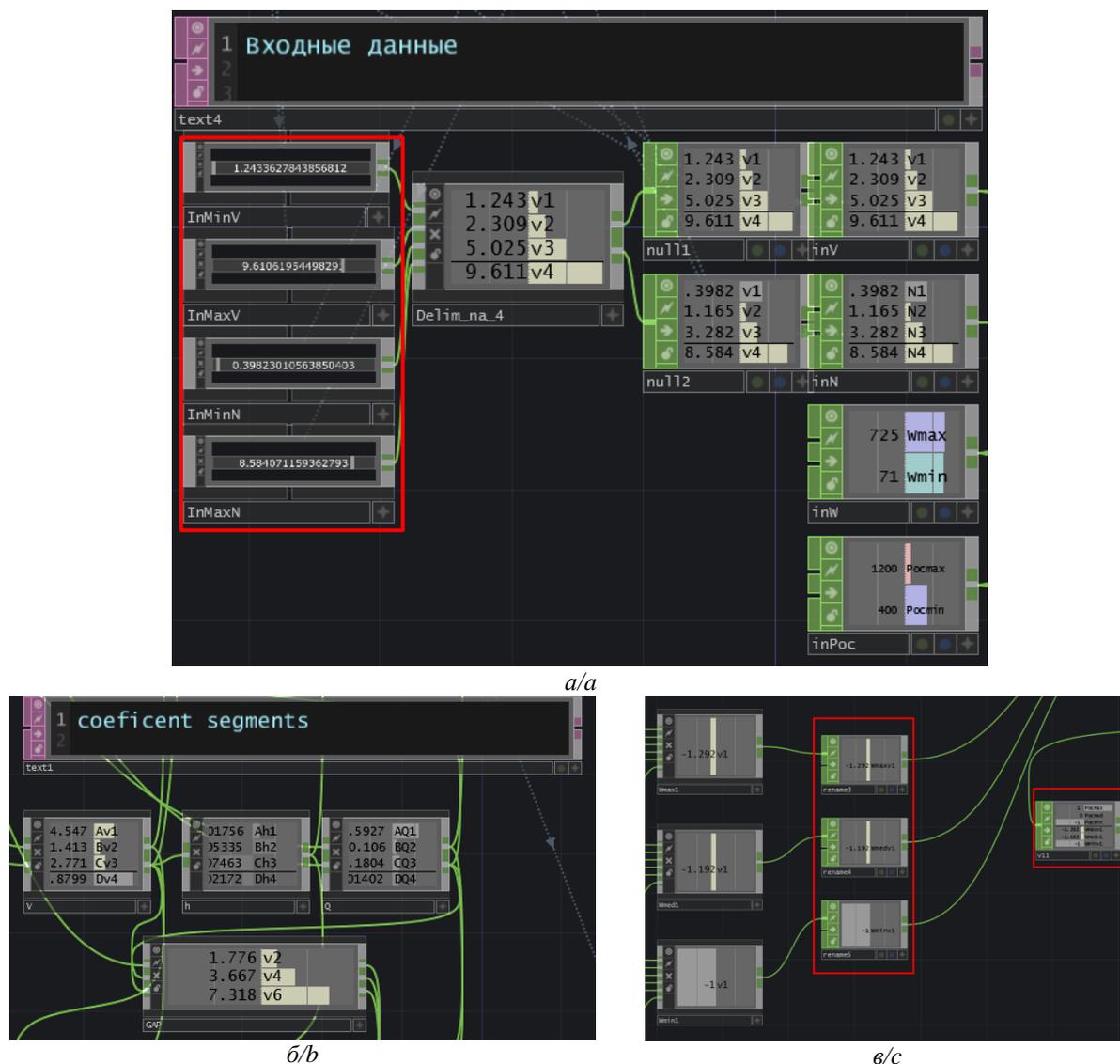


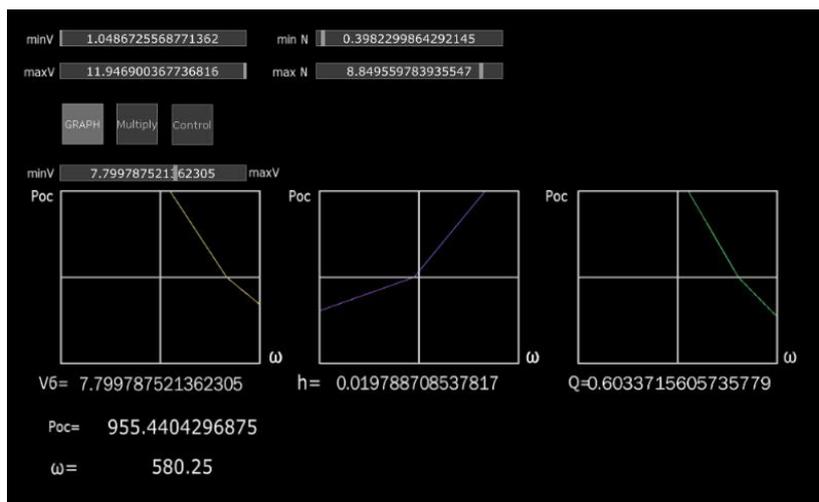
Рис. 3. Реализация методики управления бурением по методу [1] языком *TouchDesigner*: а) ввод данных в режиме реального времени; б) определение эмпирических коэффициентов моделей зависимостей параметров; в) расчет показателей

Fig. 3 Implementation of the drilling control methodology [1] using the *TouchDesigner* language: а) online data entry; б) determination of empirical coefficients of parameter dependence models; в) calculation of indicators

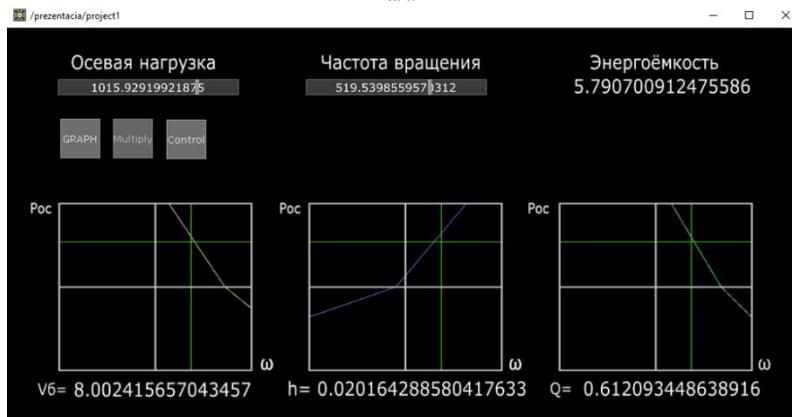
Полученные результаты программной обработки в виде координат точек выводятся в графическом сегменте. Для удобства и наглядности в программе введена функция «*GRAPH*» (рис. 4). При нажатии кнопки *GRAPH* активируется режим изменения значения механической скорости бурения (рис. 4, а). На первом этапе программирования с целью проверки адекватности работы программы и моделирования процесса бурения изменение значения механической скорости бурения реализуется вручную с помощью перемещения специального ползунка. Уменьшая или увеличивая значение механической скорости бурения, на экране

можно наблюдать как при этом изменяются графики, отражающие зависимость показателя углубления за оборот от режимов бурения (P и ω) (рис. 4, а).

Аналогичным образом посредством языка *TouchDesigner* была предпринята попытка решения обратной задачи, в результате чего имеется программный продукт, позволяющий изменением режимов бурения (вручную, перемещением ползунка) осуществлять управление показателем энергоёмкости (рис. 4, б), что позволяет определить наиболее рациональный режим бурения, обеспечивающий оптимальную для данных условий энергоёмкость процесса.



a/a



б/б

Рис. 4. Пример интерфейса программного обеспечения, реализуемого языком *TouchDesigner*: а) графическая интерпретация эмпирических моделей механической скорости бурения, углубления за оборот; б) управление энергоёмкостью процесса бурения

Fig. 4. Example of a software interface implemented by the *TouchDesigner* language: а) graphic interpretation of empirical models of ROP, deepening per revolution; б) energy management of drilling

Результаты исследования полученного экспериментального программного продукта указывают на возможность автоматизации управления системой алмазного бурения путем применения языка программирования, например, такого как *TouchDesigner*. А значит, управление на основе комплексного анализа критериев возможно и перспективно. *TouchDesigner* демонстрирует свою гибкость при оценке технологической ситуации, своевременно осуществляет сбор и обработку данных в режиме реального времени.

Особым преимуществом *TouchDesigner* является восприимчивость к сигналам, получаемым с разных датчиков. А самообучаемость программы в дальнейшем позволит ускорить обработку данных режима бурения и выдать правильное решение онлайн.

На основе проведенной научной работы определена перспектива разработки программного продукта на языке *TouchDesigner*, алгоритм которого должен быть основан на методике управления процессом бурения по принципу комплексного анализа критериев, бази-

рующегося на методе полного факторного эксперимента (подробнее с методикой можно ознакомиться в ранее выполненных работах [1, 2, 6, 10]).

Выводы

1. Интерактивное управление процессом алмазного бурения является актуальной производственной и научной задачей.
2. Качественное управление системой алмазного бурения возможно с учетом всех составляющих бурения: типа породоразрушающего инструмента, механизма разрушения им горных пород, режимов бурения и т. д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нескоромных В.В., Попова М.С. Разработка методики управления процессом бурения на основе комплексного анализа критериев // Записки Горного Института. – 2019. – Т. 240. – С. 701–710.
2. Нескоромных В.В., Попова М.С., Баочанг Л. Разрушение горных пород при бурении скважин алмазным буровым инструментом: монография. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2020. – 268 с.
3. Принципы конструирования и эксплуатации алмазного породоразрушающего инструмента / А.А. Буканов, Л.К. Горшков, А.И. Осецкий, Н.В. Соловьев // Разведка и охрана недр. – 2013. – № 7. – С. 44–49.
4. Brook B. Principles of diamond tool technology for sawing rock // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2002. – V. 39 (1). – P. 41–58.
5. Tonon F., Amadei B. Effect of elastic anisotropy on tunnel wall displacements behind a tunnel face // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2002. – V. 35 (3). – P. 141–160.
6. Коротков А.В. Современный взгляд на основные задачи оптимизации алмазного бурения // Известия сибирского отделения РАН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – 2011. – Т. 2 (39). – С. 205–209.
7. Detournay E., Richard T., Shepherd M. Drilling response of drag bits: theory and experiment // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2008. – V. 45 (8). – P. 1347–1360.
8. Basarir H., Karpuz C. Preliminary estimation of rock mass strength using diamond bit drilling operational parameters // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. – 2016. – V. 30 (2). – P. 145–164.
9. Борисов К.И. Современные методы оценки сопротивления горных пород резанию-скалыванию при бурении долотами PDC: монография. – Томск: ТПУ, 2013. – 166 с.
10. Нескоромных В.В. Оптимизация в геологоразведочном производстве. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2013. – 246 с.
11. Инновационные подходы к конструированию высокоэффективного породоразрушающего инструмента / А.Я. Третьяк, В.В. Попов, А.Н. Гроссу, К.А. Борисов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 8. – С. 225–230.
12. Su O., Ali Akcin. Numerical simulation of rock cutting using the discrete element method // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2011. – V. 48 (3). – P. 434–442.
13. Hasan A.R., Kabir C.S. Wellbore heat-transfer modeling and applications // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2012. – V. 96–97. – P. 109–119.
14. A novel method for measuring and analyzing the interaction between drill bit and rock / X. Wang, Z. Wang, D. Wang, L. Chai // Measurement. – 2018. – V. 121. – P. 344–354.
15. Kanyanta V., Ozbayraktar S., Maweja K. Effect of manufacturing parameters on polycrystalline diamond compact cutting tool stress-state // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2014. – V. 45. – P. 147–152.
16. Che D., Zhu W.-L., Ehmman K.F. Chipping and crushing mechanisms in orthogonal rock cutting // International Journal of Mechanical Sciences. – 2016. – № 119. – P. 224–236.
17. Евсеев В.Д., Мавлютов М.Р. Пути повышения эффективности разрушения горных пород // Материалы региональной конференции геологов Сибири, Дальнего Востока и Северо-Востока России. – Томск, 2000. – Т. 1. – С. 463–465.
18. Нескоромных В.В., Попова М.С., Харитонов А.Ю. Влияние сил сопротивления на глубину резания-скалывания горной породы алмазным резцом // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 10. – С. 40–48.
19. Closed-form solution of stress state and stability analysis of wellbore in anisotropic permeable rocks / D.-P. Do, N.-H. Tran, H.-L. Dang, D. Hoxha // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2019. – V. 113. – P. 11–23.
20. Optimization model for polycrystalline diamond compact bits based on reverse design / Z. Ai, Y. Han, Y. Kuang, Y. Wang, M. Zhang // Advances in Mechanical Engineering. – 2018. – V. 10 (6). – P. 476–479.
21. Numerical investigations on the effect of ultra-high cutting speed on the cutting heat and rock-breaking performance of a single cutter / M. Gao, K. Zhang, Q. Zhou, H. Zhou, B. Liu, G. Zheng // Journal of Petroleum Science and Engineering. – July 2020. – V. 190. – Article № 107120.
22. Integrated FEA modeling offers system approach to drillstring optimization / H. Aslaksen, M. Annand, R. Duncan, A. Fjaere, L. Paez, U. Tran // Society of Petroleum Engineers/SPE Drilling Conference. – Miami, Florida, USA, 2006. – P. 669–684. DOI: 10.2118/99018-MS
23. Huang H., Lecampion B., Detournay E. Discrete element modeling of tool-rock interaction I: Rock cutting // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. – 2013. – № 37 (13). – P. 1913–1929.

Поступила: 11.10.2021 г.

Информация об авторах

Нескоромных В.В., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и техники разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета.

Попова М.С., кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и техники разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета.

Зотов З.Г., студент кафедры технологии и техники разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета.

Лиу Баочанг, профессор геотехнологий кафедры разведки и бурения, Университет Цзилинь.

UDC 622.24.08

ALGORITHM OF DIAMOND DRILLING SYSTEM CONTROL

Vyacheslav V. Neskoromnykh¹,
sovair@bk.ru

Marina S. Popova¹,
alleniram83@mail.ru

Zakhar G. Zotov¹,
zotovz2@bk.ru

Liu Baochang²,
liubc@jlu.edu.cn

¹ Siberian Federal University,
95, Krasnoyarskiy rabochiy avenue, Krasnoyarsk, 660095, Russia.

² Jilin University,
938, Ximinzhū street, Changchun, 130026, China.

The relevance. Diamond drilling is characterized by high rotational speed of the tool at great depths. Such conditions of rock destruction require special control of drilling parameters and their correction. All drilling parameters are interrelated. To achieve the most efficient operation of a diamond rock cutting tool, an optimal mechanism for its operation is required. Analysis of the situation and selection of the required parameters of the drilling mode with diamond tools is the laborious work. This must be done continuously online. The urgent task is the development of the automated control system for diamond drilling in order to rationalize the use of diamond tools. This is possible with the use of modern computer programming technologies. Software algorithm must take into account all the requirements for optimizing the interdependent drilling parameters.

The main aim of the research is to develop a control algorithm for a diamond drilling system for its further implementation into software.

Objects: diamond drilling, technical and economic indicators of drilling and parameters affecting the results of drilling.

Methods: analytical method, full factorial experiment method, modeling method.

Results. The main parameters affecting the results of drilling operations are ROP, tool life and power spent on rock destruction. The deepening per revolution as an optimality criterion makes it possible to ensure an acceptable drilling speed and low power consumption while maintaining a high resource of the tool. The control process for diamond drilling consists in analyzing the change at a specific point in time in ROP and power. After the analysis, a decision is made to correct the value of the speed and axial load. A control algorithm for the diamond drilling system was developed. The algorithm can be implemented in an accessible programming language.

Key words:

Drilling, control, optimization, deepening per revolution, ROP, optimality criterion, algorithm, drilling mode.

REFERENCES

1. Neskoromnykh V.V., Popova M.S. Development of a drilling process control technique based on a comprehensive analysis of the criteria. *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 240, pp. 701–710. In Rus. DOI: 10.31897/pmi.2019.6.701.
2. Neskoromnykh V.V., Popova M.S., Liu Baochang. *Razrusheniye gornyykh porod pri burenii skvazhin almaznym burovym instrumentom. Monografiya* [Destruction of rocks when drilling wells with diamond drilling tools: monograph]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University Publ., 2020. 268 p.
3. Bukanov A.A., Gorshkov L.K., Osetskii A.I., Soloviev N.V. Printsipy konstruirovaniya i ekspluatatsii almaznogo porodorazrushayushchego instrumenta [Principles for the design and operation of diamond rock cutting tools]. *Razvedka i okhrana nedr*, 2013, no. 7, pp. 44–49.
4. Brook B. Principles of diamond tool technology for sawing rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, vol. 39 (1), pp. 41–58.
5. Tonon F., Amadei B. Effect of elastic anisotropy on tunnel wall displacements behind a tunnel face. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2002, vol. 35, no. 3, pp. 141–160.
6. Korotkov A.V. Sovremennyy vzglyad na osnovnyye zadachi optimizatsii almaznogo bureniya [A modern look at the main tasks of optimization of diamond drilling]. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya RAEN. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdeniy*, 2011, no. 2 (39), pp. 205–209.
7. Detournay E., Richard T., Shepherd M. Drilling response of drag bits: theory and experiment. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, vol. 45 (8), pp. 1347–1360.
8. Basarir H., Karpuz C. Preliminary estimation of rock mass strength using diamond bit drilling operational parameters. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2016, vol. 30 (2), pp. 145–164.
9. Borisov K.I. *Sovremennyye metody otsenki soprotivleniya gornyykh porod rezaniyu–skalyvaniyu pri burenii dolotami PDC. Monografiya* [Modern methods for assessing the resistance of rocks to cutting–chipping when drilling with PDC bits. Monograph]. Tomsk, TPU Publ. house, 2013. 166 p.
10. Neskoromnykh V.V. *Optimizatsiya v geologorazvedochnom proizvodstve* [Optimization in geological survey production]. Moscow, INFRA-M Publ.; Krasnoyarsk, SFU Publ., 2013. 246 p.
11. Tretyak A.Ya., Popov V.V., Grossu A.N., Borisov K.A. Innovative approaches to the design of highly efficient rock cutting tools. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2017, no. 8, pp. 225–230. In Rus.
12. Su O., Ali Akcin. Numerical simulation of rock cutting using the discrete element method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, vol. 48 (3), pp. 434–442.
13. Hasan A.R., Kabir C.S. Wellbore heat-transfer modeling and applications. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2012, vol. 96–97, pp. 109–119.
14. Wang X., Wang Z., Wang D., Chai L. A novel method for measuring and analyzing the interaction between drill bit and rock. *Measurement*, 2018, vol. 121, pp. 344–354.

15. Kanyanta V., Ozbayraktar S., Maweja K. Effect of manufacturing parameters on polycrystalline diamond compact cutting tool stress-state. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2014, vol. 45, pp. 147–152.
16. Che D., Zhu W.-L., Ehmann K.F. Chipping and crushing mechanisms in orthogonal rock cutting. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2016, no. 119, pp. 224–236.
17. Evseev V.D., Mavlyutov M.R. Puti povysheniya effektivnosti razrusheniya gornykh porod [Ways to increase the efficiency of rock destruction]. *Materialy regionalnoy konferentsii geologov Sibiri, Dalnego Vostoka i Severo-Vostoka Rossii* [Proceedings of the regional conference of geologists of Siberia, the Far East and the North-East of Russia]. Tomsk 2000. Vol. I, pp. 463–465.
18. Neskoromnykh V.V., Popova M.S., Kharitonov A.Yu. Influence of resistance forces on the depth of rock cutting–chipping by a diamond cutter. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 10, pp. 40–48. In Rus.
19. Do D.-P., Tran N.-H., Dang H.-L., Hoxha D. Closed-form solution of stress state and stability analysis of wellbore in anisotropic permeable rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, vol. 113, pp. 11–23.
20. Ai Z., Han Y., Kuang Y., Wang Y., Zhang M. Optimization model for polycrystalline diamond compact bits based on reverse design. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, vol. 10 (6), pp. 476–479.
21. Gao M., Zhang K., Zhou Q., Zhou H., Liu B., Zheng G. Numerical investigations on the effect of ultra-high cutting speed on the cutting heat and rock-breaking performance of a single cutter. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, July 2020, vol. 190, article no. 107120.
22. Aslaksen H., Annand M., Duncan R., Fjaere A., Paez L., Tran U. Integrated FEA modeling offers system approach to drillstring optimization. *Society of Petroleum Engineers/SPE Drilling Conference*. Miami, Florida, USA, 2006. pp. 669–684. DOI: 10.2118/99018-MS
23. Huang H., Lecampion B., Detournay E. Discrete element modeling of tool-rock interaction I: Rock cutting. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2013, no. 37 (13), pp. 1913–1929.

Received: 11 October 2021.

Information about the authors

Vyacheslav V. Neskoromnykh, Dr. Sc., professor, head of the department of technology and equipment of investigation, Siberian Federal University.

Marina S. Popova, Cand. Sc., associate professor, Siberian Federal University.

Zakhar G. Zotov, student, Siberian Federal University.

Liu Baochang, professor, Jilin University.

УДК 622.276

ВЛИЯНИЕ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА НЕФТИ НА КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ФОРМИРУЕМЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ

Илюшин Павел Юрьевич¹,
ilushin-pavel@yandex.ru

Вяткин Кирилл Андреевич¹,
kirill.vyatkin@girngm.ru

Козлов Антон Вадимович¹,
anton.kozlov@girngm.ru

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью увеличения точности моделирования процессов тепломассопереноса и образования органических отложений в нефтяных скважинах и линейных нефтепроводах. Во множестве моделей образования органических отложений опускается влияние их коэффициента теплопроводности на процесс конвективного тепломассопереноса в гетерогенной среде, однако учет данного параметра может значительным образом повлиять на получаемый результат, увеличивая термическое сопротивление трубопровода. Тепломассоперенос в объеме углеводородов является сложным процессом, который рассматривается как конвективный теплообмен, при котором учитываются процессы молекулярной диффузии вещества. В рамках данной работы рассматривается анализ диффузионных механизмов переноса тепла в органических отложениях, однако процессом диффузии вещества предлагается пренебречь. Образование данных отложений является одним из наиболее серьезных осложнений при добыче углеводородов на различных месторождениях по всему миру, в частности в Пермском крае.

Цель: оценить степень влияния компонентного состава флюида и его вязкости на коэффициент теплопроводности органических отложений данного флюида; определить возможность оценки коэффициента теплопроводности органических отложений без проведения дополнительных лабораторных исследований.

Методы: проведение лабораторных исследований на установке «WaxFlowLoop», определение компонентного состава флюида методом газовой хроматографии.

Результаты. Для характеристики компонентного состава флюида была принята величина отношения низкомолекулярных (C₅–C₁₆) компонентов к высокомолекулярным (C₁₇–C₆₀₊). По результатам проведенных исследований получено, что коэффициент теплопроводности органических отложений увеличивается с ростом доли низкомолекулярных углеводородов в составе исследуемого флюида. Также определено наличие корреляции между динамической вязкостью флюида и величиной коэффициента теплопроводности органических отложений, снижающимся с ростом вязкости флюида.

Выводы. Полученные экспериментальные результаты позволяют сделать вывод о возможности прогнозирования величины коэффициента теплопроводности органических отложений по свойствам исходного флюида. Использование величины коэффициента теплопроводности асфальтосмолопарафиновых отложений в процессе моделирования его образования, а также полученные корреляционные зависимости, позволят существенно продвинуться в вопросах моделирования процесса теплопередачи между флюидом и стенкой и образования органических отложений в нефтедобывающих скважинах и подземных нефтепроводах.

Ключевые слова:

Коэффициент теплопроводности, органические отложения, моделирование, нефтяная скважина, лабораторные исследования.

Введение

В процессе добычи, транспортировки и первичной подготовки нефти отмечается образование органических отложений на внутренних поверхностях лифтовых колонн, линейных нефтепроводов и нефтепромыслового оборудования [1, 2]. Примерами таких органических отложений могут являться асфальтосмолопарафиновые отложения (АСПО). Проблема выпадения данных отложений является одной из наиболее серьезных в современной нефтедобыче [3, 4]. Особенно сильно данная проблема осложняется на месторождениях углеводородов, переходящих на поздние стадии разработки, к которым относится большинство месторождений Пермского края [5]. Формирование данных частиц в потоке углеводородов и их дальнейшая адгезия на холодных поверхностях ведет к росту давления в системе сбора, нарушению работы

нефтепромыслового оборудования и может стать причиной аварии [6–8].

В современной нефтедобывающей отрасли имеется тренд на цифровизацию производства, в том числе разработку и внедрение «цифровых двойников» месторождений и компьютерное моделирование процессов нефтедобычи и транспортировки [9, 10]. Для успешного внедрения данных технологий необходимо наличие большого объема данных о свойствах флюидов, законах их течения и тепломассопереноса. В процессе проектирования разработки, добычи и транспортировки углеводородов одной из важнейших задач является проведение комплексного исследования флюида и оценка вероятности адгезии данных отложений, а также пространственно-временное распределение сформированных отложений [11, 12]. При корректном проектировании данных параметров ста-

новится возможным наиболее точно оценивать необходимость проведения очистных мероприятий на проектируемом объекте, внедрение оборудования для борьбы с АСПО и т. д. [13–15].

Моделирование процессов образования органических отложений происходит в различных программных комплексах. Примерами таких программ могут служить Schlumberger-PIPESIM, Multiflash, Flow Assurance OLGA, LedaFlow Software. Большинство моделей парафинообразования, описанных в научной литературе, учитывают состав флюида, термобарические и скоростные условия его течения [16–19]. Авторами рассмотрено три модели парафинообразования: «Matzane Model», «Model RRR», «Heat Analogy» [20]. Первые две модели учитывают процесс молекулярной диффузии или сдвиговой дисперсии как основные механизмы образования отложений, третья же модель основана на тепловой аналогии. Общим параметром, учитываемым во всех рассмотренных моделях, является наличие температурного градиента между потоком флюида и холодной поверхностью [21–23]. Однако при моделировании процессов образования органических отложений не учитывается величина коэффициента теплопроводности АСПО, способная оказать значительное влияние на скорость образования данных отложений.

В исследовании [24] показано, что при заполнении нефтепровода органическими отложениями более чем на 5 % величина их термического сопротивления становится доминирующей в общем термическом сопротивлении нефтепровода. В работе [25] проведено моделирование образования АСПО при различных величинах их коэффициента теплопроводности. Показано, что при увеличении коэффициента теплопроводности с 0,1 до 0,4 Вт/(м·К) прогнозируемая толщина сформированных отложений изменяется на 50 %, что подтверждает важность коэффициента теплопроводности АСПО при прогнозировании их образования.

Несмотря на несомненную важность данного параметра, единой методики его определения не существует. Во множестве известных научных работ величина коэффициента теплопроводности принималась равной постоянной величине, значение которой нередко не соответствует известному диапазону значений коэффициента теплопроводности АСПО. Целью данной работы является определение влияния компонентного состава флюида на коэффициент теплопроводности формируемых отложений. Определение коэффициента теплопроводности АСПО проводилось по разработанной ранее методике, позволяющей с достаточной точностью оценить эту величину при исследовании процесса образования органических отложений на лабораторной установке «Wax Flow Loop» [13]. Основные элементы этой методики представлены в главе «Методика лабораторных исследований».

Методика лабораторных исследований

Лабораторная установка «Wax Flow Loop» представляет собой замкнутый гидравлический контур, позволяющий исследовать процессы парафинообра-

зования при различных термобарических условиях. Лабораторный стенд представлен на рис. 1 и включает в себя: насос (а), дифференциальный манометр (б), тестовую секцию (с), охлаждаемую через внешний трубопровод (d), сырьевую емкость (h) с внешним жидкостным охлаждением (m) и датчиком уровня жидкости (i). С целью контроля температуры в охлаждающих устройствах (d) и (m) используются циркуляционные термостаты (е) и (g) соответственно. Контроль массового расхода жидкости и ее плотности осуществляется расходомером (f). Краны – 1 и 5 применяются при проверке уровня жидкости в сырьевой емкости. При необходимости ограничения поступления жидкости в рабочую часть установки необходимо перекрыть кран – 2. Краны – 3 и 4 применяются при промывках или необходимости организации движения по импульсным линиям, ведущим к дифференциальному манометру.

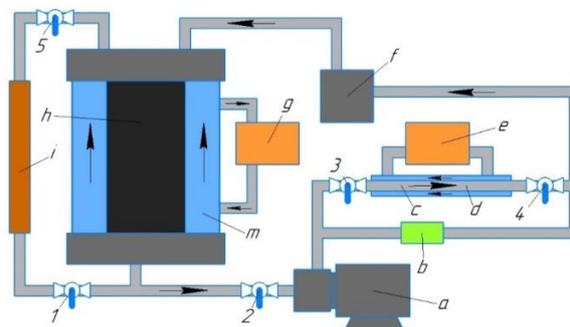


Рис. 1. Гидравлическая схема установки «WaxFlowLoop»
Fig. 1. Hydraulic diagram of the «WaxFlowLoop» installation

Работа установки «WaxFlowLoop» основана на контроле термобарических условий циркуляции исследуемого флюида и температуры стенки тестовой секции. Давление в системе задается благодаря закачке в сырьевую емкость азота по специальному каналу (не представлен на рисунке). При создании и поддержании достаточного градиента температур возникает явление образования органических отложений.

Возможности данной установки позволяют моделировать процессы течения флюида в реальном трубопроводе. Подбор массового расхода, а соответственно и скорости движения флюида, обеспечивает кинематическое подобие. Изготовление тестовой секции из нержавеющей стали, качественный отбор проб и корректный выбор термобарического режима позволяют сделать вывод о тепловом подобии режимов движения жидкости и образования отложений в данной установке и в реальном нефтепроводе. Причем тепловое подобие будет соблюдаться исключительно в условии сохранения скорости движения жидкости и перепада температур. Благодаря наличию множества датчиков параметры работы установки непрерывно записываются и могут быть обработаны по окончании исследования. Исследования на установке «WaxFlowLoop» проводятся в течение 8–36 часов. По окончании исследования формируется база данных, содержащая все полученные в ходе исследования

данные. Определение толщины органических отложений выполняется с помощью уравнения (1), представляющего из себя уравнение Пуазейля для ламинарного режима течения при расчетах потерь давления в трубопроводе.

$$d = \left(\frac{Q_{128\eta l}}{\pi \Delta P} \right)^{1/4}, \quad (1)$$

где ΔP – перепад давления в трубопроводе, МПа; Q – объемный расход смеси, м³/с; η – вязкость смеси, м²/с; l – длина трубы, м; d – диаметр трубы, м.

Причем вязкость нефти определялась по этой же формуле при движении нефти по тестовой секции в условии отсутствия градиента температур.

Далее приведены характеристики установки и параметры проведения одного из лабораторных исследований.

Таблица. Параметры проведения исследования

Table. Parameters of the study

Параметр/Parameter		Размерность Dimension	Величина Value
Динамическая вязкость нефти Oil dynamic viscosity	при (at) 20 °C	мПа·с mPa·s	2,3
	при (at) 5 °C		6,9
Плотность нефти/Oil density		кг/м ³ /kg/m ³	857,4
Коэффициент теплопроводности материала тестовой секции Thermal conductivity of the test section material		Вт/(м·°K) W/(m·°K)	90
Массовый расход жидкости Mass flow rate of liquid		кг/ч kg/h	4,58
Температура на выходе из тестовой секции Temperature at the outlet of the test section	В начале исследования At the beginning of the study	°C	13,51
	В конце исследования At the end of the study	°C	15,71
Температура охлаждения тестовой секции Cooling temperature of the test section		°C	5
Толщина органических отложений в конце исследования Thickness of organic deposits at the end of the study		мм mm	0,792
Температурный напор в тестовой секции Temperature pressure in the test section		°C	2
Диаметр тестовой секции Diameter of the test section		мм mm	4,57
Скорость движения нефти в установке Oil movement speed in the installation		м/с m/s	0,079

В рамках проведенной работы выполнено моделирование движения флюида в тестовой секции в программном комплексе «Ansys Fluent». Свойства флюида, температурный режим и скорость его течения принимались идентично данным, приведенным в таблице. В результате получено, что длина термического начального участка тестовой секции составляет от 10 до 15 % от ее длины.

Определение коэффициента теплопроводности органических отложений предполагает высокую точность регистрируемых параметров. Все величины должны изменяться линейно, а величины массового расхода, температуры на входе в тестовую секцию и в

циркуляционных термостатах изменяться не более чем на 5 %.

Основой методики определения коэффициента теплопроводности АСПО является вычисление термического сопротивления стенки тестовой секции до и после образования органических отложений. Преимуществом данной методики является определение коэффициента теплопроводности в условиях парафинообразования без физического воздействия на АСПО, а значит без изменения их поровой структуры. Определение коэффициента теплопроводности производится по выражению (2).

$$\lambda_{\text{АСПО}} = \frac{\ln \frac{d_2}{d_3}}{2 \cdot (R_l^* - R_l)}, \quad (2)$$

где R_l – термическое сопротивление до образования АСПО, (м·°K)/Вт; R_l^* – термическое сопротивление после образования АСПО, (м·°K)/Вт; d_2 – внешний диаметр тестовой секции, м; d_3 – внутренний диаметр тестовой секции после образования органических отложений, м.

Допущением применения данной методики является равномерное распределение толщины органических отложений по длине тестовой секции, поскольку оценить действительный профиль адгезированных отложений не представляется возможным. Однако стоит отметить, что наличие неравномерности распределения органических отложений в тестовой секции не окажет значительного влияния на ее суммарное термическое сопротивление. Также данная методика апробирована лишь для однофазных потоков, что является технологическим ограничением работы установки.

Для каждого из исследуемых флюидов был определен компонентный состав по стандарту ASTM 7213 с помощью газовой хроматографии методом SimDis. Хроматограф Agilent 7890B с детектором ионизации пламени, газ носитель – гелий, колонка капиллярная (5 м), представлен на рис. 2. С помощью калибровочной таблицы по значениям температуры кипения рассчитывался компонентный состав исследуемых проб. В программном продукте PVTsim сформированы таблицы PVT свойств.



Рис. 2. Хроматограф Agilent 7890B

Fig. 2. Chromatograph Agilent 7890B

Результаты лабораторных исследований

Далее представлены результаты обработки ряда лабораторных исследований по определению коэффициента теплопроводности АСПО, сформированных при исследовании различных флюидов. Данные ис-

следования проведены на 20 пробах пластового флюида. Как уже было сказано ранее, для каждого из этих флюидов проведена оценка компонентного состава, пример которого представлен на рис. 3.

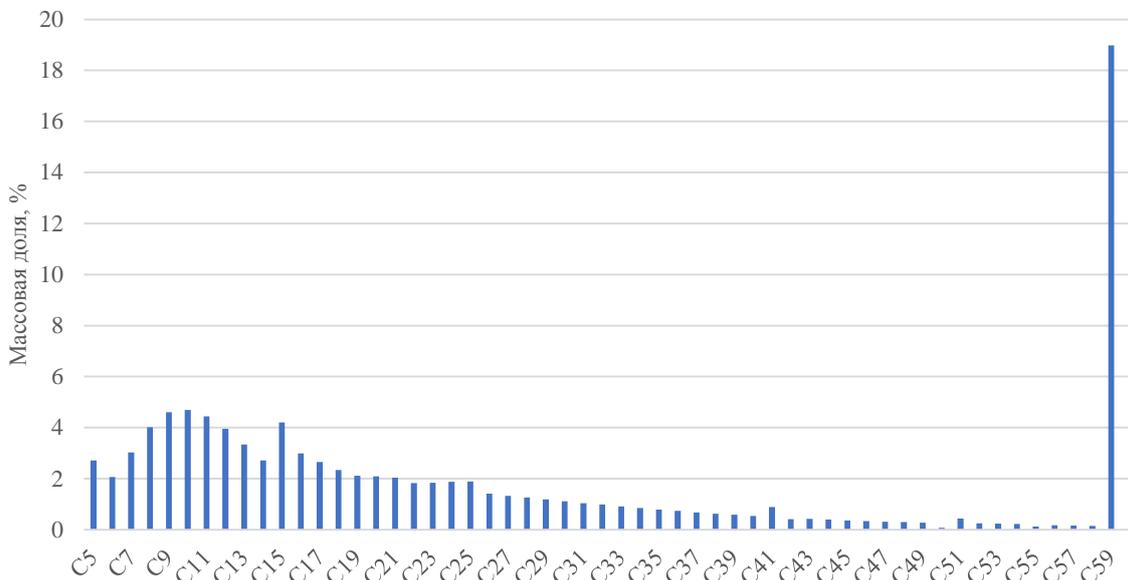


Рис. 3. Компонентный состав исследуемого флюида
Fig. 3. Component composition of the investigated fluid

Как видно из рисунка, исследуемый флюид содержит преимущественно низкомолекулярные углеводороды, их доля составляет 42,7 %. В то же время можно отметить значительное содержание компонентов C_{60+} , их содержание превышает 19 %. Температура кипения данных компонентов превышает 600 °С, ввиду чего их можно отнести к гудронам.

С целью характеристики компонентного состава флюида одним параметром принята величина, характеризующая соотношение в исследуемом флюиде низкомолекулярных и высокомолекулярных компонентов. Вычисление характеристики компонентного состава проводилось по выражению (3). На рис. 4 представлены результаты определения влияния компонентного состава и вязкости флюида на коэффициент теплопроводности органических отложений.

$$X = \frac{\Sigma(C_5-C_{16})}{\Sigma(C_{17}-C_{60+})} * 100, \quad (3)$$

где $\Sigma(C_5-C_{16})$ – суммарное содержание низкомолекулярных компонентов в нефти, %; $\Sigma(C_{17}-C_{60+})$ – суммарное содержание высокомолекулярных компонентов в нефти, %.

Как видно из рис. 4, а, для исследуемых нефтей характеристика компонентного состава находится в диапазоне от 35,4 до 139,1 %. Анализируя характер изменения коэффициента теплопроводности, стоит заметить, что наблюдается устойчивый тренд к росту ее величины с увеличением характеристики компонентного состава во всем рассмотренном диапазоне.

Наличие рассматриваемой зависимости свидетельствует о более низком значении коэффициента теплопроводности для тяжелых нефтей, что объясняется содержанием в них высоких концентраций смол и асфальтенов. Описанная динамика подтверждается наличием низких коэффициентов теплопроводности у гудронов и парафинов. Также данная зависимость позволяет предположить нисходящую динамику изменения коэффициента теплопроводности органических отложений ввиду процесса их «старения» [27, 28].

Как известно, содержание в нефти высокомолекулярных компонентов (смол, асфальтенов) значительным образом влияет на его кажущуюся вязкость. Анализ рис. 4, б показывает, что высокое содержание высокомолекулярных соединений вызывает увеличение динамической вязкости флюида и снижение его коэффициента теплопроводности. При этом основное снижение этого параметра приходится на диапазон вязкости до 7 мПа · с. Дальнейшее увеличение вязкости флюида приводит к незначительному изменению коэффициента теплопроводности органических отложений, что может свидетельствовать о наличии некоторой предельной концентрации высокомолекулярных компонентов в флюиде, выше которых значительного изменения коэффициента теплопроводности не происходит, каким бы высоким не было их содержание.

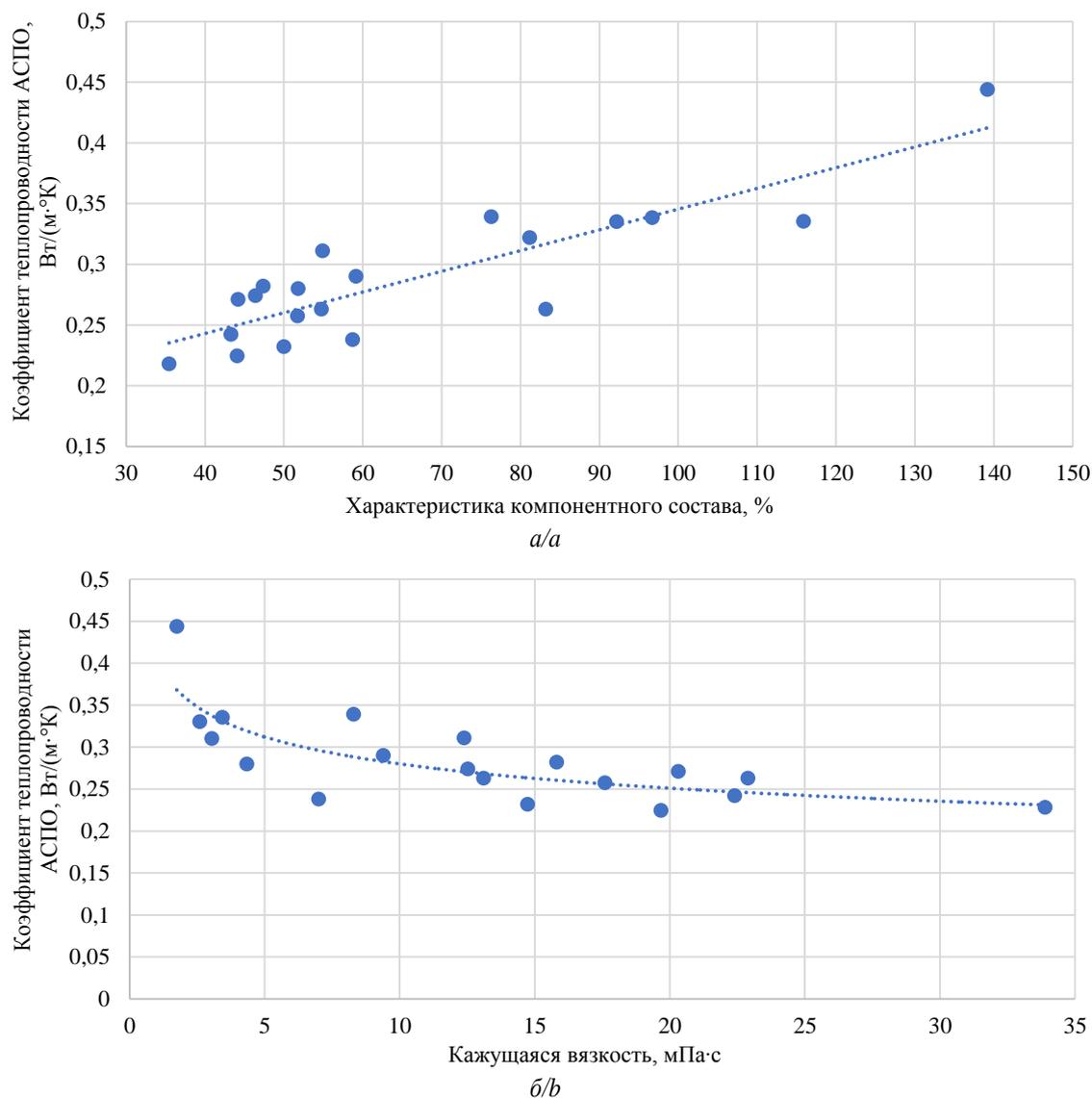


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплопроводности АСПО от: а) характеристики компонентного состава; б) вязкости флюида

Fig. 4. Dependence of the ARPD thermal conductivity on: a) fractional composition characteristics; b) fluid viscosity

Заключение

Исследование коэффициента теплопроводности органических отложений является важным направлением в сторону увеличения точности моделирования процессов их образования в линейных нефтепроводах или лифтовых колоннах. В случае достаточного изучения этой величины, степени и характера ее изменения в процессе формирования органических отложений становится возможным более корректно производить моделирование парафинообразования, температуры внутренней поверхности лифтовой колонны и линейного нефтепровода. Определение корреляционных зависимостей между коэффициентом теплопроводности АСПО и характеристикой компонентного

состава позволит оценивать значение коэффициента теплопроводности для любого флюида без необходимости проведения дополнительных лабораторных исследований. Использование полученных корреляционных зависимостей позволит значительно увеличить точность моделирования процессов добычи и транспортировки пластовых флюидов. Дальнейшие исследования в этой области могут быть направлены на определение характера влияния на коэффициент теплопроводности органических отложений температуры их формирования, наличия включений нефтяной и водной фаз.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10403.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Influences of the water cut of pumping oil and the mineralization of the associated water on the rate of sludging / K. Vyatkin, V. Mordvinov, P. Ilushin, A. Kozlov // Applied Sciences. – 2021. – V. 11. – № 15. – С. 6678.
2. Lei Y., Han S., Zhang J. Effect of the dispersion degree of asphaltene on wax deposition in crude oil under static conditions // Fuel processing technology. – 2016. – V. 146. – P. 20–28.
3. Experimental investigations of the mitigation of paraffin wax deposition in crude oil using chemical additives / B.F. Towler, O. Jaripatke, S. Mokhtab // Petroleum Science and Technology. – 2011. – V. 29. – № 5. – P. 468–483.
4. Ilushin P., Vyatkin K., Kozlov A. Development of an approach for determining the effectiveness of inhibition of paraffin deposition on the wax flow loop laboratory installation // Inventions. – 2022. – V. 7. – № 1. – С. 3.
5. Efficiency evaluation of the heat deparaffinization of producing well equipped by sub pump with hollow rods / A.V. Lekomtsev, W. Kang, S.V. Galkin, Y.A. Ketova // Periodico Tche Quimica. – 2020. – V. 17. – № 36. – С. 750–765.
6. Modeling of paraffin wax deposition process in poorly extractable hydrocarbon stock / A. G. Safulina, D.A. Ibragimova, L.R. Baibekova, R.R. Soldatova, S.M. Petrov, N.Y. Bashkirtseva // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. – 2018. – V. 53. – № 6. – P. 897–904.
7. Ляпин А.Ю., Астахов А.В., Михалёв Ю.П. Исследование температуры кристаллизации парафинов в нефти с целью уменьшения образования асфальтосмолопарафиновых отложений // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2017. – Т. 7. – № 6. – С. 28–35.
8. Акрамов Т.Ф., Яркеева Н.Р. Борьба с отложениями парафиновых, асфальтосмолистых компонентов нефти // Нефтегазовое дело. – 2017. – Т. 15. – № 4. – С. 67–72.
9. Jalalnezhad M.J., Kamali V. Development of an intelligent model for wax deposition in oil pipeline // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2016. – V. 6. – № 1. – P. 129–133.
10. Ilushin P.Y., Vyatkin K.A., Kozlov A.V. Forecasting the value of the linear pipeline cleaning interval based on the laboratory research // International Review of Mechanical Engineering. – 2021. – V. 15. – № 6. – С. 294–300.
11. A fundamental model of wax deposition in subsea oil pipelines / Z. Huang, H.S. Lee, M. Senra, S.H. Fogler // AIChE Journal. – 2011. – V. 57. – № 11. – P. 2955–2964.
12. Occurrence and characterization of paraffin wax formed in developing wells and pipelines / M.M. El-Dalatony, B.H. Jeon, E.S. Salama, M. Eraky, W.B. Kim, J. Wang, T. Ahn // Energies. – 2019. – V. 12. – № 6. – P. 967–989.
13. Методика оценки теплопроводности органических отложений на лабораторной установке Wax Flow Loop / П.Ю. Илюшин, К.А. Вяткин, А.В. Козлов, А.О. Вогинова // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2021. – Т. 11. – № 6. – С. 622–629.
14. Improvement of the methodology for determining reliability indicators of oil and gas equipment / V.V. Bukhtoyarov, V.S. Tynchenko, E.A. Petrovskiy, V.V. Tynchenko, V.G. Zhukov // International Review on Modelling and Simulations. – 2018. – V. 11. – № 1. – P. 37–50.
15. Bai J., Jin X., Wu J.T. Multifunctional anti-wax coatings for paraffin control in oil pipelines // Petroleum Science. – 2019. – V. 16. – P. 619–631.
16. Krivoshchekov S.N., Vyatkin K.A., Kozlov A.V. Modeling of asphaltene-resin-wax deposits formation in a string of hollow rods during simultaneous separate operation of two oil reservoirs // Chem Petrol Eng. – 2021. – № 3. – P. 1–7. URL: <https://doi.org/10.1007/s10556-021-00920-1> (дата обращения 15.11.2021).
17. Sousa A.L., Matos H.A., Guerreiro L.P. Preventing and removing wax deposition inside vertical wells: a review // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2019. – V. 9. – № 3. – P. 2091–2107.
18. Application of the Avrami theory for wax crystallisation of synthetic crude oil / A. Hosseinpour, A. Japper-Jaafar, S. Yusup, L. Ismail // International Journal of Engineering. – 2019. – V. 32. – № 1. – P. 18–27. DOI: 10.5829/IJE.2019.32.01A.03
19. Study on inhibition of high-molecular-weight paraffins for south eagle ford condensate / K. Gawas, P. Krishnamurthy, F. Wei, E. Acosta, Y. Jiang // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Houston, TX, USA, 2015. – P. 1289–1299. – Paper SPE 174817.
20. Pipeline wax deposition modeling: a sensitivity study on two commercial software / G. Giacchetta, B. Marchetti, M. Leporini, A. Terenzi, D. Dall'Acqua, L. Capece, R.C. Grifoni // Petroleum. – 2019. – V. 5. – № 2. – P. 206–213.
21. Dalirsefat R., Feyzi F. A thermodynamic model for wax deposition phenomena // Fuel. – 2007. – V. 86. – № 10–11. – P. 1402–1408.
22. Banki R., Hoteit H., Firoozabadi A. Mathematical formulation and numerical modeling of wax deposition in pipelines from enthalpy- porosity approach and irreversible thermodynamics // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2008. – V. 51. – № 13–14. – P. 3387–3398.
23. Unconditionally energy stable linear schemes for the diffuse interface model with Peng–Robinson equation of state / H. Li, L. Ju, C. Zhang, Q. Peng // Journal of Scientific Computing. – 2018. – V. 75. – № 2. – P. 993–1015.
24. Thermodynamics prediction of wax precipitation using the Patel–Teja equation of state / K.K. Farayola, Y.B. Adeboye, O.A. Adekomaya, A.O. Olatunde // Nigeria Annual International Conference and Exhibition. – Tinapa-Calabar, Nigeria, 2010. – P. 154–160. – Paper SPE 136966.
25. Bidmus H.O., Mehrotra A.K. Heat-transfer analogy for wax deposition from paraffinic mixtures // Industrial & engineering chemistry research. – 2004. – V. 43. – № 3. – P. 791–803.
26. Veiga H.M.B., Fleming F.P., Azevedo L.F.A. Wax deposit thermal conductivity measurements under flowing conditions // Energy & Fuels. – 2017. – V. 31. – № 11. – P. 11532–11547.
27. Wax deposition study in a cold-finger system with model oil / K. Fan, Q. Huang, S. Li, D. Zhao // SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition. – Nusa Dua, Bali, Indonesia, 2015. – P. 1–15.
28. Singh P., Youyen A., Fogler H.S. Existence of a critical carbon number in the aging of a wax-oil gel // American Institute of Chemical Engineers journal. – 2001. – V. 47. – № 9. – P. 2111–2124.

Поступила 26.01.2022 г.

Информация об авторах

Илюшин П.Ю., кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Вяткин К.А., аспирант кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Козлов А.В., лаборант-исследователь кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

UDC 622.276

OIL COMPONENT COMPOSITION INFLUENCE ON THERMAL CONDUCTIVITY OF FORMED ORGANIC DEPOSITS

Pavel Yu. Ilyushin¹,
ilyushin-pavel@yandex.ru

Kirill A. Vyatkin¹,
kirill.vyatkin@girngm.ru

Anton V. Kozlov¹,
anton.kozlov@girngm.ru

¹ Perm National Research Polytechnic University,
29, Komsomolskiy avenue, Perm, 614990, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to increase the accuracy of modelling heat and mass transfer and formation of organic deposits in oil wells and linear oil pipelines. Many models of the formation of organic deposits omit the influence of their thermal conductivity coefficient on convective heat and mass transfer in a heterogeneous medium, but consideration of this parameter can significantly affect the result, increasing thermal resistance of the pipeline. Heat and mass transfer in the volume of hydrocarbons is a complex process, which is considered as convective heat transfer, which takes into account the matter molecular diffusion. This paper considers the diffusion mechanisms of heat transfer in organic deposits but neglects the diffusion of matter. The formation of these deposits is one of the most serious complications in the production of hydrocarbons in various hydrocarbon fields around the world, in particular in the Perm Krai.

The aim of the research is to assess the degree of influence of the component composition of the fluid and its viscosity on thermal conductivity of organic deposits of a given fluid; to determine the possibility of assessing the thermal conductivity coefficient of organic deposits without conducting additional laboratory studies.

Methods: laboratory research on the «WaxFlowLoop» installation, determination of the component composition of the fluid by gas chromatography.

Results. To characterize the component composition of the fluid, the ratio of low molecular weight (C₅–C₁₆) components to high molecular weight (C₁₇–C₆₀₊) was taken. According to the results of the studies, it was found that the thermal conductivity of organic deposits grows with the increase in the proportion of low molecular weight hydrocarbons in the composition of the studied fluid. The presence of a correlation between the dynamic viscosity of the fluid and the value of the thermal conductivity of organic deposits, which decreases with an increase in the viscosity of the fluid, was also determined.

Conclusion. The obtained experimental results allow us to conclude that it is possible to predict the value of thermal conductivity of organic deposits by the properties of the initial fluid. The use of the wax deposition thermal conductivity value when modeling its formation, as well as the obtained correlations, will make it possible to achieve significant progress in modeling heat transfer between the fluid and the wall and the formation of organic deposits in oil wells and underground oil pipelines.

Key words:

Thermal conductivity, organic deposits, modeling, oil well, laboratory research.

The research was carried out due to the grant of the Russian Science Foundation no. 21-79-10403.

REFERENCES

- Vyatkin K., Mordvinov V., Ilushin P., Kozlov A. Influences of the water cut of pumping oil and the mineralization of the associated water on the rate of sludging. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, no. 15, pp. 6678.
- Lei Y., Han S., Zhang J. Effect of the dispersion degree of asphaltene on wax deposition in crude oil under static conditions. *Fuel processing technology*, 2016, vol. 146, pp. 20–28.
- Towler B.F., Jaripatke O., Mokhatab S. Experimental investigations of the mitigation of paraffin wax deposition in crude oil using chemical additives. *Petroleum Science and Technology*, 2011, vol. 29, no. 5, pp. 468–483.
- Ilyushin P., Vyatkin K., Kozlov A. Development of an approach for determining the effectiveness of inhibition of paraffin deposition on the wax flow loop laboratory installation. *Inventions*, 2022, vol. 7, no. 1, pp. 3.
- Lekomtsev A.V., Kang W., Galkin S.V., Ketova Y.A. Efficiency evaluation of the heat deparaffinization of producing well equipped by sub pump with hollow rods. *Periodico Tche Quimica*, 2020, vol. 17, no. 36, pp. 750–765.
- Safikulina A.G., Ibragimova D.A., Baibekova L.R., Soldatova R.R., Petrov S.M., Bashkirtseva N.Y. Modeling of paraffin wax deposition process in poorly extractable hydrocarbon stock. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 2018, vol. 53, no. 6, pp. 897–904.
- Lyapin A.Yu., Astakhov A.V., Mikhalev Yu.P. Investigation of the crystallization temperature of paraffins in oil in order to reduce the formation of asphalt-resin-paraffin deposits. *Science and Technology of Pipeline Transport of Oil and Oil Products*, 2017, vol. 7, no. 6, pp. 28–35. In Rus.
- Akramov T. F., Arkeia N. R. Struggle with deposits of paraffinic, asphaltic components of petroleum. *Petroleum engineering*, 2017, vol. 15, no. 4, pp. 67–72. In Rus.
- Jalalnejhad M.J., Kamali V. Development of an intelligent model for wax deposition in oil pipeline. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2016, vol. 6, no. 2, pp. 129–133.
- Ilyushin P.Y., Vyatkin K.A., Kozlov A.V. Forecasting the value of the linear pipeline cleaning interval based on the laboratory research. *International Review of Mechanical Engineering*, 2021, vol. 15, no. 6, pp. 294–300.
- Huang Z., Lee H. S., Senra M., Scott Fogler H. A fundamental model of wax deposition in subsea oil pipelines. *AIChE Journal*, 2011, vol. 57, no. 11, pp. 2955–2964.
- El-Dalatony M.M., Jeon B.H., Salama E.S., Eraky M., Kim W.B., Wang J., Ahn T. Occurrence and characterization of paraffin wax

- formed in developing wells and pipelines *Energies*, 2019, vol. 12, no. 6, pp. 967–989.
13. Ilyushin P.Yu., Vyatkin K.A., Kozlov A.V., Votnova A.O. Methodology for evaluation of organic deposits thermal conduction using laboratory facility Wax Flow Loop. *Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*, 2021, vol. 111, no. 6, pp. 622–629. In Rus.
 14. Bukhtoyarov V.V., Tynchenko V.S., Petrovskiy E.A., Tynchenko V.V., Zhukov V.G. Improvement of the methodology for determining reliability indicators of oil and gas equipment. *International Review on Modelling and Simulations*, 2018, vol. 11, no. 1, pp. 37–50.
 15. Bai J., Jin X., Wu J.T. Multifunctional anti-wax coatings for paraffin control in oil pipelines. *Petroleum Science*, 2019, vol. 16, pp. 619–631.
 16. Krivoshchekov S.N., Vyatkin K.A., Kozlov A.V. Modeling of asphaltene-resin-wax deposits formation in a string of hollow rods during simultaneous separate operation of two oil reservoirs. *Chem Petrol Eng*, 2021, no. 3, pp. 1–7. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10556-021-00920-1> (accessed 15 November 2021).
 17. Sousa A.L., Matos H.A., Guerreiro L.P. Preventing and removing wax deposition inside vertical wells: a review. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2019, vol. 9, no. 3, pp. 2091–2107.
 18. Hosseinipour A., Japper-Jaafar A., Yusup S., Ismail L. Application of the Avrami theory for wax crystallisation of synthetic crude oil. *International Journal of Engineering*, 2019, vol. 32, no. 1, pp. 18–27. DOI: 10.5829/IJE.2019.32.01A.03
 19. Gawas K., Krishnamurthy P., Wei F., Acosta E., Jiang Y. Study on inhibition of high-molecular-weight paraffins for south eagle ford condensate. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Houston, TX, USA, 2015. pp. 1289–1299, Paper SPE 174817.
 20. Giacchetta G., Marchetti B., Leporini M., Terenzi A., Dall'Acqua D., Capece L., Grifoni R.C. Pipeline wax deposition modeling: a sensitivity study on two commercial software. *Petroleum*, 2019, vol. 5, no. 2, pp. 206–213.
 21. Dalirsefat R., Feyzi F. A thermodynamic model for wax deposition phenomena. *Fuel*, 2007, vol. 86, no. 10–11, pp. 1402–1408.
 22. Banki R., Hoteit H., Firoozabadi A. Mathematical formulation and numerical modeling of wax deposition in pipelines from enthalpy–porosity approach and irreversible thermodynamics. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, vol. 51, no. 13–14, pp. 3387–3398.
 23. Li H., Ju L., Zhang C., Peng Q. Unconditionally energy stable linear schemes for the diffuse interface model with Peng–Robinson equation of state. *Journal of Scientific Computing*, 2018, vol. 75, no. 2, pp. 993–1015.
 24. Farayola K.K., Adeboye Y.B., Adekomaya O.A., Olatunde A.O. Thermodynamics prediction of wax precipitation using the Patel–Teja equation of state. *Nigeria Annual International Conference and Exhibition*. Tinapa-Calabar, Nigeria, 2010. pp. 154–160, Paper SPE 136966.
 25. Bidmus H.O., Mehrotra A.K. Heat-transfer analogy for wax deposition from paraffinic mixtures. *Industrial & engineering chemistry research*, 2004, vol. 43, no. 3, pp. 791–803.
 26. Veiga H.M.B., Fleming F.P., Azevedo L.F.A. Wax deposit thermal conductivity measurements under flowing conditions. *Energy & Fuels*, 2017, vol. 31, no. 11, pp. 11532–11547.
 27. Fan K., Huang Q., Li S., Zhao D. Wax deposition study in a cold-finger system with model oil. *SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition*. Nusa Dua, Bali, Indonesia, 2015. pp. 1–15.
 28. Singh P., Youyou A., Fogler H. S. Existence of a critical carbon number in the aging of a wax-oil gel. *American Institute of Chemical Engineers journal*, 2001, vol. 47, no. 9, pp. 2111–2124.

Received: 26 January 2022.

Information about the authors

Pavel Yu. Ilyushin, Cand. Sc., associate professor, Perm National Research Polytechnic University.

Kirill A. Vyatkin, postgraduate student, Perm National Research Polytechnic University.

Anton V. Kozlov, research assistant, Perm National Research Polytechnic University.

УДК 551.86:553.041:553.982.2

ПАЛЕОГЕОГРАФИЯ ТЮМЕНСКОЙ СВИТЫ В ПРЕДЕЛАХ УСТЬ-БАЛЫК-МАМОНТОВСКОГО ВАЛА

Староселец Дмитрий Андреевич¹,
d_star1997@mail.ru

Смирнов Павел Витальевич¹,
geolog.08@mail.ru

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

Актуальность изучения тюменской свиты обоснована тем, что на настоящий момент наблюдается падение добычи нефти из нижнемеловых и верхнеюрских интервалов. Вследствие этого образуется необходимость в восполнении фонда добычи. Наибольшие перспективы осуществления дальнейшей добычи связывают с отложениями средней юры, представляющими долгосрочную перспективу на поиск, разведку и добычу углеводородов в Западной Сибири. К тому же немаловажным фактором является распространение продуктивных отложений тюменской свиты в пределах территорий с развитой инфраструктурой.

Цель: восстановить условия осадконакопления пластов ЮС₂ и ЮС₃ в пределах Усть-Балык-Мамонтовского вала.

Объекты: нефтеносные пласты ЮС₂ и ЮС₃ тюменской свиты на северо-западной части Усть-Балык-Мамонтовского вала.

Методы: литолого-фациальный анализ кернового материала, включающий детальное описание керна, выделение литогенетических типов пород, фаций и макрофаций, гранулометрический анализ, изучение петрографических особенностей пород; анализ геофизических данных, включая геофизические исследования скважин и сейсмические исследования.

Результаты. Изучены фациальные обстановки формирования пластов ЮС₂ и ЮС₃ тюменской свиты. Выявлено их латеральное и вертикальное распространение на исследуемом участке. Предложено разделение пласта ЮС₂ на три пачки. Созданы четыре палеогеографические схемы пластов ЮС₂ и ЮС₃, из которых три относятся к пласту ЮС₂. Спрогнозированы зоны распространения пород-коллекторов с лучшими коллекторскими свойствами, и идентифицированы наиболее перспективные зоны для бурения. Сделаны выводы о валидности выявленных закономерностей для тюменской свиты в пределах близлежащих территорий.

Ключевые слова:

Тюменская свита, палеогеография, фация, Усть-Балык-Мамонтовский вал, пласты ЮС₂ и ЮС₃.

Введение

В настоящее время нефтегазовая промышленность Западной Сибири вступила в новый этап своего развития. Просматривается очевидная тенденция к снижению объемов добычи нефти и газа, которая может быть преодолена вовлечением в промышленный оборот новых объектов минерально-сырьевой базы. Особое место при этом отводится юрским отложениям, в которых сосредоточено 29 % от суммарных текущих извлекаемых запасов нефти в Западной Сибири.

В течение предшествующих этапов исследования геологии и нефтегазового потенциала Западно-Сибирской мегапровинции детальному изучению были подвергнуты нижнемеловые и верхнеюрские комплексы – ачимовский резервуар нижнего мела, баженовская, васюганская свиты верхней юры [1, 2]. Однако длительная эксплуатация месторождений в указанных литостратиграфических комплексах предопределила истощение запасов углеводородов, а в случае с баженовской свитой, несмотря на колоссальный прогнозный потенциал, стоит засвидетельствовать, что эффективные методы ее эксплуатации в должной мере не разработаны. Все это актуализирует вопрос о включении в разработку новых объектов минерально-сырьевой базы традиционного типа.

Юрский литолого-стратиграфический комплекс не без оснований рассматривается как один из сложнейших по строению и наибольший по толщине нефтега-

зоносный комплекс в Западной Сибири [3], с месторождениями этого комплекса связывают существенные перспективы дальнейшей нефтедобычи. По оценкам [3] в ниже-среднеюрском комплексе центральных и северных районов Западно-Сибирской провинции сосредоточено порядка 17,6 млрд т геологических запасов нефти. При этом в составе юрского комплекса резкой фациальной изменчивостью, литологической неоднородностью, фрагментарной или неполной изученностью характеризуются пласты Ю₂₋₉ [4] – то есть большой объем глинисто-песчаной толщи тюменской свиты нижней-средней юры (гор. Ю₂–Ю₁₀).

Тюменская свита континентального генезиса распространена регионально, в определенной мере спорадически, характеризуется различной толщиной, максимум которой фиксируется на юге и в центре Надым-Пур-Тазовского региона [3]. Значительный вклад во всестороннее изучение условий седиментации пород средней юры внесли А.Э. Конторович, Л.Г. Вакуленко, В.А. Казаненков и др. [5] и Л.Г. Вакуленко и П.А. Ян [6], основное внимание уделялось седиментогенезу коллекторов пласта Ю₂, и были сделаны выводы о возможных перспективах нефтеносности нижней и средней юры. А.Ю. Попов и В.А. Казаненков [7] установили закономерную смену обстановок осадконакопления и создали палеогеографические схемы на время формирования различных частей горизонта Ю₂ в пределах северо-восточной части Широкого Приобья.

Е.Н. Гавриловой в рамках последних исследований [8] сделаны выводы о неустойчивых в пространстве и времени субаэральных и мелководно-морских условиях седиментации тюменской свиты на Западе Широкого Приобья. Обоснование методики создания концептуальных геологических моделей тюменской свиты и подготовки на её основе моделей пластов Ю₂ выполнено в [9]. Томские геологи [10] изучили отпечатки растений, прирученные к тюменской и наунакской свитам на юго-востоке Западной Сибири, и ими же в соавторстве с В.В. Аносовым и В.П. Ивановым [11] на основе палеоботанических, литогеохимических и ИК-спектрометрических исследований выполнено стратиграфическое расчленение и корреляция отложений тюменской и наунакской свит. Особое внимание уделено анализу особенностей разработки и прогноза выработки запасов тюменской свиты на территории ХМАО-Югры [12].

Наряду с этим в тюменской свите достоверно установлено наличие высокочемких коллекторов [13], что создает предпосылки для дальнейшей успешной эксплуатации этого продуктивного горизонта. Из числа крупнейших месторождений, где основными продуктивными горизонтами является тюменская свита, нельзя не упомянуть Ем-Ёговское и Песчаное, относящиеся к Красноленинской группе месторождений. Восточнее описанной группы месторождений локализован Усть-Балык-Мамонтовский вал, являющийся составной частью более крупной структуры, в пределах которой также доказана нефтеносность тюменской свиты – Сургутского свода.

Как наглядно демонстрирует краткий анализ работ научных коллективов, особый интерес применительно к перспективам тюменской свиты проявляется к центральному и юго-восточным регионам ее распространения, что определяется перспективами наращивания ресурсной базы на уже хорошо обустроенных площадях с развитой инфраструктурой.

Несмотря на внушительный объем геологоразведочных работ, юрские горизонты нередко оказываются мало- или непродуктивными в пределах большинства разведочных площадей по причине низкого коллекторского потенциала песчано-алевролитовых пород. Ситуация усугубляется также отсутствием достоверных, хорошо аргументированных структурно-литологических и генетических моделей. Сложившаяся практика предопределила построение мелкомасштабных геологических моделей, которые зачастую малоинформативны для имеющих небольшие пространственные параметры, и резко дифференцированных залежей тюменской свиты – при таких масштабах моделирования они могут оказаться необнаруженными. Как справедливо отмечает Е.Н. Гаврилова, в связи с вертикальной и латеральной изменчивостью коллекторов тюменской свиты невозможно составить оптимальную сетку разведочного бурения без специальных подходов [13].

Описанные выше аспекты являются частными случаями общей проблемы несовершенства геолого-генетических моделей тюменской свиты.

Целью настоящей статьи является реконструкция условий осадконакопления ЮС₂ и ЮС₃ в пределах

Усть-Балык-Мамонтовского вала. Разработанные модели призваны повысить эффективность прогнозирования распространения пород-коллекторов и изменчивости их ФЕС с возможной трансляцией полученных закономерностей на иные объекты нефтегазодобычи в пределах Сургутского свода.

Материал и методы исследования

Выделение тюменской свиты как самостоятельного объекта принято в 1956 г. на Всесоюзном совещании в г. Ленинграде. Стратотип тюменской свиты выделен в разрезе Тюменской опорной скважины. В её строении выделяется три подсвиты: нижняя (J_{2a}–J_{2b}, пласты Ю₇–Ю₉), средняя (J_{2b}, пласты Ю₅–Ю₆) и верхняя (J_{2b}–J_{2bt}, пласты Ю₂–Ю₄). Отложения представлены переслаиванием песчаников сероцветных, алевролитов и аргиллитов с редкими прослойками углей и конгломератов. Также для отложений тюменской свиты характерно обилие углистого детрита, отпечатков растений, остатков углефицированных корней, нередко отмечается присутствие погребенной почвы [4].

Участок исследования приурочен к Сургутскому нефтегазоносному району Среднеобской нефтегазоносной области, расположенной в пределах центральной части Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции.

В геологическом строении территории принимает участие комплекс пород мезозойско-кайнозойского возраста, несогласно залегающих на породах палеозойского возраста. В тектоническом плане участок исследований расположен в центральной части Западно-Сибирской плиты и находится в пределах Фроловского (Фроловская мегавпадина) и Среднеобского центрального (Сургутский свод) геоблоков. Он относится к переходу с востока на запад от Усть-Балык-Мамонтовского вала (отрога Сургутского свода на его юго-западном погружении) в Тундринскую котловину (рис. 1), раскрывающуюся в северном направлении в пределах Фроловской мегавпадины. Склон Усть-Балык-Мамонтовского вала осложнен группой малоразмерных локальных поднятий.

Материалами для исследований послужили:

1. Керновые данные по шестнадцати скважинам. Они включают в себя фотографии и описание керна, фотографии шлифов, результаты гранулометрических исследований, результаты макропалеонтологических и микрофаунистических анализов.
2. Данные каротажных диаграмм ГИС (более 50 скважин).
3. Данные сейсмических исследований в виде срезов сейсмического куба RGB-спектральной декомпозиции. Они использовались с целью нивелирования недостатка керновой информации и расширения фактологической базы. Всего на пласт ЮС₃ проанализировано 12 срезов сейсмического куба. На пласт ЮС₂ создано 18 срезов. Спектральная декомпозиция даёт возможность наиболее детально выявить строение изучаемых интервалов, что особенно актуально в связи со сложнопостроенностью коллекторов тюменской свиты.

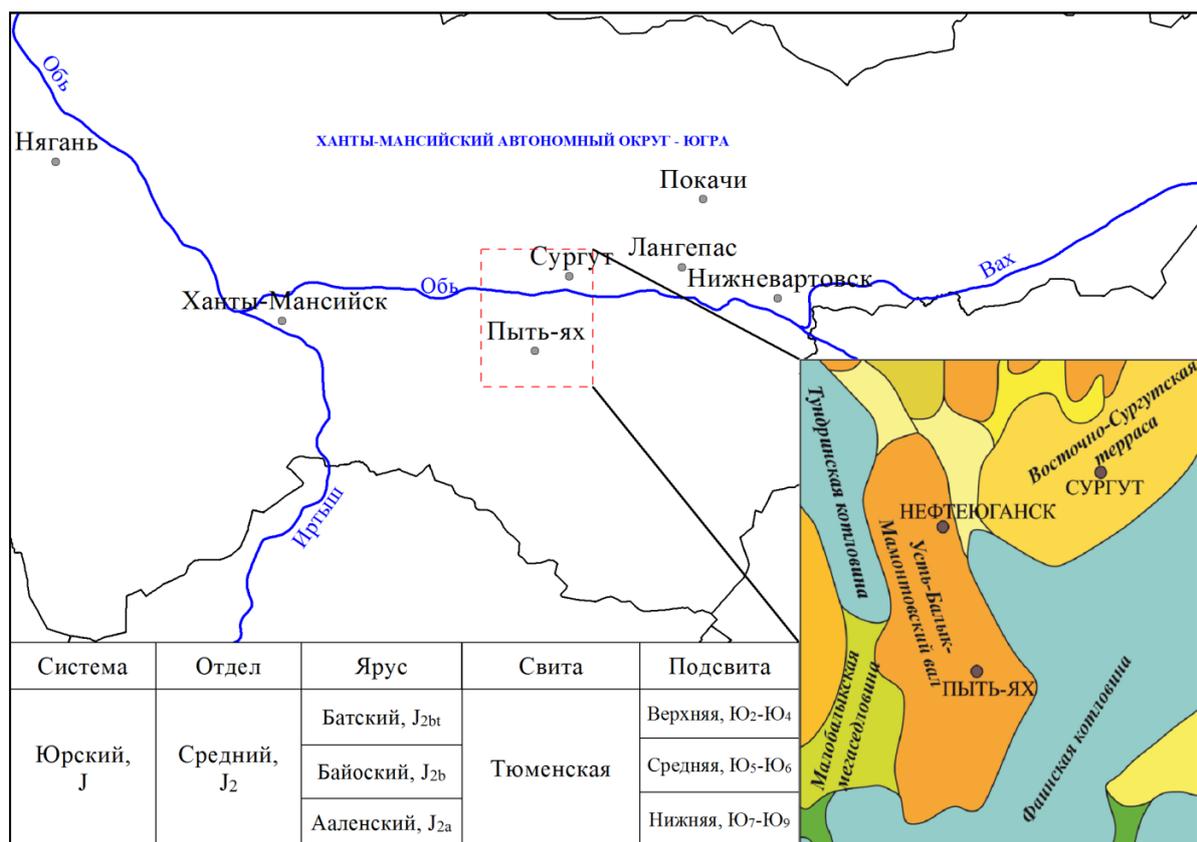


Рис. 1. Район исследований (фрагмент тектонической карты центральной части Западно-Сибирской плиты)
Fig. 1. Research district (fragment of the tectonic map of the central part of the West-Siberian plate)

Структурно-текстурные особенности, изученные по фотоматериалам керна, и общее макроскопическое описание пород послужили основой для уточнения обстановок осадконакопления на исследуемой территории.

Особое место отведено изучению текстур пород. Методической основой для характеристики данных параметров стали разработки и труды R.G. Walker, P.J. Noel [14], R.Ch. Selley [15].

Ихнофоссилии интерпретировались по методическим работам Дж. Памбертона [16, 17].

Проанализированные параметры экстраполированы на скважины, не имеющие керна, с применением методики электрометрических моделей фаций В.С. Муромцева [18]. При анализе за основу приняты эталонные диаграммы, присущие каждой фации, взятые из методики В.С. Муромцева с адаптацией к особенностям гамма-каротажа. Анализ фаций выполнен в двух системах – пространственной (изучение закономерностей распределения фаций по площади для ограниченного стратиграфического интервала) и временной (изучение смены фаций по разрезу). Ведущий и резко преобладающий на фоне полидинамического ландшафта тип динамики среды принимался за основу классификации фаций [19].

Интерпретация срезов сейсмического куба проводилась при совместных сейсмофациальных исследованиях сейсмических разрезов по методике Р.Е. Шерифф, А.П. Грегори, П.Р. Вейл, Р.М. Митчем и др. [20].

Характеристика фациальных условий приведена в соответствии с классификацией О.С. Черновой [21]. Для интерпретации пространственных закономерностей формирования отложений меандровых систем, выявленных при изучении современных меандрирующих рек, использованы методические подходы зарубежных седиментологов [22, 23] и работы Д.А. Буша [24], который рассматривал изопохиты как топографическую карту русла.

Учтён опыт исследований последних лет в области моделирования речных систем, позволяющий наиболее точно спрогнозировать действие речных потоков в природе [25–28]. Прогнозирование основано на анализе изменения рельефа речного дна и образования русловых песчаных осадков (прирусловых баровых тел) при изменении скоростей водного потока. Вышеописанная практика показала свою эффективность при картировании палеорусел и смежных с ними объектов на срезах сейсмического куба RGB-спектральной декомпозиции.

Результаты

Пласт ЮС₃

В литологическом отношении породы пласта представлены переслаиванием алевролитов, аргиллитов и песчаников с подчиненными прослоями угля.

Песчаники светло-серые, от тонко- до мелкозернистых, с неравномерным распределением глинистого и карбонатного цемента; зернами сидерита; корешками растений; единичными интракластами аргиллита сидеритизированного (рис. 2).

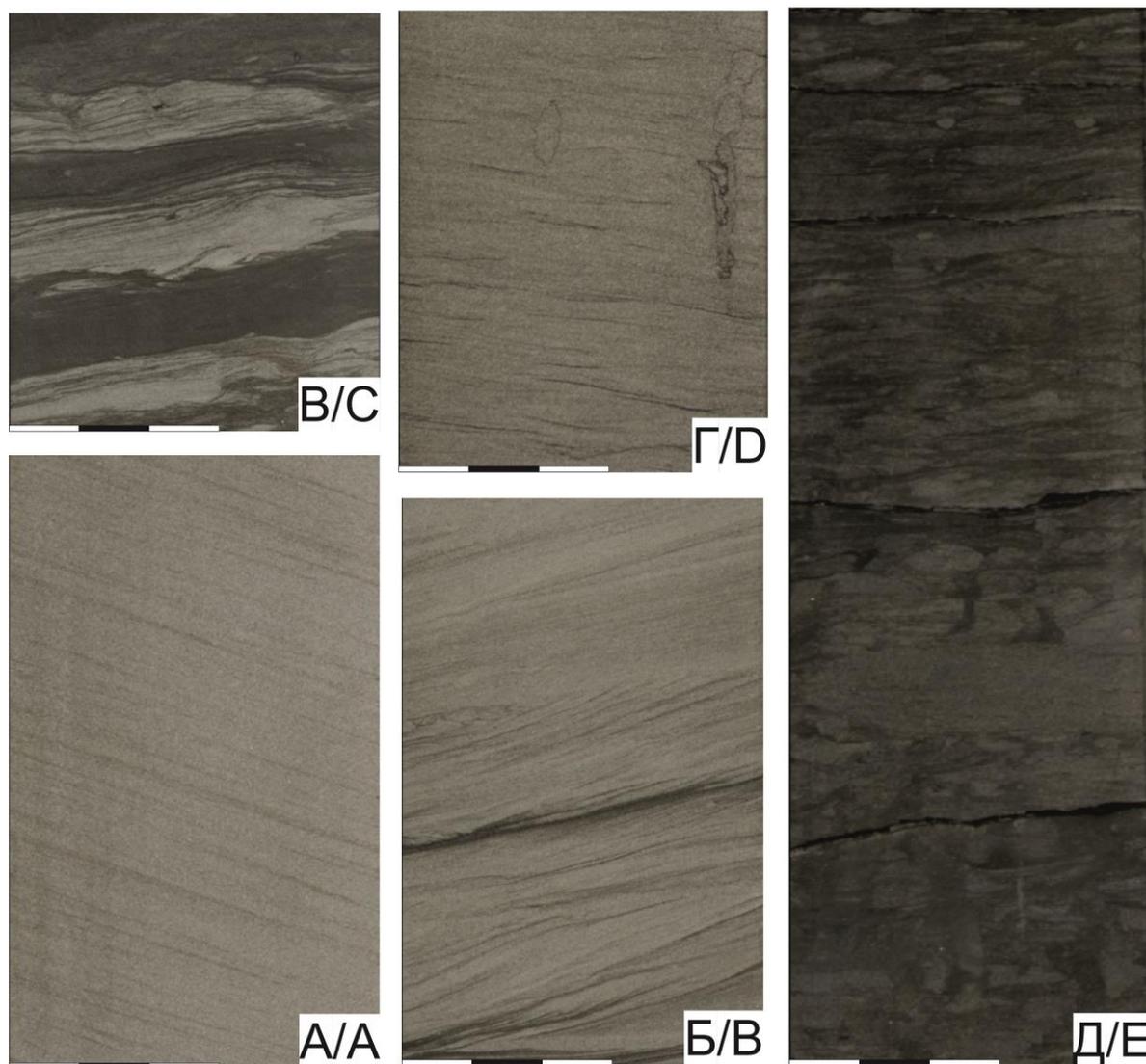


Рис. 2. Репрезентативные текстуры пород пластов ЮС₂ и ЮС₃ верхнетюменской подсвиты: А – песчаники мелкозернистые с намывами углистого детрита, подчёркивающего косую однонаправленную слоистость (субфация меандровой отмели; скважина 241 (глубина 3144,4 м)); Б – песчаники мелкозернистые с мелкомасштабной слоистостью с выраженными серийными швами, слоистость подчёркнута растительным детритом (субфация прируслового вала; скважина 241 (глубина 3140,4 м)); В – алевролиты глинистые с волнисто-слоистой текстурой, переходящие в алевролитистые глины, отмечается текстура деформации (субфация песков разлива в пойме (кревассовые глифы); скважина 241 (глубина 3139,6 м)); Г – песчаники мелко-среднезернистые с прерывистой флазерной слоистостью подчёркнутой растительным детритом, с биотурбациями типа: Skolithos (фация фронта дельты; скважина 241 (глубина 3117,7 м)); Д – переслаивание алевролитистых глин, алевролитов со следами сильной биотурбации, образующие линзовидную слоистость (фация продельты; скважина 241 (глубина 3108,6 м))

Fig. 2. Representative textures of rocks of US₂ and US₃ oil-bearing beds of the Upper Tyumen subdivision: A – sandstones are fine-grained with coal detritus inclusions emphasizing unidirectional layering (meander shoal subfaction; well 241 (depth 3144,4 m)); B – sandstones are fine-grained with small-scale layering with pronounced serial seams, layering is underlined by vegetative detritus (dorsal shaft subfaction; well 241 (depth 3140,4 m)); C – alevrolites are clayey with wavy layered texture passing into silvery clays, the texture of deformation is marked (subfraction of spill sands in the floodplain (Cruvass glyphs); well 241 (depth 3139,6 m)); D – sandstones are fine-medium grained with intermittent flaser layering underlined by vegetative detritus, with bioturbations of the type: Skolithos (delta front facies; well 241 (depth 3117,7 m)); E – alteration of silty clays, siltstones with traces of strong bioturbation, forming a lenticular layering (prodelta facies; well 241 (depth 3108,6 m))

Слоистость субгоризонтально-волнистая, полого-волнистая, субгоризонтальная, мелкая косая, полого-наклонная, участками прерывистая, подчеркнутая углисто-глинистым, глинистым и углистым, частично сидеритизированным материалом, реже наблюдается

массивная текстура; местами текстура нарушена биотурбацией (ходы мелкие, округлые, овальные и субвертикальные короткие, выполненные алевролитовым и песчаным материалами) и деформационными процессами.

Алевролиты серые, светло- и темно-серые, разнотельные, с неравномерным распределением глинистого и песчаного материалов; с корешками растений; зернами сидерита; с единичными трещинами синерезиса и закрытыми трещинами, замещёнными глинистым материалом; с редкими крупными углистыми остатками древесины.

Слоистость пологоволнистая, субгоризонтальная и линзовидная, подчеркнутая углистым, частично сидеритизированным и глинистым материалами, местами нарушенная биотурбацией (ходы мелкие, округлые, реже субгоризонтальные короткие, выполненные алевритовым материалом) и деформационными процессами.

Аргиллиты серые и темно-серые, от алевритистых до алевритовых; с зернами сидерита; с корешками растений и углистым растительным детритом.

Слоистость субгоризонтальная и линзовидная с прослоями и линзами алевритового материала, нарушенная биотурбацией (ходы мелкие, округлые, субвертикальные, выполненные алевритовым материалом) и деформационными процессами.

Пласт ЮС₂

В верхней части пласта породы представлены переслаиванием алевролитов и аргиллитов с подчиненными прослоями песчаников и единичными прослоями угля.

В основании пласт сложен песчаниками, с подчиненными прослоями аргиллитов, алевролитов и угля.

Песчаники светло-серые от тонко- до мелкозернистых, от алевритистых до алевритовых, с неравномерным распределением глинистого и карбонатного материалов; с углистым растительным детритом; с зернами сидерита; местами с интракластами аргиллита; с редкими корешками растений; с единичными закрытыми трещинами, залеченными кальцитом.

Слоистость преимущественно пологоволнистая и мелкая косая, участками прерывистая, реже субгоризонтальная и субгоризонтально-волнистая, подчеркнутая слоями углистого, частично сидеритизированного и глинистого материалов, местами нарушенная биотурбацией (*Palaephycus* и *Planolites*), изредка отмечается деформация осадка.

Алевролиты серые, светло- и темно-серые, разнотельные, с неравномерным распределением глинистого и песчаного материалов, единичными прослоями известковистые; с зернами сидерита; с углистым растительным материалом и корешками растений; с единичными закрытыми трещинами, залеченными кальцитом.

Слоистость пологоволнистая, субгоризонтальная, субгоризонтально-волнистая, пологонаклонная срезанная и линзовидная, за счет слоев песчаного, глинистого и углистого, частично сидеритизированного материалов, нарушенная деформацией осадка и биотурбацией (ходы мелкие, округлые, выполнены алевритовым материалом). Биотурбационные текстуры представлены ходами: *Chondrites*, *Planolites*.

Аргиллиты серые и темно-серые, с неравномерным распределением алевритового материала; с ко-

решками растений и углистыми растительными остатками; с зернами сидерита.

Слоистость тонкая субгоризонтально-линзовидная, субгоризонтальная и пологоволнистая, образованная слоями алевритового материала, местами нарушенная деформационными процессами и биотурбацией (*Planolites*).

По результатам гранулометрического анализа ситовым методом изученные породы представлены преимущественно алевритовыми песчаниками, в меньшей степени песчаниками, глинистыми и песчаными алевролитами.

Особенностью интервала разреза на уровне ОГ Ю₃ и Ю₂ является выделяемые на седиментационных срезах шнуры меандр, отождествляемые с палеоруслунами. Все тела руслового генезиса построены с учётом уже имеющихся представлений о геоморфологии таких отложений [29, 30].

На наиболее репрезентативном срезе куба RGB-спектральной декомпозиции (SHRP) на стратиграфическом уровне Тю₂+34мс (пласт ЮС₃) показан пример выделения палеорусел пласта ЮС₃ (рис. 3). На данном сейсмическом срезе выделены две палеореки с ответвлениями и притоками: южная и северная. Они просматриваются почти на всех срезах, созданных на пласт ЮС₃.

Обсуждение

Обстановки формирования пластов ЮС₂ и ЮС₃

Генерализованный сценарий формирования тюменской свиты сводится к обстановкам, при которых в областях выравнивания рельефа и заполнения отрицательных структур осадочным материалом в условиях континентального и переходного режима осадконакопления с многочисленными перерывами формировались песчано-алевоитовые тела различной толщины [4].

Для ряда месторождений в пределах территории Усть-Балык-Мамонтовского свода генезис отложений получает различную интерпретацию. Коллектив ОАО «СИБНЕФТЕГЕОФИЗИКА» (Отчёт о результатах детальных сейсморазведочных работ... 2005–2006) связывает формирование обоих пластов как с дельтовыми, так и с аллювиальными процессами. А.Э. Конторович и др. [5] относят отложения пласта Ю₃ к аллювиальным, что справедливо и для пласта Ю₂ за исключением его верхней части, которая связана с переходными условиями.

Коллектив ОАО «СИБНЕФТЕГЕОФИЗИКА» в своих работах главным образом использовал методы 3Д сейсморазведки с применением кернового материала и данных ГИС. Коллектив ИНГГ СО РАН опирался на литологическое, палеонтологическое-стратиграфическое, геохимическое изучение керна глубоких скважин, детальный сейсмостратиграфический анализ и учитывал более ранние исследования [5].

По результатам выполненного нами седиментологического анализа керновых данных выделены аллювиальная, болотная, озёрная и дельтовая обстановки осадконакопления. Определены следующие фации: равнинной реки с меандрирующим типом русла, включающей

субфации меандровой отмели, прируслового вала, пойменных песков разлива, фации мелких проточных озёр и

мелких застойных озёр, фацию торфяного болота, фации фронта дельты и прodelьты (таблица).

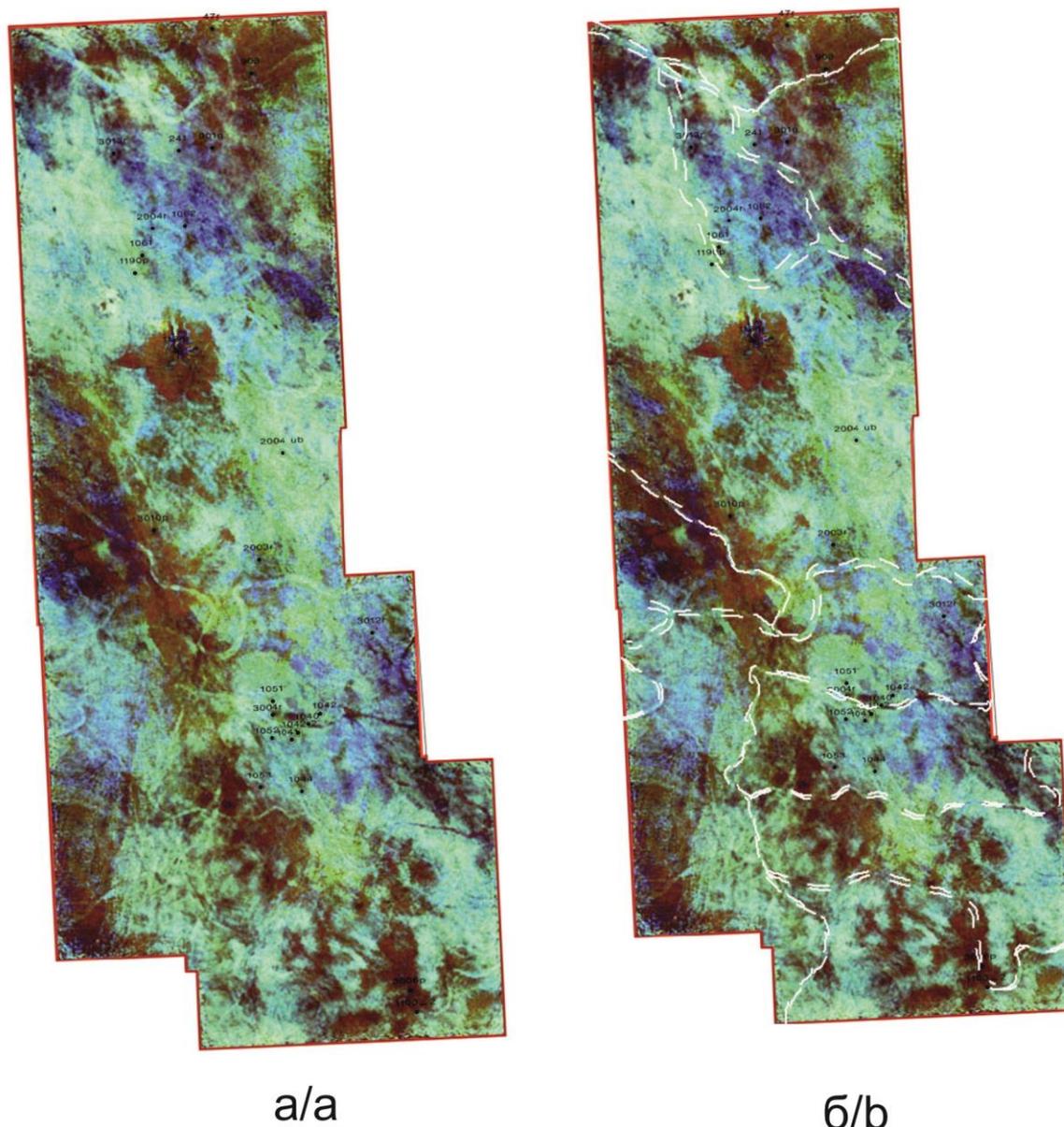


Рис. 3. Сейсмические горизонтальный срез куба RGB-спектральной декомпозиции на стратиграфическом уровне пласта ЮС₃: а) срез пласта без выделенных объектов; б) срез пласта с выделением палеорусел

Fig. 3. Seismic horizontal slice of the RGB-spectral decomposition cube at the stratigraphic level of the US₃ oil-bearing bed: a) layer slice without selected objects; b) layer slice with the selection of paleochannels

Аллювиальная обстановка (макрофация) включает в себя отложения меандровой отмели, прируслового вала, пойменных песков разлива.

Песчаники средне-мелкозернистые с косой однонаправленной слоистостью, подчёркнутой растительным детритом толщиной в несколько метров интерпретированы авторами как отложения меандровых отмелей. Мелкозернистые песчаники, содержащие значительное количество углистого-глинистого материала с разнообразными слоистыми текстурами и серийными швами, обязаны своим формированием субфации *прирусловых валов* (*береговых валов*). Тонко-мелкозернистые песчаники с тонкими прослоями глинистых алевролитов с

тонкой горизонтальной и волнистой слоистостью отнесены к *пойменным пескам разлива* (*кревасовым глиффам*). Их присутствие отмечается в различных масштабах в большей части скважин.

Накопление наибольших по толщине песчаных тел и лучшие коллекторские свойства пластов ЮС₂ и ЮС₃ связаны с отложениями *меандровых отмелей*. В пласте ЮС₃ в отложениях меандровых отмелей пористость варьируется от 12 до 15,1 %, а проницаемость – от 8 до 15 мД. Нефтенасыщенные коллектора пласта ЮС₂ в основном связаны с меандровыми отмелями с пористостью от 11,7 до 16 % и проницаемостью от 7 до 16 мД.

Таблица. Фациальная характеристика коллекторов пластов ЮС₂ и ЮС₃

Table. Facial characteristics of US₂ and US₃ oil-bearing beds

Пласт (пачка) Layer (packet)	Литологическая характеристика Lithological characteristics	Характеристика ГИС GIS characteristics	Обстановка осадконакопления Deposition environment
ЮС ₂ (верхняя) US ₂ (upper)	Песчаники тонкозернистые, переходящие в алевролиты и глины Sandstones are fine-grained, turning into siltstones and clays		Дельта речного влияния (фронт дельты, продельта) River delta effect (delta front, prodelta)
ЮС ₂ (средняя) US ₂ (middle)	Песчаники мелкозернистые с утонением зернистости вверх по разрезу Sandstones are fine-grained with a tendency of fine grains upward the section		Аллювиальная обстановка (равнинные меандрирующие реки, включая субфации: стрежневые осадки русла, меандровые отмели, прирусловые валы, пойменные болота, кривосовые глифы) Alluvial environment (flat meandering rivers, including subfacies: streambed sediments, meander shoals, jetties, floodplains, crevass glyphs)
ЮС ₂ (нижняя) US ₂ (lower)	Песчаники мелкозернистые с утонением зернистости вверх по разрезу Sandstones are fine-grained with a fine grain thinning up the section		Аллювиальная обстановка (равнинные меандрирующие реки, включая субфации: стрежневые осадки русла, меандровые отмели, прирусловые валы, пойменные болота, кривосовые глифы) Alluvial environment (flat meandering rivers, including subfacies: streambed sediments, meander shoals, jetties, floodplains, crevass glyphs)
ЮС ₃ US ₃	Песчаники мелкозернистые с утонением зернистости материала к кровле пласта Sandstones are fine grained with thinning the grain of the material to the roof of the layer		Аллювиальная обстановка (равнинные меандрирующие реки, включая субфации: стрежневые осадки русла, меандровые отмели, прирусловые валы, пойменные болота, кривосовые глифы) Alluvial environment (flat meandering rivers, including subfacies: streambed sediments, meander shoals, jetties, floodplains, crevass glyphs)

В скважине 3010Р присутствуют песчаники мелкозернистые и алевролиты с неясной, пологоволнистой слоистостью, отмечаются включения мелких галек глинистых пород, слоистость часто подчёркнута растительным детритом, интерпретированы как *озёра мелкие проточные*. Выше по разрезу породы сложены алевролитами разнозернистыми и аргиллитами с горизонтальной слоистостью, характерно наличие углистого материала. Их формирование связано с переходом фациальных условий от озёр мелких проточных к *озёрам застойным*.

Породы, представленные углями, углистыми аргиллитами и аргиллитами с корнями углефицированных растений, нами идентифицированы как отложения, формировавшиеся в условиях *торфяного болота*.

Дельтовая макрофация представлена отложениями фронта дельты и продельты.

Песчаники мелко-среднезернистые с косой, косоволнистой, прерывистой фазерной слоистостью, подчёркнутой растительным детритом, с биотурбациями типа Skolithos, интерпретированы как фацция *фронта дельты*.

Алевритистые глины, переслаивающиеся с алевролитами, со следами активной биотурбации с нарушенной линзовидной и субгоризонтальной слоистостью интерпретированы как фацция *продельты*.

Интерпретация горизонтальных сейсмических срезов

Общая сейсмическая картина для пласта ЮС₃ на большей части территории является весьма хаотичной и в комплексе с керновыми данными интерпретирована как озёрно-аллювиальная обстановка.

Отложения пласта ЮС₂ имеют более значительную толщину по сравнению с ЮС₃ и представлены большим количеством фациальных обстановок, что осложняет его сейсмофациальную интерпретацию.

Глубокий анализ сейсмических срезов, построенных на различные временные интервалы, выявил резкое пространственное изменение положения палеорусел пласта Ю₂ на разные периоды его формирования. По скважинным данным (кern и ГИС) выделены три цикла седиментации отложений пласта. Комплексование сейсмических и скважинных данных позволило разделить пласт на три пачки, связанные с раз-

личным распределением геологических тел в пространстве, а также различной палеообстановкой формирования пласта.

Использование комплекса сейсмических срезов, созданных на определенную часть пласта, дало возможность проследить изменение сейсмической картины от его основания до завершения и определить развитие палеорусел во время формирования каждой из пачек.

Интерпретация сейсмических данных свидетельствует о субмеридиональной ориентировке русел.

В целях графического представления палеообстановки и геологической истории формирования пластов ЮС₃ и ЮС₂ создано четыре палеогеографические схемы, характеризующие отложения определенной части пласта. Из них одна схема на ЮС₃ (рис. 5, а) и три на ЮС₂ (рис. 5, б–г).

Из проведенного анализа очевидно, что на формирование отложений пластов группы ЮС₂ и ЮС₃ наиболее существенную роль оказали эрозионно-аккумуляционные процессы разноранговых аллювиальных систем, которые способствовали уникальному распределению индивидуальных аккумулятивных тел канального генезиса. Аллювиальные системы, существовавшие в различное время на разных участках территории, постоянно меандрировали, предопределив высокую неоднородность коллекторов как во времени, так и в пространстве. В конечный этап развития пласта ЮС₂ формирование происходило в переходных условиях, связанных с фациями надводной дельтовой равнины, фронта дельты, продельты. На это указывает возрастание глинистых фракций в породе, начало преобладания текстур волнения и увеличивающейся степени биотурбированности отложений.

Дифференциация пласта Ю₂ на три пачки установлена в рамках предыдущих исследований [5]. На изучаемой нами территории выявлена такая же закономерность строения пласта ЮС₂. Все вышеперечисленные пачки связаны с различными циклами существования палеорек и определенным комплексом фаций (рис. 4). Но подобная дифференциация на данный момент не учтена при проведении геологических работ на исследуемом участке. Поэтому, по предложению авторов, в будущем при корреляции разрезов скважин следует принимать во внимание трёхчленное строение отложений пласта для более точного представления о распространении и локализации коллекторов на данном участке. Это позволит дифференцировать залежи по уровню водонефтяного контакта в связи со способностью глинистых отложений в межпачечном пространстве выполнять роль флюидоупора. Как следствие, в дальнейшем такое деление может повысить точность гидродинамических моделей.

Во время формирования отложений нижней и средней пачки (рис. 5, б, в) на территории существовали озёрно-аллювиальные обстановки. Результаты позволяют идентифицировать, что за период накопления отложений нижней и средней пачки положение палеорек в пространстве многократно менялось. Происходило активное меандрирование, что предопределило формирование в вогнутой части русла песчаного

аллювия. Лишь в период формирования третьей пачки фациальные условия претерпели серьезные изменения – это время ознаменовалось развитием региональной трансгрессии и, соответственно, переходных обстановок в северной части территории и формированием в центральной части дельтового комплекса фаций (рис. 5, г). Кратковременность существования указанных условий стала причиной накопления незначительного количества терригенного материала, явно недостаточного для формирования крупного резервуара для углеводородов. В конце периода формирования пласта ЮС₂ дельтовые обстановки, по причине резкой трансгрессии, сменились морскими.

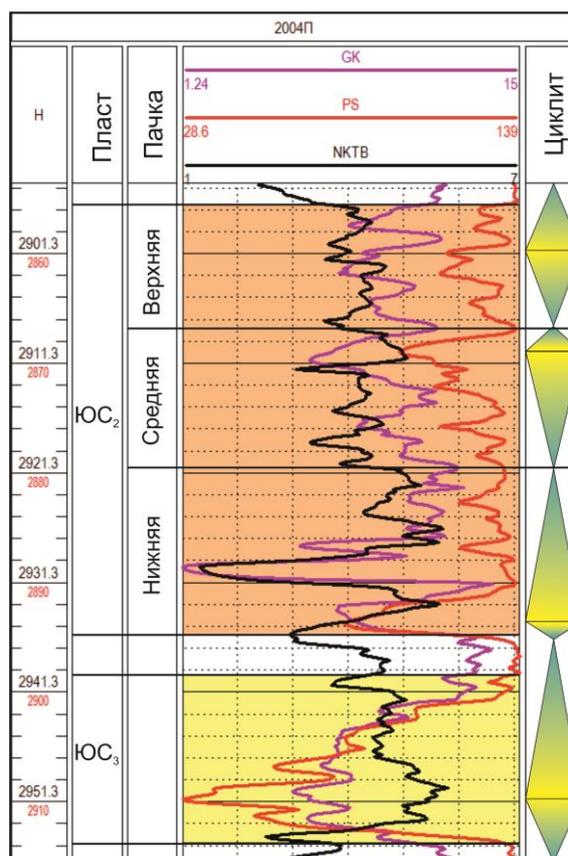


Рис. 4. Схема стратиграфического расчленения пластов ЮС₂ и ЮС₃ тюменской свиты

Fig. 4. Scheme of stratigraphic separation of US₂ and US₃ oil-bearing beds of the Tyumen formation

На представленных палеогеографических схемах (рис. 5) идентифицированы наиболее перспективные зоны для бурения. По причине небольших пространственных параметров песчаных тел наибольший экономический эффект можно достигнуть при бурении в области, где возможно вскрыть несколько песчаных резервуаров. На представленных схемах эти области указаны как наиболее перспективные. К «перспективным» отнесены зоны, где продуктивность прогнозируется для отдельно локализованного песчаного тела. Также рекомендуется производить бурение горизонтальных скважин в зоне отложений *меандровых отмелей*, что призвано обеспечить вскрытие сразу несколько ловушек в латеральном направлении.

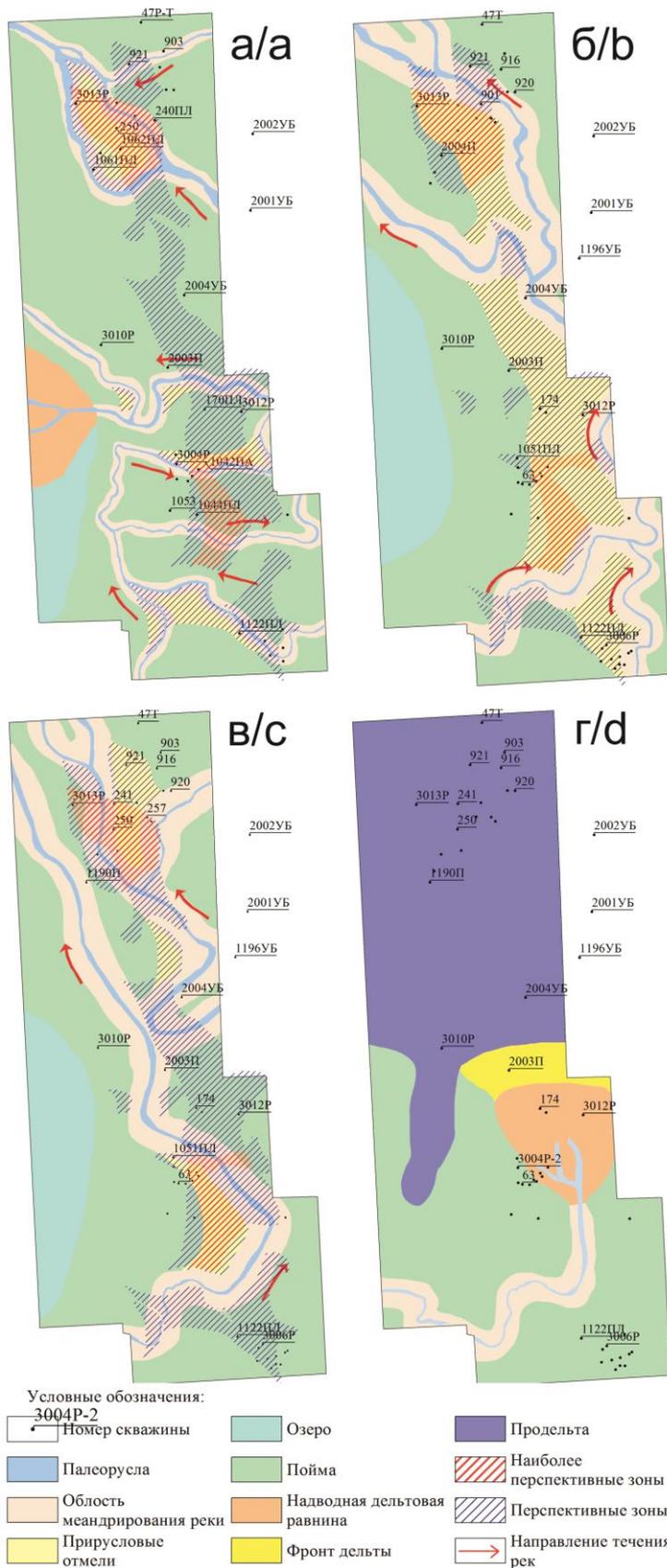


Рис. 5. Палеогеографическая схема: а) пласта ЮС₃; б) нижняя часть пласта ЮС₂; в) средняя часть пласта ЮС₂; г) верхняя часть пласта ЮС₂

Fig. 5. Paleogeographic scheme of: а) US₃ oil-bearing bed; б) lower part of US₂ oil-bearing bed; в) middle part of US₂ oil-bearing bed; г) upper part of US₂ oil-bearing bed

Нельзя не заметить, что опыт и результаты создания литолого-фациальных моделей в пределах Усть-Балык-Мамонтовского вала могут оказаться востребованы для других нефтегазоносных объектов Сургутского свода на среднеюрском стратиграфическом уровне в связи с их формированием в схожих фациальных условиях.

Такие же закономерности формирования верхних отложений тюменской свиты выявлены для северной [31] и восточной [32] части Сургутского свода. А.Ю. Попов с соавторами для северо-востока Широкого Приобья установил, что нижняя часть отложений горизонта Ю₂ формировалась в условиях русловых и пойменных обстановок аллювиального комплекса, представленного трёхчленным строением седиментационных циклов. Вверх по разрезу происходит смена обстановок к дельтовым и прибрежно-морским. Согласно данным В.А. Казаненкова и др. [31], изучавших обстановки формирования северо-восточной части Хантейской гемиантиклизы, к началу формирования горизонта Ю₂ в пределах вышеназванной структуры существовал континентальный режим осадконакопления, сменившийся к позднему бату на прибрежно-морской. Результаты выполненной фациальной интерпретации согласуются с выделенными другими исследователями [31, 32] обстановками в восточной и северной части Сургутского свода. Это позволяет предполагать, что установленные особенности в различных частях Сургутского свода [31, 32] характерны для большого числа перспективных объектов в его пределах. Дальнейшая интерполяция выявленных закономерностей вертикального и латерального распространения коллекторов и распределение их фильтрационных свойств в пределах Усть-Балык-Мамонтовского вала на территорию всего Сургутского свода позволит наиболее эффективно закладывать новые скважины и проводить корректную ресурсную оценку.

Выводы

1. На основании изучения керновых данных, материалов ГИС и сейсмических материалов детализировано строение пласта ЮС₂ в западной части

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Палеогеография Западно-Сибирского осадочного бассейна в юрском периоде / А.Э. Конторович, В.А. Конторович, С.В. Рыжкова, Б.Н. Шурыгин, Л.Г. Вакуленко, Е.А. Гайдебурова, В.П. Данилова, В.А. Казаненков, Н.С. Ким, Е.А. Костырева, В.И. Москвин, П.А. Ян // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54. – № 8. – С. 972–1012.
2. Палеогеография Западно-Сибирского осадочного бассейна в меловом периоде / А.Э. Конторович, С.В. Ершов, В.А. Казаненков, Ю.Н. Карогодин, В.А. Конторович, Н.К. Лебедева, Б.Л. Никитенко, Н.И. Попова, Б.Н. Шурыгин // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55. – № 5–6. – С. 745–776.
3. Скоробогатов В.А. Юрский продуктивный комплекс Западной Сибири: прошлое, настоящее, будущее // Вести газовой науки: науч.-техн. сб. Проблемы ресурсного обеспечения газодобывающих районов России. – 2017. – № 3 (31). – С. 36–58.
4. Перспективы разработки отложений тюменской свиты на территории ХМАО-Югры / А.А. Севастьянов, К.В. Коровин, О.П. Зотова, Д.И. Зубарев // Успехи современного естествознания. – 2016. – № 12-2. – С. 444–448.

- Усть-Балык-Мамонтовского вала и предложена его дифференциация на три пачки.
2. При анализе кернового материала установлены условия седиментации пластов ЮС₂ и ЮС₃ тюменской свиты. Обстановка осадконакопления пласта ЮС₃ интерпретирована как озёрно-аллювиальная, связанная с равнинными меандрирующими реками и мелкими проточными и застойными озёрами. Палеообстановки формирования отложений нижней и средней пачек пласта ЮС₂ также интерпретируются как озёрно-аллювиальные, а отложения верхней пачки – как дельты речного влияния.
 3. Разработаны палеогеографические схемы пластов ЮС₂ и ЮС₃ тюменской свиты, отражающие наиболее перспективные для разработки зоны. Предложенные схемы могут служить основой для дальнейшей разведки территории на перспективы нефти и газа, а также использоваться для моделирования кубов фаций, которые позволяют распределить коллекторские свойства в моделях.
 4. Зоны с лучшими ФЕС (ЮС₃ – К_п от 12 до 15,1 %, К_{пр} от 8 до 15 мД, ЮС₂ – К_п от 11,8 до 16 %, К_{пр} от 7 до 16 мД) алеврито-песчаных разностей пород-коллекторов связаны с *меандровыми отмелями*.
 5. Наиболее перспективные зоны для проведения буровых работ позволят вскрыть сразу несколько природных резервуаров руслового генезиса (*меандровых отмелей*), что позволяет рассматривать их в качестве наиболее перспективных и целесообразных к разработке.
 6. Согласованность полученных авторами результатов фациальной интерпретации с выводами других исследователей об условиях осадконакопления тюменской свиты позволяет предполагать, что установленные особенности характерны для большого числа перспективных объектов в пределах Сургутского свода – выявленные закономерности являются валидными при дальнейшем геологическом моделировании и ресурсной оценке объектов тюменской свиты в пределах всего Сургутского свода.
 5. Седиментогенез коллекторов среднего-верхнего бата и их нефтеносность в Широком Приобье / А.Э. Конторович, Л.Г. Вакуленко, В.А. Казаненков, М.Б. Скворцов, П.А. Ян, В.В. Быков, А.Ю. Попов, Л.С. Саенко // Сибирское отделение РАН. Геология и Геофизика. – 2010. – № 2. – С. 187–200.
 6. Вакуленко Л.Г., Ян П.А. Седиментогенез нефтеносного горизонта Ю₂ и его значение при поисках и разведке залежей углеводородов // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 1. – С. 61–66.
 7. Попов А.Ю., Казаненков В.А. Особенности батского седиментогенеза на северо-востоке Широкого Приобья // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 1. – С. 67–71.
 8. Гаврилова Е.Н. Формирование и нефтеносность высокоизменчивых среднеюрских природных резервуаров на Западе Широкого Приобья: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – М., 2011. – 24 с.
 9. Тюменская свита: методология создания концептуальных геологических моделей / М. Фёдорова, О. Кирзелёва, О. Катаев, Е. Ананьева, Ю. Осипова // Oil & Gas Journal Russia. – 2016. – № 11. – С. 60–63.

10. Рычкова И.В., Шамина М.И. Палеоботанические особенности тюменской и наунакской свит (средняя-верхняя юра юго-востока Западной Сибири) // Известия Томского политехнического университета. – 2018. – Т. 329. – № 5. – С. 15–26.
11. Разработка комплексного подхода для стратиграфического расчленения и корреляции средне-верхнеюрских отложений юго-востока Западной Сибири / И.В. Рычкова, М.И. Шамина, В.В. Аносов, В.П. Иванов // Стратиграфия. Геологическая корреляция. – 2019. – Т. 27. – № 3. – С. 24–39.
12. Особенности разработки отложений тюменской свиты / О.П. Зотова, Д.И. Зубарев, К.В. Коровин, А.А. Севастьянов // Научный форум. Сибирь. – Тюмень: М-центр, 2018. – Т. 4. – № 2. – С. 28–29.
13. Гаврилова Е.Н. Особенности геологического моделирования высокоизменяемых природных резервуаров тюменской свиты Западной Сибири // Технологии сейсморазведки. – 2009. – № 1. – С. 91–99.
14. Walker R.G., Noel P.J. Facies models response to Sea level change. – GeoText 1, 1992. – 454 p.
15. Selley R.Ch. Applied sedimentology. – New York: Academic Press, 2000. – 520 p.
16. Pemberton S.G., Frey R.W. Trace fossil nomenclature and the Planolites-Palaeophycus dilemma // Journal of Paleontology. – 1982. – V. 56. – P. 843–881.
17. Pemberton S.G. Applications of ichnology to petroleum exploration: a core workshop. – SEPM Core Workshop No. 17, 1992. – 429 p.
18. Муромцев В.С. Электрометрическая геология песчаных тел – литологических ловушек нефти и газа. – М.: Недра, 1984. – 260 с.
19. Ежова А.В., Тен Т.Г. Литология нефтегазоносных толщ. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – 122 с.
20. Seismic stratigraphy – applications to hydrocarbon exploration / С.Е. Payton, R. Sheriff, A.R. Gregory, P.R. Vail, R.M. Mitchum, S. Thompson, R.G. Todd, J.B. Sangree, J.M. Widmier, J.N. Bubb, W.G. Hatelid, L.F. Brown, W.L. Fisher, C.J. Stuart, C.A. Caughey, R.J. Weimer, T.L. Davis, M.T. Taner, R.E. Sheriff. – Tulsa, Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists, 1977. – 516 p.
21. Чернова О.С. Научные основы построения геостатических моделей и геометризации юрско-меловых природных резервуаров Западной Сибири на базе петрофизических и седиментологических исследований керн: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск, 2018. – 522 с.
22. Reineck H.E., Singh I.B. Depositional sedimentary environments (with reference to terrigenous clastics). – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1980. – 551 p.
23. Reading H.G. Sedimentary environments and facies. – Blackwell, 1990. – 615 p.
24. Busch D.A. Stratigraphic traps in sandstones: exploration techniques. – Tulsa, Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists, 1974. – 174 p.
25. Yilmaz L. Applications in New River-meander Model // Journal of Geographical Research. – 2020. – V. 3. – P. 18–21. DOI: 10.30564/jgr.v3i1.1896
26. Yilmaz L. Development of River Meander Model // Journal of Geographical Research. – 2020. – V. 3. – P. 14–27. DOI: 10.30564/jgr.v3i1.1845
27. Yilmaz L. Empirical studies in alluvial streams // Journal of Geographical Research. – 2020. – V. 3. – P. 6–8. DOI: 10.30564/jgr.v3i1.1668
28. Yilmaz L. Discussion at maximum sediment discharge theory // Journal of Geographical Research. – 2020. – V. 3. – P. 1–5. DOI: 10.30564/jgr.v3i1.1572
29. Conybeare C.E.B. Geomorphology of oil and gas fields in sandstone bodies. – New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976. – 341 p.
30. Leeder M.R. Sedimentology. Process and product. – Netherlands: Springer, 1982. – 344 p.
31. Палеогеографические реконструкции для северо-восточной части Широкого Приобья на время формирования нефтегазоносного горизонта Ю₂ / А.Ю. Попов, Л.Г. Вакуленко, В.А. Казаненков, П.А. Ян // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55. – № 5–6. – С. 777–786.
32. Обстановки формирования коллекторов горизонта Ю₂ в северо-восточной части Хантейской гемиянтеклизы (Западная Сибирь) / В.А. Казаненков, А.Ю. Попов, Л.Г. Вакуленко, Л.С. Саенко, П.А. Ян // Геология нефти и газа. – 2009. – № 1. – С. 46–53.

Поступила: 02.12.2021 г.

Информация об авторах

Староселец Д.А., аспирант, лаборант-исследователь лаборатории седиментологии и эволюции палеобиосферы Тюменского Государственного университета.

Смирнов П.В., кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией седиментологии и эволюции палеобиосферы Тюменского Государственного университета.

UDC 551.86:553.041:553.982.2

PALEO GEOGRAPHY OF THE TYUMEN FORMATION WITHIN THE UST-BALYK-MAMONTOV SHAFT

Dmitry A. Staroselets¹,
d_star1997@mail.ru

Pavel V. Smirnov¹,
geolog.08@mail.ru

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

The relevance of studying the Tyumen formation is justified by the fact that at present there is a decline in oil production from the Lower Cretaceous and Upper Jurassic intervals. As a result, there is a need to replenish the production fund. The greatest prospects for further production are associated with Middle Jurassic deposits, which represent a long-term prospect for hydrocarbon prospecting, exploration and production in Western Siberia. In addition, an important factor is the spread of productive deposits of the Tyumen formation within the territories with developed infrastructure.

The main aim: to restore the conditions of sediment accumulation of US₂ and US₃ oil-bearing beds within the limits of Ust-Balik-Mamontov shaft.

Objects: oil-bearing beds of the US₂ and US₃ of the Tyumen formation in the northwestern part of the Ust-Balik-Mamontov shaft.

Methods: lithologic-facial analysis of core material, including detailed description of the core, identification of lithogenetic types of rocks, facies and macrofacies, particle size analysis, study of petrographic features of rocks; analysis of geophysical data, including well logging and seismic studies.

Results. The facial conditions of formation US₂ and US₃ oil-bearing beds of the Tyumen formation were determined. Their lateral and vertical distribution in the investigated area was revealed. Separation of layers of US₂ into three packs was proposed. Four paleogeographical diagrams US₂ and US₃ oil-bearing beds were created, three of them belong to US₂ oil-bearing bed and show the paleogeographical arrangement for the time of formation of each of the packs. The zones of distribution of reservoir rocks with the best reservoir properties are predicted and the most promising zones for drilling are identified. The conclusions about validity of the revealed regularities for the Tyumen formation within the neighboring territories were made.

Key words:

Tyumen formation, palaeoenvironment, facies, Ust-Balyk-Mamontov shaft, US₂ and US₃ layers.

REFERENCE

- Kontorovich A.E., Kontorovich V.A., Ryzhkova S.V., Shurygin B.N., Vakulenko L.G., Gaideburova E.A., Danilova V.P., Kazanenkov V.A., Kim N.S., Kostyreva E.A., Moskvina V.I., Yan P.A. Jurassic paleogeography of the West Siberian sedimentary basin. *Geology and geophysics*, 2013, vol. 54, no. 8, pp. 972–1012. In Rus.
- Kontorovich A.E., Ershov S.V., Kazanenkov V.A., Karogodin Y.N., Kontorovich V.A., Lebedeva N.K., Nikitenko B.L., Popova N.I., Shurygin B.N. Cretaceous paleogeography of the West Siberian sedimentary. *Geology and geophysics*, 2014, vol. 55, no. 5–6, pp. 972–1012. In Rus.
- Skorobogatov V.A. Jurassic productive complex of Western Siberia: past, present, future. *News of gas science: scientific and technical collection. Problems of resource supply in gas-producing regions of Russia*, 2017, no. 3 (31), pp. 36–58. In Rus.
- Sevastyanov A.A., Korovin K.V., Zotova O.P., Zubarev D.I. Prospects of development Tyumen suite deposits in the territory of KHMAO-Yugra. *Successes of modern natural science*, 2016, n. 12-2, pp. 444–448. In Rus.
- Kontorovich A.E., Vakulenko L.G., Kazanenkov V.A., Yan P.A., Popov A.Yu., Saenko L.S., Skvortsov M.B., Bykov V.V. Sedimentogenesis and resource potential of middle-upper bathonian reservoirs in the Middle Ob' region. *Geology and Geophysics*, 2010, vol. 51, no. 2, pp. 147–158. In Rus.
- Vakulenko L.G., Yan P.A. Sedimentogenesis of the oil-bearing horizon Yu₂ and its value at prospecting and exploration of hydrocarbon deposits. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic university*, 2010, vol. 316, no. 1, pp. 61–66. In Rus.
- Popov A.Yu., Kazanenkov V.A. Features of the Batsk sedimentogenesis in the north-east of the Shirotniy Priobye. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic university*, 2010, vol. 316, no. 1, pp. 67–71. In Rus.
- Gavrilova E.N. *Formirovanie i neftenosnost vysokoizmenchivyykh sredneyurskikh prirodnykh rezervuarov na Zapade Shirotnogo Priobya*. Avtoreferat Diss. Kand. nauk [Formation and oil bearing capacity of the highly variable Middle-Jurassic natural reservoirs in the West of the Shirotniy Priobye region. Cand. Diss. Abstract]. Moscow, 2011. 24 p.
- Fodorova M., Kirzelova O., Katayev O., Ananyeva E., Osipova Yu. Tyumenskaya svita: metodologiya sozdaniya kontseptualnykh geologicheskikh modeley [Tyumen formation: methodology of conceptual geological models creation]. *Oil & Gas Journal Russia*, 2016, no. 11, pp. 60–63.
- Rychkova I.V., Shaminova M.I. Paleobotanical features of Tyumen and naunak formations (middle-upper Jurassic of the southeast of West Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2018, vol. 329, no. 5, pp. 15–26. In Rus.
- Rychkova I.V., Shaminova M.I., Ivanov V.P., Anosov V.V. Development of the integrated approach to stratigraphic subdivision and correlation of middle–upper Jurassic deposits in southeastern West Siberia. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 2019, vol. 27, no. 3, pp. 297–310. In Rus.
- Zotova O.P., Zubarev D.I., Korovin K.V., Sevastianov A.A. Features of the development of deposits Tyumen suite. *Scientific forum. Siberia*. Tyumen, M-Center Publ., 2018. Vol. 4, no. 2, pp. 28–29. In Rus.
- Gavrilova E.N. Osobennosti geologicheskogo modelirovaniya vysokoizmenchivyykh prirodnykh rezervuarov tyumenskoy svity Zapadnoy Sibiri [Features of geological modeling of highly variable natural reservoirs of the Tyumen Formation in Western Siberia]. *Tekhnologii seysmorazvedki*, 2009, no. 2, pp. 104–108.
- Walker R.G., Noel P.J. *Facies models response to Sea level change*. GeoText 1, 1992. 454 p.
- Selley R.Ch. *Applied Sedimentology*. New York, Academic Press Publ., 2000. 520 p.
- Pemberton S.G., Frey R.W. Trace fossil nomenclature and the Planolites-Palaeophycus dilemma. *Journal of Paleontology*, 1982, vol. 10, pp. 843–881.

17. Pemberton S.G. *Applications of ichnology to petroleum exploration: a core workshop*. SEPM Core Workshop no. 17, 1992. 429 p.
18. Muromtsev V.S. *Elektrometricheskaya geologiya peschanykh tel – litologicheskikh lovshek nefii i gaza* [Electrometric geology of sandbodies – lithological traps of oil and gas]. Moscow, Nedra Publ., 1984. 260 p.
19. Ezhova A.V., Ten T.G. *Litologiya neftegazonosnykh tolshch* [Lithology of oil and gas bearing thicknesses]. Tomsk, TPU Publ., 2013. 122 p.
20. Payton C.E., Sheriff R., Gregory A.R., Vail P.R., Mitchum R.M., Thompson S., Todd R.G., Sangree J.B., Widmier J.M., Bubb J.N., Hatelid W.G., Brown L.F., Fisher W.L., Stuart C.J., Caughey C.A., Weimer R.J., Davis T.L., Taner M.T., Sheriff R.E. *Seismic Stratigraphy – applications to hydrocarbon exploration*. Tulsa, Oklahoma, American Association of Petroleum Geologists, 1977. 516 p.
21. Chernova O.S. *Nauchnye osnovy postroeniya geostaticheskikh modeley i geometrizatsii yursko-melovykh prirodnykh rezervuarov Zapadnoy Sibiri na baze petrofizicheskikh i sedimentologicheskikh issledovaniy kerna*. Diss. Dokt. nauk [Scientific bases of construction of geostatic models and geometry of Jurassic-Cretaceous natural reservoirs of Western Siberia on the basis of petrophysical and sedimentological researches of core Dr. Diss.]. Tomsk, 2018. 522 p.
22. Reineck H.E., Singh I.B. *Depositional sedimentary environments (With Reference to Terrigenous Clastics)*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 1980. 551 p.
23. Reading H.G. *Sedimentary environments and facies*. Blackwell, 1990. 615 p.
24. Busch D.A. *Stratigraphic traps in sandstones: exploration techniques*. Tulsa, Oklahoma, American Association of Petroleum Geologists, 1974. 174 p.
25. Yilmaz L. Applications in New River-meander Model. *Journal of Geographical Research*, 2020, vol. 3, pp. 18–21. DOI: 10.30564/jgr.v3i1.1896
26. Yilmaz L. Development of River Meander Model. *Journal of Geographical Research*, 2020, vol. 3, pp. 14–27. DOI: 10.30564/jgr.v3i1.1845
27. Yilmaz L. Empirical studies in alluvial streams. *Journal of Geographical Research*, 2020, vol. 3, pp. 6–8. DOI: 10.30564/jgr.v3i1.1668
28. Yilmaz L. Discussion at maximum sediment discharge theory. *Journal of Geographical Research*, 2020, vol. 3, pp. 1–5. DOI: 10.30564/jgr.v3i1.1572
29. Conybeare C.E.B. *Geomorphology of oil and gas fields in sandstone bodies*. New York, Elsevier Scientific Publ. Company, 1976. 341 p.
30. Leeder M.R. *Sedimentology. Process and product*. Netherlands, Springer, 1982. 344 p.
31. Popov A., Vakulenko L.G., Kazanekov V.A., Yan P.A. Paleogeographical reconstructions for the northeastern part of the Latitudinal Ob' region during the formation of petroleum horizon J2. *Geology and geophysics*, 2014, vol. 55, no. 5–6, pp. 777–786. In Rus.
32. Kazanekov V.A., Popov A.Yu., Vakulenko L.G., Sayenko L.S., Yan P.A. Environments of reservoir formation of YU₂ horizon in the north-eastern part of Khantei hemianteclise (West Siberia). *Oil and gas geology*, 2009, no. 1, pp. 46–53. In Rus.

Received: 2 December 2021.

Information about the authors

Dmitry A. Staroselets, postgraduate student, laboratory researcher, Tyumen State University.

Pavel V. Smirnov, Cand. Sc., head of the Laboratory of Sedimentology and Paleobiosphere Evolution, Tyumen State University.

УДК 556.556.314:550.47

ВЛИЯНИЕ БИОГЕОХИМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ ВОДОСБОРНОГО БАСЕЙНА ОЗЕРА ТЕЛЕЦКОЕ (СЕВЕРО-ВОСТОЧНЫЙ АЛТАЙ) НА СОДЕРЖАНИЕ ГЛАВНЫХ ИОНОВ И Fe В ВОДАХ ЕГО ПРИТОКОВ

Пузанов Александр Васильевич¹,
puzanov@iwerp.ru

Бабошкина Светлана Вадимовна¹,
svetlana@iwerp.ru, arsenida@rambler.ru

Рождественская Тамара Анатольевна¹,
rtamara@iwerp.ru

Балькин Сергей Николаевич¹,
balykins@rambler.ru

Балькин Дмитрий Николаевич¹,
balykindn@yandex.ru

Салтыков Алексей Владимирович¹,
saltykov@iwerp.ru

Трошкова Ирина Александровна¹,
egorka_iren@mail.ru

Двуреченская Серафима Яковлевна²,
serafima_dv@mail.ru

¹ Институт Водных и экологических проблем СО РАН,
Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1.

² Институт Водных и экологических проблем СО РАН,
Россия, г. Новосибирск, Морской пр., 2.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью расширять и углублять представления о формировании и функционировании крупных пресноводных объектов, химический состав которых тесно связан с особенностями биогеохимических процессов и почвенного покрова водосборной площади и с характером антропогенной нагрузки на окружающую среду водосборных бассейнов. Однако механизмы этих взаимодействий в условиях горных территорий пока еще недостаточно полно изучены.

Цель: установить связь содержания главных компонентов солевого состава вод притоков Телецкого озера и особенностей их химической денудации с биогеохимической обстановкой водосборных бассейнов.

Методы. Пробы воды из притоков озера Телецкое отбирали в чистую полиэтиленовую посуду в устьевой части рек, в периоды весенне-летнего половодья и осенней межени. Определение ионного состава поверхностных вод (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ и K^+) проводили по стандартным методикам, с титриметрическим или спектрофотометрическим окончанием. Na^+ и K^+ в 2018 и 2019 гг. определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии на приборе IRIS Advantage Thermo Jarrell Ash corp. (1999). Содержание Fe в водах и водных вытяжках из почв определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии с использованием электротермической атомизации на приборе SOLAAR M-6.

Результаты. Установлено, что воды притоков озера Телецкое отличаются невысоким уровнем общей минерализации, от 18 до 159 мг/л. Показано, что сезонная динамика главных ионов определяется биогеохимическими процессами, происходящими на водосборе. Выявлено, что воды восточных и западных притоков, дренирующие различные по геологической и ландшафтной структуре, а также по степени рекреационной нагрузки берега, отличаются как по содержанию, так и по соотношению главных ионов. Так, в ионный состав вод восточных притоков, берущих свое начало на гранитном хребте Корбу, большой вклад вносят Cl^- и SO_4^{2-} , K^+ и Na^+ , тогда как в водах западных притоков, дренирующих большей частью осадочные отложения, выражено доминирование гидрокарбонатов и кальция. Показано влияние биогеохимической обстановки водосборных бассейнов на содержание и соотношение железа в воде и водной вытяжке почв. Установлено, что большинство притоков озера Телецкое несут воды гидрокарбонатно-магниево-кальциевого типа. Рассчитаны показатели ионного стока трех различных по величине притоков озера, оценена химическая денудация в их водосборных бассейнах. За один год с водами самого крупного притока – рекой Чулышман – в озеро поступает 364 тыс. т основных растворимых солей. С 1 км² водосборного бассейна р. Чулышман выносятся 21 т солей (это меньше, чем с водосборов более мелких притоков), из них 12,8 т – гидрокарбонатов, 1,4 т – хлоридов, 1,6 т – сульфатов, 4,5 т – кальция, 0,4 т – магния.

Ключевые слова:

Озеро Телецкое, притоки, водосбор, главные ионы, железо, биогеохимическая обстановка, ионный сток.

Введение

Все водоемы и водотоки являются составной частью географического ландшафта, поэтому химический состав их вод определяется биогеохимическими процессами на водосборе [1–5], а также зависит от вида и степени антропогенного прессинга на речные бассейны [6–9]. Однако механизмы процессов взаимодействия системы «водосбор–вода» в бассейнах горных рек пока еще недостаточно полно изучены.

Основную часть стока растворенных веществ составляет ионный сток (95 %). Трансформация стока главных ионов в водах рек является основным индикатором природы выветривания горных пород в бассейнах [8, 9], предикторами для расчетов режима экспорта влаги и растворенных веществ с водосборов [10]. По величине ионного стока реки можно проанализировать изменчивость химической денудации [2, 11], которая в бассейнах рек горных территорий пока еще недостаточно полно изучена.

или сложены крупными валунами, обломочным материалом. Песчаные и галечные берега наблюдаются в устьях рек Чулышман, Кыга, Кокши, Колдор, Самыш.

В ландшафтной структуре бассейна Телецкого озера в целом преобладают лесные сообщества, залесенность бассейна озера составляет более 50 % и увеличивается с юга на север [12]. На севере преобладают кедрово-пихтовые леса с примесью сосны, а на юге – кедрово-лиственничные. Существует мнение, что именно в лесных водосборах корреляция между потоками вещества и химическими характеристиками воды наиболее сильная [5]. Обширные территории бассейнов некоторых притоков Телецкого озера заболочены.

Почвенный покров бассейна озера характеризуется четкой вертикальной зональностью и широтной поясностью, присущей горным областям. Восточные (правые) притоки Телецкого озера преимущественно дренируют экзарационно-денудационные склоновые поверхности с каменистыми примитивными горно-тундровыми и горно-луговыми почвами. В бассейнах западных (левых) притоков озера в большей степени представлены кедрово-таежные лесные сообщества с горно-лесными бурами типичными и оподзоленными, реже дерново-подзолистыми и серыми, лесными почвами [15] на мощных и переработанных осадочных породах. В южной части бассейна озера, в бассейне р. Чулышман, занимающем более 80 % площади водосбора озера, почвенный покров, из-за разнообразия биогеохимических условий в пределах высотной поясности, отличается существенной неоднородностью.

Объектами нашего исследования являлись: наиболее крупный приток озера – река Чулышман, правый крупный приток широтной части озера – река Камга, крупный приток южной оконечности озера – река Кыга. В широтной части озера были исследованы реки Колдор и Самыш, в меридиональной части на западном берегу – реки Большие и Малые Чили, а также малая река Чедор, на восточном – крупная река Кокши, малые реки – Корбу, Челюш, Чири, а также ручей В. Камелик (рис. 1). Некоторые реки в устьевой части образуют конусы выноса и сразу за береговой полосой заболочены (Чулышман, Кыга, Камга, Колдор, Самыш), а другие практически не имеют долин, впадают в озеро водопадом (р. Корбу). В самом озере пробы воды отбирались в его северной (широтной) части у поселка Яйло.

Телецкое озеро является одним из основных туристических объектов Алтая. Поселки Артыбаш и Яйло (широтная часть озера), бассейны рек Чулышман, Большие и Малые Чили (западный берег) в летний период подвергаются существенной рекреационной нагрузке. В бассейнах рек Иогач и Самыш (северная, широтная часть озера) происходят вырубки кедрового леса, а до середины XX в. здесь велась добыча золота (прииск Калычак). Восточная часть территории озера Телецкое входит в Алтайский государственный природный заповедник, и антропогенная нагрузка на окружающую среду здесь заметно ниже, за исключением участка возле водопада на р. Корбу, притягивающего каждый год внимание тысяч туристов.

В дополнении к туристической нагрузке на окружающую среду Телецкого озера может добавиться промышленная, поскольку не так давно поднимался вопрос о возможности строительства золотоизвлекательной фабрики в районе с. Артыбаш. Добыча золота вблизи Телецкого озера, несомненно, будет наносить определенный ущерб экологической целостности природной территории.

Все это подчеркивает актуальность исследования химического состава компонентов природных ландшафтов Телецкого озера в настоящее время, важность изучения биогеохимической обстановки в его водосборном бассейне, необходимость оценки степени устойчивости системы «вода – водосборный бассейн».

Методы исследования

Исследование основных компонентов ионного состава вод притоков озера Телецкое нами проводилось в 2016–2019 гг. Пробы воды из притоков озера Телецкое отбирали в периоды весенне-летнего половодья и осенней межени в чистую полиэтиленовую посуду в устьевой части рек, где наблюдается максимальная минерализация воды и наиболее интенсивный вынос химических элементов. Пробы, в которых предполагалось определение Fe, фильтровали через мембранный фильтр, консервировали HNO_3 (2 мл на 0,5 л) согласно методике [16], транспортировали в темных контейнерах.

Определение ионного состава поверхностных вод проводили по стандартным методикам [16]: Cl-ион – меркурометрическим методом, жесткость воды и кальций – комплексонометрическим (титровали трилоном Б), магний рассчитывали по разнице. Гидрокарбонаты оттитрованы раствором серной кислоты. Сульфаты определены турбидиметрически на спектрофотометре. pH вод определены потенциометрически. Na и K в 2016 и 2017 гг. определяли по разнице, а в 2018 и 2019 гг. – методом атомно-эмиссионной спектроскопии в Химико-аналитическом центре ИГиМ СО РАН на приборе IRIS Advantage Thermo Jarrell Ash corp. (1999). Содержание Fe в водах и водных вытяжках из почв определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии в химико-аналитическом центре ИВЭП СО РАН с использованием электротермической атомизации на приборе SOLAAR M-6. Для калибровок прибора использовали стандартные растворы ГСО, контроль правильности определений проводили с помощью метода добавок.

Всего было отобрано и проанализировано более 80 проб воды.

Статистическую обработку данных проводили стандартными методами в Excel: рассчитывали среднее арифметическое, стандартное отклонение

$$\sigma = \sqrt{\frac{(x-\bar{x})^2}{(n-1)}}$$
 и ошибку средней ($\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$), коэффициенты вариации ($\frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100\%$) [17].

Данные о погоде в периоды, предшествующие отборам проб, были получены с сайта rp5.ru; архив данных найден только по метеостанции Артыбаш.

Интенсивность химической денудации разных по величине речных бассейнов оценивали по величине модуля ионного стока – количеству растворимого вещества (т), переносимого с единицы площади водосборного бассейна (км²) в единицу времени, по формуле $M_{ions}=(Q/F) \times C$, где Q – расход воды (л/с); F – площадь водосбора (км²); C – суммарное содержание главных ионов, мг/л. Для расчетов использовались полученные нами данные о содержании главных ионов в водах, а также данные о среднесуточных расходах воды, м³/с [14].

Результаты исследования и обсуждение

По результатам наших исследований общее содержание водорастворимых солей в водах притоков озера Телецкое очень невысокое и варьирует в пределах от 18 до 159 мг/л (табл. 1). Большинство изученных рек несут воды с содержанием водорастворимых солей в среднем от 55 до 114 мг/л. По классификации С.Л. Шварцева исследуемые воды можно отнести к классу пресных вод, подклассу умеренно пресных. По результатам наших предыдущих исследований среднее содержание водорастворимых солей в притоках озера Телецкое в 2009 г. составляло 106 мг/л [18]. Для сравнения, в водах ручьев и рек бассейна р. Мульта (Центральный Алтай) в 2008 г. значения общей минерализации вод были заметно ниже и не превышали 45 мг/л (в случае преимущественно грунтового их питания), а в водотоках, имеющих ледниковое питание, общая минерализация не превышала 20 мг/л [19].

В воде большинства притоков озера Телецкое содержание гидрокарбонат-иона изменяется от 30 до

100 мг/л, хлоридов – от 0,7 до 6,3 мг/л, сульфатов – от 3 до 12 мг/л, кальция – от 8 до 24 мг/л, магния – от 1,2 до 4,8 мг/л; преобладающим анионом является гидрокарбонат-ион, а среди катионов доминирует кальций. По литературным данным, в поверхностных водах Восточной Сибири среди главных ионов, как правило, также преобладают HCO_3^- , Ca^{2+} и Mg^{2+} , однако часто в заметно более высоких концентрациях [20].

Показатели ионного состава воды притоков озера Телецкое сравнимы с данными по ионному составу вод высокогорной реки Актру (Юго-Восточный Алтай), берущей свое начало с ледников [21], – в ее устье содержание гидрокарбонатов составляет 83 мг/л, сульфатов 25 мг/л, хлоридов 1,5 мг/л, кальция 25,3 мг/л, магния 7,4 мг/л и натрия 6,4 мг/л. Таким образом, содержание SO_4^{2-} , Mg^{2+} и Na^+ в воде устья р. Актру немного выше, чем в водах большинства притоков озера Телецкое, тогда как хлоридов в водах в устье р. Актру содержится меньше.

Наименьшее содержание водорастворимых солей обнаруживалось в водах рек Корбу и Кокши восточного берега меридиональной части озера, берущих свое начало на хребте Корбу, сложенном гранитами. Наши данные согласуются с результатами более ранних исследований химического состава притоков Телецкого озера [22]. Отметим, что за 8 лет уровень общей минерализации воды р. Корбу вырос почти в 1,5 раза, с 24,8 мг/л (осень 2009 г., согласно [22]) до 33,8 мг/л (осень 2017 г.), что можно объяснить усиливающимся влиянием рекреационной нагрузки.

Таблица 1. Ионный состав и суммарное содержание основных ионов в водах притоков озера Телецкое, мг/л, по данным за 2016–2019 гг. (в числителе – среднее \pm ошибка средней, в знаменателе – диапазон значений)

Table 1. Ionic composition and total content of major ions in the waters of the Teletskoe tributaries, mg/L, according to data for 2016–2019 (in the numerator – the mean \pm the error of the mean, in the denominator – the range of values)

Реки/Rivers	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	Σ
Восточные притоки/Eastern tributaries							
Камга Kamga	48,1 \pm 2,9 39,6...61,0	2,2 \pm 0,3 1,4...4,2	5,5 \pm 0,6 3,1...8,7	12,8 \pm 0,5 8,0...16,0	3,1 \pm 0,3 2,4...4,8	1,6 \pm 0,3 0,5...3,1	73,4 \pm 3,3 62,8...88,8
Корбу Korbu	13,5 \pm 1,5 9,2...18,3	2,8 \pm 0,4 2,1...4,9	4,5 \pm 0,6 3,1...7,3	2,7 \pm 0,5 1,2...4,0	1,0 \pm 0,1 0,5...1,2	3,9 \pm 0,6 2,4 ... 6,5	28,3 \pm 1,6 22,0...33,8
Кокши Kokshi	13,1 \pm 1,6 6,1...18,3	1,9 \pm 0,4 0,7...4,2	5,3 \pm 0,6 3,1...9,1	3,4 \pm 0,4 2,0...5,0	1,8 \pm 0,2 1,2...2,4	1,6 \pm 0,2 0,26...2,8	27,1 \pm 2,0 18,6...34,1
Челюш Chelyush	19,3 \pm 2,0 12,2...24,4	1,6 \pm 0,4 0,4...3,5	4,6 \pm 0,4 3,1...6,4	4,5 \pm 0,4 3,0...6,0	2,0 \pm 0,3 1,0...3,6	1,5 \pm 0,1 0,9...2,2	33,6 \pm 2,5 22,0...42,1
Кыга Kyga	59,2 \pm 4,1 42,7...64,1	3,3 \pm 0,7 2,1...6,0	6,1 \pm 1,1 3,1...9,1	17,6 \pm 1,5 12,0 ...20,0	3,0 \pm 0,4 2,4...4,2	1,9 \pm 0,3 1,1...2,8	91,1 \pm 6,8 65,1...104,6
Чири Chiri	38,1 \pm 2,9 30,1...42,7	2,1 \pm 0,5 1,4...3,5	3,8 \pm 0,5 3,1...5,3	10,3 \pm 1,4 8,0 ... 13,2	2,5 \pm 0,8 1,2 ... 4,8	0,9 \pm 0,2 0,5...1,5	55,8 \pm 6,0 39,0...63,5
В. Камелик V. Kamelik	81,8 \pm 5,7 61,0...103,7	2,7 \pm 0,7 1,4...3,5	11,0 \pm 0,4 9,7...12,5	24,7 \pm 2,8 12,0...32,0	6,0 \pm 0,5 4,8...7,2	1,5 \pm 0,3 0,9...2,2	128,1 \pm 8,6 93,6...159,0
Западные притоки/Western tributaries							
Колдор Koldor	79,3 \pm 12,2 67,1...91,5	0,9 \pm 0,2 0,7...1,1	6,7 \pm 0,5 6,2...7,2	22,0 \pm 2,0 20,0...24,0	3,0 \pm 0,6 2,4...3,6	2,6 \pm 0,8 1,8...3,4	114,4 \pm 15,0 99,6...129,5
Самыш Samysh	76,3 \pm 6,8 58,0...97,7	2,9 \pm 0,7 1,8...4,2	7,7 \pm 1,2 4,6...9,6	22,0 \pm 2,2 16,0...30,0	3,8 \pm 0,3 3,6...4,8	1,7 \pm 0,5 0,5...3,2	113,8 \pm 9,9 87,0...148,9
Чедор Chedor	62,5 \pm 4,6 58,0...67,1	4,6 \pm 0,3 4,2...4,9	8,6 \pm 2,5 6,1...11,0	21,0 \pm 1,0 20,0...22,0	3,0 \pm 0,6 2,4...3,6	0,8 \pm 0,3 0,5...1,1	100,4 \pm 2,4 97,7...102,9
М. Чили M. Chili	53,5 \pm 2,7 42,7...67,9	2,3 \pm 0,4 0,7...4,2	4,4 \pm 0,6 3,1...7,2	14,4 \pm 1,2 8,0...18,0	2,9 \pm 0,4 1,2...3,6	1,6 \pm 0,2 0,5...2,8	79,3 \pm 4,1 71,5...100,3
Б. Чили B. Chili	59,0 \pm 2,4 48,8...70,2	2,3 \pm 0,5 1,1...4,9	5,1 \pm 0,5 3,5...6,8	17,4 \pm 0,7 14,0...21,0	2,5 \pm 0,3 1,2...4,8	1,4 \pm 0,2 0,6...2,1	88,3 \pm 3,0 71,5...100,3
Чулышман Chulyshman	59,6 \pm 6,5 36,6...79,3	3,2 \pm 0,5 2,1...6,3	6,0 \pm 0,6 4,1...8,5	17,0 \pm 1,6 12,0...24,0	3,0 \pm 0,6 1,2...4,8	1,5 \pm 0,2 1,0...2,9	88,7 \pm 9,2 57,2...124,2
Район пос. Яйло/Yaylu settlement area							
Озерная вода Lake water	58,6 \pm 2,9 48,8...73,2	2,5 \pm 0,5 0,7...4,2	5,8 \pm 0,5 3,1...8,2	17,0 \pm 0,7 14,0...20,0	2,7 \pm 0,4 1,2...4,8	2,0 \pm 0,2 1,3...3,2	88,5 \pm 3,8 75,6...106,4

Известно, что средняя концентрация СаО в осадочной толще равна 15,9 %, а в гранитном слое земной коры – всего 2,7 % [2], поэтому реки, дренирующие осадочные толщи, и реки, дренирующие магматические породы, отличаются по химическому составу и соотношению главных ионов в водах. Реки восточного берега рек Корбу и Кокши, берущие свое начало с одной гранитной вершины, заметно отличаются от других притоков озера и по соотношению главных ионов. В их водах долевое участие натрия и калия в ионной композиции более существенно (рис.

2), чем в водах противоположных западных притоков, дренирующих преимущественно осадочные толщи и потому несущих воды, в которых преобладают гидрокарбонаты и кальций.

Невысоким суммарным содержанием ионов характеризуется и другой восточный приток меридиональной части озера – р. Челюш, питающийся от снежников с гольцов (табл. 1). По данным 40-летней давности [23], общая минерализация вод в р. Челюш была немного выше (50–80 мг/л), чем в настоящее время.

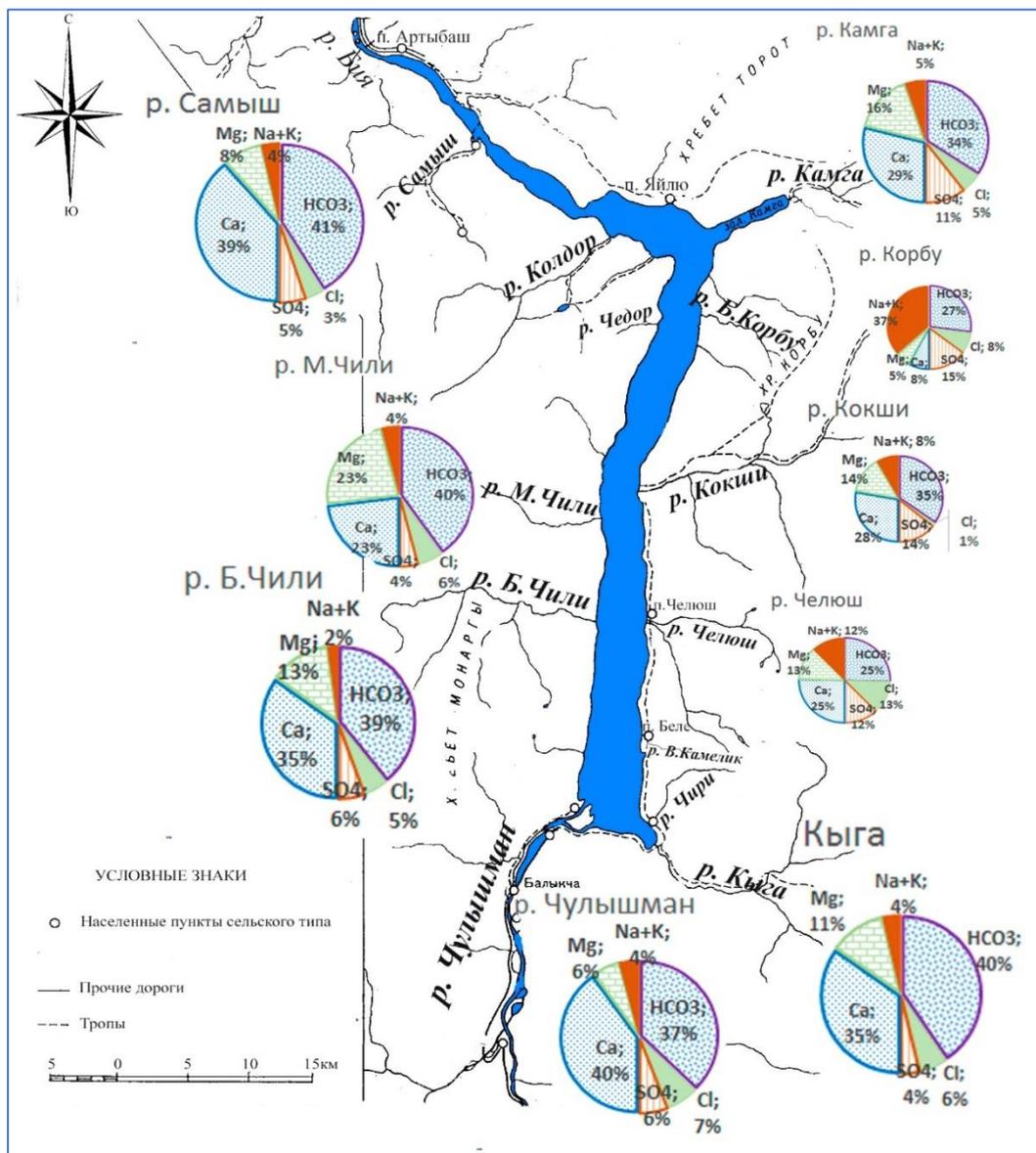


Рис. 2. Долевое участие главных ионов в формировании ионного состава вод притоков озера Телецкое, в %-экв. (площади круговых диаграмм пропорциональны уровню общей минерализации вод)

Fig. 2. Share of the major ions in the ionic composition of the tributaries waters of Lake Teletskoe (the areas of the pie charts are proportional to the TDS)

Более крупные притоки озера Телецкое (реки Кыга и Камга) характеризуются заметно более высоким уровнем общей минерализации вод. Но самое высокое суммарное содержание главных ионов каждый год фиксируется нами в воде малого восточного при-

тока озера – ручья Камелик, который питается в основном подземными высокоминерализованными водами. Максимальное значение общей минерализации его вод (159 мг/л осенью 2017 г.) совпадает с данными 1979 г. [23].

Сравнительно высокое общее содержание главных ионов отмечено в водах рек северной (широтной) части озера – в р. Самыш (до 148,9 мг/л осенью 2018 г.) и р. Колдор (до 129,5 мг/л осенью 2019 г.), несмотря на то, что в этой части озера водосборы отличаются большей (по сравнению с южной частью озера) степенью залесённости. Повышенный уровень общей минерализации вод рек северной части озера объясняется многочисленными вырубками в их бассейнах, что приводит к нарушению почвенного покрова кедровых массивов, усилению в них процессов денудации и смыва вещества и химических соединений, чему способствует большая (по сравнению с южной частью озера) количество осадков. Возможный запуск работы золотоизвлекательной фабрики в бассейне реки Самыш, несомненно, приведет к дополнительному активному поступлению химических элементов и соединений (каких именно – будет зависеть от технологии извлечения) в речную сеть.

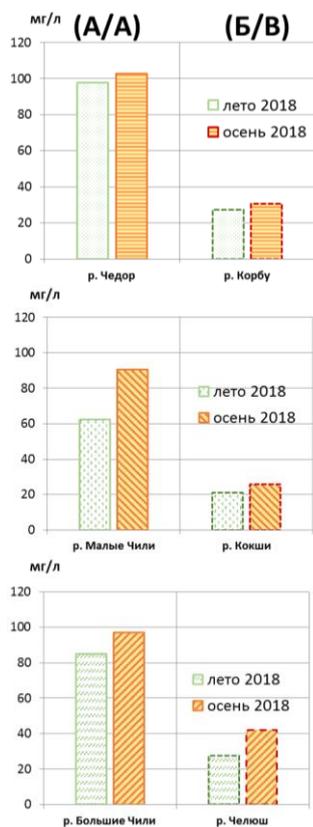


Рис. 3. Уровни общей минерализации вод противоположных притоков (А) западного и (Б) восточного берегов меридиональной части Телецкого озера в различные гидрологические периоды (весенне-летнего половодья и осенней межени) 2018 г.

Fig. 3. Total mineralization of the waters of the opposite tributaries (A) of the western and (B) eastern shores of the meridional part of Lake Teletskoe in various hydrological periods (spring-summer high water and autumn low water), in 2018

По результатам нашего исследования противоположные друг другу реки меридиональной части озера весьма существенно различаются по уровню общей

минерализации вод. Так, на графиках (рис. 3) приведено суммарное содержание солей в «парных» реках: Чедор (западный приток) и Корбу (восточный приток), Малые Чили (слева) и Кокши (справа), Большие Чили (слева) и Челюш (справа), за два гидрологических периода (2018 г., лето и осень). Заметно, что более насыщены главными ионами воды западных притоков (рис. 3, А). Это объясняется тем, что дренируют они в основном берега с более зрелыми и сформированными горно-лесными почвами на мощных рыхлых осадочных отложениях. В водосборных бассейнах восточных притоков, стекающих со скалистых склонов, в большей степени представлены примитивные каменистые почвы на породах гранитного состава, поэтому воды правых притоков менее насыщены растворимыми солями.

Различия между западными и восточными притоками по содержанию главных ионов в водах, возможно, является и результатом нарастающего антропогенного воздействия на окружающую среду со стороны туристических объектов на западном берегу озера, в устьях рек Б. Чили, М. Чили, Чулышман.

Сезонная динамика общей минерализации вод изученных нами притоков озера выражена довольно отчетливо и в основном соответствует внутригодовому изменению водности: в период осенней межени, когда в общую минерализацию вод вносят вклад грунтовые воды, уровень содержания главных солей заметно выше, чем в период весенне-летнего половодья, когда происходит приток талых ледниковых вод (рис. 4).

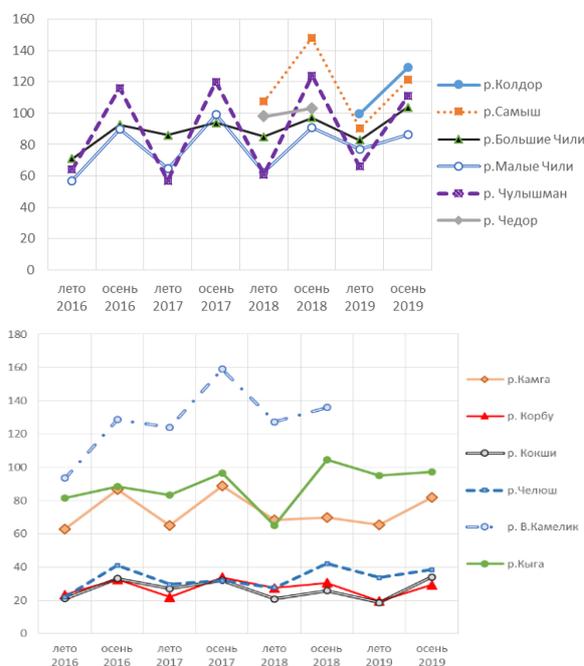


Рис. 4. Сезонная динамика общей минерализации вод западных (слева) и восточных (справа) притоков озера Телецкое

Fig. 4. Seasonal dynamics of the total mineralization of the waters of the western (left) and eastern (right) tributaries of Lake Teletskoe

На долю гидрокарбонат-иона в водах притоков озера Телецкое приходится, как правило, от 62 до 90 % от общего (в мг-экв./л) содержания анионов. В водах восточных притоков меридиональной части – реках Корбу, Кокши – содержание гидрокарбонат-иона заметно ниже, его доминирование не так выражено: 31–73 %-экв. (рис. 2).

Считается, что сезонные колебания концентрации и соотношения нативных ингредиентов в природных водоемах существенно не изменяются в течение большей части года и не зависят от стока [24–26], за исключением штормовых событий [25], тогда как содержания компонентов, имеющих частично антропогенное происхождение, могут существенно колебаться [24, 26]. Отметим, что величины коэффициентов вариации средних содержаний HCO_3^- и Ca^{2+} в водах большинства притоков озера наименьшие, что подтверждает природные источники поступления этих ионов в воды. При этом содержание хлорид-иона в водах притоков озера Телецкое варьирует наиболее существенно, $C_v=43-62\%$, что, возможно, указывает на его частично «неконсервативное» [24] происхождение. Наиболее высоким содержанием хлоридов в воде отличаются реки южной оконечности озера – р. Чулышман и р. Кыга. Установлено, что в водах восточных притоков (реках Корбу, Кокши, берущих свое начало с гранитного хребта Корбу) на долю хлоридов приходится до 37 %-экв., тогда как в водах западных притоков – не более 12 %-экв. Считается, что более существенная роль хлорид-иона в уровне общей минерализации природных вод связана с его более интенсивным выщелачиванием из горных пород гранитного состава [23].

Содержание сульфатов в водах притоков озера Телецкое относительно невысокое и за весь изученный период не превышает 13,5 мг/л. По результатам нашего исследования наиболее высоким содержанием SO_4^{2-} в водах отличается ручей Камелик, от 9,7 до 12,5 мг/л (12–16 %-экв.), что объясняется присутствием сульфидов в зоне контакта гранитов и метаморфических сланцев [23]. Довольно высоким содержанием сульфатов в водах отличаются также реки Чедор и Колдор.

В течение года содержание сульфатов в водах большинства притоков Телецкого озера существенно не изменяется. Однако в самом крупном притоке озера р. Чулышман содержание сульфатов от лета к осени, как правило, возрастает в 1,5–2 раза. В последние годы отмечен некоторый рост содержания сульфатов в воде в реках Корбу и Кокши – до 7,3 в р. Корбу осенью 2018 г. и до 9,1 мг/л в р. Кокши осенью 2019 г.

Участие кальция в формировании катионного состава вод притоков озера Телецкое, как правило, значительно (рис. 2): 60–85 %-экв., при содержании от 0,6 до 32 мг/л. Наиболее высоким содержанием кальция в воде отличается ручей В. Камелик, а также крупные притоки северной части озера – реки Колдор и Самыш (табл. 1). Концентрация магния в водах притоков озера Телецкое невысокая – как правило, от 0,5 до 4,8 мг/л (7,2 мг/л отмечалось в р. В. Камелик).

Повышенным содержанием Na^+ и K^+ отличаются воды р. Корбу. В 2018 г. содержание K^+ в водах

р. Корбу составляло 6 мг/л, а Na^+ – 2,9 мг/л. На долю суммарного содержания натрия и калия в водах большинства притоков озера Телецкое приходится, как правило, не более 2–11 %-экв. от общего содержания катионов, но в воде в р. Кокши этот показатель составляет 10–29 %-экв., а в р. Корбу – 32–73 %-экв. (рис. 2).

Калий более прочно, чем натрий и кальций, удерживается в пределах Мировой суши, поскольку большая его часть при гипергенной перестройке кристаллохимических структур силикатов остается в составе вновь образованных глинистых минералов. В осадочной оболочке средняя концентрация K_2O равна 1,87 %, а в гранитном слое земной коры – 2,89 % [2]. Считается, что в водосборах, где калий в основном поступает в воду в результате выветривания горных пород, его концентрация в водах рек с увеличением количества осадков и стока должна снижаться из-за процессов растворения, а в водосборах, где калий, будучи вовлеченным в биогеохимический круговорот, активно поступает в воды из верхних горизонтов почв, с увеличением осадков и стока его концентрация в водах рек возрастает [27]. По нашим данным, в 2018 г., когда была холодная и влажная осень (а за 4 дня до отбора проб в районе с. Артыбаш шли непрерывные дожди), в крупных западных притоках озера – реках Самыш, М. Чили и Б. Чили, содержание калия в водах (определенного атомно-эмиссионным методом) было существенно выше (0,75, 0,71 и 0,35 мг/л соответственно), чем в 2019 г., когда наблюдалась сухая осень (0,28, 0,32 и 0,25 мг/л соответственно). Можно предположить, что на северных берегах широтной части озера и на западных берегах меридиональной части озера, бассейны которых большей частью представлены горно-лесными ландшафтами с хорошо сформированными горно-лесными бурными и дерново-подзолистыми почвами, калий интенсивнее вовлекается в биогеохимический круговорот и существенная его часть поступает в воды с поверхностным и внутриводным стоком. В бассейнах восточных притоков чаще встречаются участки с примитивным каменистым почвенным покровом (реки Челюш, Кокши); влажной осенью 2018 г. содержание калия в их водах, наоборот, было почти в два раза ниже (0,48 и 0,31 мг/л), чем в сухую осень 2019 г. (0,8 и 0,58 мг/л соответственно). То, что с увеличением количества осадков и стока концентрация калия в реках восточного берега озера снижается, возможно, свидетельствует о его поступлении в воды преимущественно в результате выветривания горных пород [25], что согласуется с предположениями А.М. Малолетко и Т.П. Шестаковой [23].

В пробах воды самого озера, дважды в год отбираемых у пос. Яйло, суммарное содержание солей часто выше, чем в притоках, и варьирует в пределах 69,4...97,9 мг/л. Возможно, это объясняется повышенной (125–190 мг/л) минерализацией вод нескольких ручьев, впадающих в озеро вблизи поселка, которые, в свою очередь, питаются грунтовыми безнапорными водами рыхлых отложений высоких озерных террас [23] валунно-галечникового состава. В водах

озера, как и в водах его притоков, среди анионов преобладают гидрокарбонаты, а среди катионов – кальций (табл. 1), однако стоит отметить, что в последние годы в водах оз. Телецкое в районе пос. Яйлю в формировании ионного состава воды выросло участие хлоридов, а, как известно, хлориды в континентальных водах имеют во многом животное происхождение и являются продуктом жизнедеятельности животных организмов [2]. Наиболее стабильно в водах озера содержание кальция, а наиболее существенно в зависимости от гидрологического периода варьирует содержание гидрокарбонатов и хлоридов.

Таблица 2. Содержание растворенного железа в водах притоков и в водной вытяжке из почв (верхние горизонты), мкг/л

Table 2. Iron content in tributaries waters and in water extract from soils (upper horizons), mcg/l

Река River	Fe в водной вытяжке почвы Fe in soil water extraction	Fe в воде Fe in water	Fe(вода)/ Fe(вод. выт. почв) Fe (water)/Fe (soil water extraction)
Восточные притоки/Eastern tributaries			
Камга Kamga	520	210	0,40
Корбу Korbu	580	270	0,47
Кокши Kokshi	670	230	0,34
Кыга Kuga	660	230	0,35
Западные притоки/Western tributaries			
Самыш Samysh	1180	310	0,26
Б. Чили B. Chili	1320	190	0,14
М. Чили M. Chili	1530	210	0,14
Чулышман Chulyshman	1670	200	0,12

Содержание растворенного Fe в отфильтрованных пробах вод притоков озера Телецкое варьирует незначительно, от 210 до 310 мкг/л. Довольно высокие количества Fe в водах притоков озера Телецкое являются отражением биогеохимической обстановки в лесных и заболоченных ландшафтах водосборов, способствующей образованию его подвижных форм [2]. Наиболее высоким содержанием растворенного железа, превышающим ПДК в.х. (300 мкг/л), отличаются воды р. Самыш, что, возможно, является результатом и антропогенного воздействия на окружающую среду в бассейне реки.

В водных вытяжках из верхних горизонтов почв содержание железа изменяется от 520 до 1670 мкг/л (табл. 2), по этому показателю восточные и западные притоки существенно различаются. Различаются и соотношения содержаний микроэлементов в воде и в водной вытяжке почв западных и восточных притоков, что обусловлено различий биогеохимической обстановкой водосборных бассейнов. Так, в долинах западных притоков часто встречаются мелкие подпруженные и заболоченные озера [15], болотные массивы с кислой реакцией среды почв и восстанови-

тельными условиями, благоприятными для образования подвижных форм железа [2]. Это определяет большую насыщенность почв западного берега Телецкого озера водорастворимым железом. Однако в силу буферной способности горно-таежных и горно-лесных бурых почв западных берегов железо, очевидно, прочно фиксируется в составе почвенных микроагрегатов, образует комплексы с фульвокислотами и в меньших количествах попадает в воды дренирующих водотоков – соотношения $Fe_{\text{вод}}/Fe_{\text{почв}}$ здесь ниже. На восточном берегу, где более распространены литогенные почвенные образования, содержание водорастворимых форм железа в почвах заметно меньше, но при этом в поверхностных водах зачастую больше, поскольку крутые склоны и низкое содержание сорбирующих веществ в почвах восточных берегов озера благоприятствуют активному выносу растворимых форм железа в речную сеть.

Таблица 3. Гидрологические характеристики и расчетные величины ионного стока в притоках Телецкого озера с существующими гидрологическими постами

Table 3. Hydrological characteristics and calculated values of ion runoff in the tributaries of Lake Teletskoe on which there are hydrological posts

Характеристики, показатели Characteristics, indicators	р. Чулышман г. Chulyshman	р. Кокши г. Kokshi	р. Чиря г. Chiri
Площадь водосбора, км ² [12] Catchment area, km ² [12]	17200	472	37
Средняя высота водосбора, м [12] Average catchment height, m [12]	2040	1540	1630
Длина реки, м [12] River length, m [12]	241	37	11
Уклон реки, % [14] River slope, % [14]	8,6	18	150
Среднегодовой расход воды, м ³ /с, 2018 г. [2] Average annual water consumption, m ³ /sec., 2018 [2]	175,8	16,2	0,69
Объем стока, км ³ за год Runoff volume, km ³ per year	5,5	0,51	0,02
Среднемесячный расход воды м ³ /с (июнь/сентябрь) Average monthly water consumption m ³ /sec. (June/September)	728,0 133,6	46,5 22,9	2,9 0,59
Объем стока, км ³ за июнь/за сентябрь Runoff volume, km ³ per June/per September	1,95 0,36	0,125 0,061	0,0077 0,0016
Модуль стока, л/с с км ² в июне/в сентябре Runoff modulus, l/sec. from km ² in June/in September	42,3 7,8	98,6 48,1	77,2 16,2
Общая минерализация воды, мг/дм ³ , июнь/сентябрь TDS, mg/l, June/September	65,7 124,2	20,9 25,8	55,4 65,4
Ионный сток, т/год Ion runoff, t/year	364266	10683	1231
Ионный сток, т/мес., за июнь/за сентябрь Ion runoff, t/month, for June/for September	128113 44432	2605 1568	424 104
Модуль ионного стока, т/ мес. с км ² , за июнь/за сентябрь 2018 г. Ion runoff modulus, t/month from km ² , for June/September 2018	7,4 2,6	5,5 3,3	11,5 2,8
Модуль ионного стока, т/ год с км ² , 2018 г. Ion runoff modulus, t/year, 2018 г.	21,2	22,6	32,8

На основании величин расхода воды [2] в тех притоках озера, на которых есть гидрологические посты, данных о площадях водосборов [12], а также полученных нами аналитических данных были рассчитаны показатели водного и ионного стока в 2018 г. для рек Чулышман, Кокши и Чири (табл. 3).

Согласно расчетам, величины ионного стока малого (р. Чири), среднего (р. Кокши) и крупного (р. Чулышман) притоков озера напрямую зависят от длины реки и площади водосбора и определяются в основном величинами объемов водного стока реки. За один год с водами реки Чулышман в озеро поступает 364 тыс. т основных растворимых солей, из них 219 тыс. т – гидрокарбонатов (60 %) и 77 тыс. т кальция (21 %). Для сравнения, основные притоки Байкала в течение года в сумме приносят в озеро 6 млн т в год растворимых солей [28], из них почти 60 % также приходится на гидрокарбонаты (3,5 млн т) и 14 % – на кальций (0,8 млн т). Среднемноголетний ионный сток бассейна Средней Оби составляет 18–24 млн т/год [29].

Показатели модуля ионного стока – количества растворимого вещества, выносимого в единицу времени с единицы площади водосборного бассейна в различных по величине притоках Телецкого озера, вполне сопоставимы. В малой реке Чири модуль ионного стока в 1,5 раза выше, чем в самом крупном притоке озера р. Чулышман. Летом меньше всего растворимых солей выносится с 1 км² бассейна р. Кокши, зато в период осенней межени модуль ионного стока р. Кокши наибольший (табл. 4). Отметим, что с увеличением уклона реки интенсивность химической денудации увеличивается, однако с увеличением средней высоты водосбора этот показатель снижается, что указывает на относительную устойчивость к размыву горных пород [11], слагающих южное и восточное окаймление озера.

За год с 1 км² бассейнов разных по величине притоков озера Телецкого выносится от 21,2 до 32,8 т растворенных солей. В р. Чулышман минимальный среди сравниваемых рек модуль ионного стока объясняется сложной структурой водосборного бассейна: верховья и среднее течение реки Чулышман (в отличие от р. Чири) заняты не только горно-лесными, но и горно-тундровыми, горно-степными ландшафтами с менее интенсивным, чем в лесных сообществах, биологическим круговоротом. Из 21,2 т растворенных солей, выносимых с 1 км² бассейна р. Чулышман, 12,8 т в год с км² приходится на гидрокарбонаты, 1,4 т с км² составляет вынос хлоридов, 1,6 т с км² водосбора выносится сульфатов, 4,5 т кальция и 0,4 т магния. Для сравнения, притоками р. Печора за год с 1 км² водосборной площади выносятся солей в 1,5...3 раза больше, например, 20,9...24,4 т гидрокарбонатов, 2,3...5,2 т хлоридов, 3,9...6,8 т сульфатов, 4,3...8,2 т кальция и 1,5...2,3 т магния [6].

Химические компоненты в водах притоков Телецкого озера по уменьшению величины ионного стока образуют следующий ряд: $\text{HCO}_3^- >> \text{Ca}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+, \text{K}^+$. Для притоков Байкала этот ряд выглядит немного иначе: $\text{HCO}_3^- >> \text{Ca}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Na}^+$,

$\text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Cl}^-$ [28], в ионный сток рек бассейна Телецкого озера сравнительно больший вклад вносят хлориды и магний.

Заключение

Общее содержание главных ионов в водах притоков Телецкого озера низкое, варьирует в пределах 18–159 мг/л и, как правило, увеличивается во время осенней межени, по сравнению с периодом весенне-летнего половодья.

Уровень общей минерализации в водах рек северной (широтной) части озера (р. Колдор, р. Самыш) с более залесенными водосборами в целом на 25 % выше, чем в водах рек южной части озера (р. Чулышман, р. Кыга), что объясняется вырубками кедровых лесов, приводящими к нарушению почвенного покрова и усилению выноса химических веществ и соединений.

Общее содержание главных ионов в водах западных и восточных притоков меридиональной части озера различается в 2,5–3,5 раза, что является отражением различной геохимической обстановки на водосборах, разных биогеохимических процессов, а также результатом нарастающего антропогенного воздействия на окружающую среду со стороны туристических объектов на западном берегу озера.

Большинство притоков оз. Телецкое несут гидрокарбонатно-кальциевые воды. В ионный состав вод восточных притоков, берущих свое начало на гранитном хребте Корбу, больший вклад вносят Cl^- и SO_4^{2-} , K^+ и Na^+ (до 37 %-экв. $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ в р. Корбу). В водах западных притоков, дренирующих большей частью осадочные отложения, выражено доминирование гидрокарбонатов и кальция.

В водах рек восточных берегов озера с преобладанием в структуре водосбора каменистых примитивных почв с увеличением количества осадков концентрация K^+ снижается в 1,7 раза из-за процессов растворения, что указывает на его поступление в поверхностные воды основном из горных некарбонатных пород. В водах западных рек, дренирующих хорошо сформированные горно-лесные почвы, с увеличением количества осадков и стока концентрация K^+ увеличивается в 1,4–2,7 раза, что указывает на его активное здесь вовлечение в биогеохимический круговорот и поступление в воды этих рек в основном при вымывании из почвенных горизонтов.

Химическая денудация в бассейнах рек разной величины изменяется от 21 до 32 т/год с км², ее интенсивность с увеличением средней высоты водосбора и уменьшением уклона реки снижается, что указывает на относительную устойчивость к размыву горных пород южного и восточного окаймлений Телецкого озера. Наибольший модуль ионного стока установлен в малой реке Чири, а наименьший из сравниваемых рек – в самом крупном притоке озера р. Чулышман, что объясняется более сложной структурой его водосборного бассейна.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН по проекту № 0306-2021-0003 (№ гос. регистрации 1021032424138-9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вернадский В.И. Биосфера и ноосфера. – М.: Айрис-пресс, 2012. – 576 с.
2. Добровольский В.В. Основы биогеохимии. – М.: Высшая школа, 1998. – 413 с.
3. Resolving the double paradox of rapidly mobilized old water with highly variable responses in runoff chemistry / K. Bishop, J. Seibert, S. Köhler, H. Laudon // *Hydrological Processes*. – 2004. – V. 18 – P. 185–189.
4. Impact of soil and groundwater heterogeneity on surface water chemistry in an upland catchment / M.I. Stutter, L.K. Deeks, D. Low, M.F. Billett // *Journal of Hydrology*. – 2006. – V. 318. – P. 103–120.
5. Influence of catchment characteristics and flood type on relationship between streamwater chemistry and streamflow: case study from Carpathian Foothills in Poland / J.P. Siwek, M. Zelazny, W. Chelmiccki // *Water Air and Soil Pollution*. – 2011. – V. 214. – P. 547–563.
6. Изменение интенсивности химической денудации на водосборе реки Печоры в условиях нестационарного климата и хозяйственной деятельности / А.О. Даниленко, О.С. Решетняк, Л.С. Косменко, М.Ю. Кондакова // *Вода и экология: проблемы и решения*. – 2020. – № 4 (84). – С. 38–49.
7. Taboada-Castro M.M., Rodriguez-Blanco M.L., Taboada-Castro M.T. Assessing the influence of catchment land-use patterns on the nutrients and major ions chemistry of drainage water // *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. – 2013. – V. 44. – Iss. 1–4. – P. 422–428.
8. Geochemistry of the dissolved load of the Changjiang Basin Rivers: anthropogenic impacts and chemical weathering / B. Chetelat, C.Q. Liu, Z.Q. Zhao, Q.L. Wang, S.L. Li, J. Li, B.L. Wang // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2008. – V. 72 (17). – P. 4254–4277.
9. Major element chemistry of the Huai River Basin, China / L. Zhang, X.F. Song, J. Xia, R.Q. Yuan, Y.Y. Zhang, X. Liu, D.M. Han // *Applied Geochemistry*. – 2011. – V. 26. – Iss. 3. – P. 293–300.
10. Catchment controls on solute export / A. Musolff, C. Schmidt, B. Selle, J.H. Fleckenstein, // *Advances in water resources*. – 2015. – V. 86. – P. 133–146.
11. Абдуев М.А.О. Химическая денудация на горной территории Азербайджана // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. – 2016. – № 1. – С. 4–16.
12. Селегей В.В., Селегей Т.С. Телецкое озеро / под ред. В.А. Знаменского. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 142 с.
13. Маринин А.М., Самойлова Г.С. Физическая география Горного Алтая. – Барнаул: БГПИ, 1987. – 110 с.
14. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО). URL: <https://gmvo.skniivh.ru/> (дата обращения 20.06.2021).
15. Черных Д.В., Самойлова Г.С. Ландшафты Алтая (Республика Алтай и Алтайский край) Карта М – 1:500000. – Новосибирск: Новосибирская картографическая фабрика, 2011.
16. Новиков Ю.В., Ласточкина К.О., Болдина З.Н. Методы исследования качества воды водоемов / под ред. А.П. Шицковой. – М.: Медицина, 1990. – 397 с.
17. Лакин Г.Ф. Биометрия. – М.: Высшая школа, 1990. – 351 с.
18. Влияние биогеохимической обстановки водосборных бассейнов на микроэлементный состав вод притоков Телецкого озера / А.В. Пузанов, С.В. Бабошкина, С.Я. Двуреченская, Т.А. Рождественская // *Вода и экология: проблемы и решения*. – 2020. – № 3 (83). – С. 70–78.
19. Ефимова Л.Е., Повалишников Е.С., Фролова Н.Л. Гидроэкологические особенности бассейна реки Мульты (Горный Алтай) // *География и природные ресурсы*. – 2011. – № 1. – С. 34–42.
20. Геохимические особенности природных вод бассейна реки Витим (западные районы Патомского нагорья) / Д.А. Новиков, А.А. Максимова, Д.В. Напреев, Ю.Г. Копылова, А.А. Хвашевская // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 8. – С. 7–17.
21. Условия выноса и аккумуляции химических элементов в горно-ледниковом бассейне Актру (Горный Алтай) / О.Г. Савичев, В.А. Домаренко, С.И. Арбузов, А.Я. Пшеничкин, Е.А. Вильгельм // *Разведка и охрана недр*. – 2019. – № 3. – С. 55–62.
22. Долматова Л.А. Особенности гидрохимического режима Телецкого озера в период осеннего охлаждения // *Мир науки, культуры, образования*. – 2011. – № 6 (31). – С. 417–423.
23. Малолетко А.М., Шестакова Т.П. Материалы к гидрохимии бассейна Телецкого озера // *Вопросы географии Сибири*. – Томск: Изд-во ТГУ, 1979. – С. 110–126.
24. Khazheeva Z.I., Tulokhonov A.K., Dashibalova L.T. Seasonal and spatial dynamics of TDS and major ions in the Selenga river // *Water Resources*. – 2007. – V. 34. – № 4. – С. 444–449.
25. Hofmann H., Cartwright I., Morgenstern U. Estimating retention potential of headwater catchment using Tritium time series // *Journal of Hydrology*. – 2018. – V. 561. – P. 557–572.
26. Cartwright I. Concentration vs. streamflow (C-Q) relationships of major ions in south-eastern Australian rivers: sources and fluxes of inorganic ions and nutrients // *Applied Geochemistry*. – 2020. – V. 120. – № 104680. – P. 1–11.
27. Holloway J.M., Dahlgren R.A. Seasonal and event-scale variations in solute chemistry for four Sierra Nevada catchments // *Journal of Hydrology*. – 2001. – V. 250. – P. 106–121.
28. Галазий Г.И. Байкал в вопросах и ответах. – Иркутск: Восточно-Сибирское книжное издательство, 1987. – 167 с.
29. Савичев О.Г. Ионный сток Средней Оби и ее крупных притоков // *Известия Томского политехнического университета*. – 2004. – Т. 307. – № 6. – С. 40–44.

Поступила 02.07.2021 г.

Информация об авторах

Пузанов А.В., доктор биологических наук, профессор, директор Института Водных и экологических проблем СО РАН.

Бабошкина С.В., кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биогеохимии Института Водных и экологических проблем СО РАН.

Рождественская Т.А., кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биогеохимии Института Водных и экологических проблем СО РАН.

Балыкин С.Н., кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биогеохимии Института Водных и экологических проблем СО РАН.

Балыкин Д.Н., кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник лаборатории биогеохимии Института Водных и экологических проблем СО РАН.

Салтыков А.В., научный сотрудник лаборатории биогеохимии Института Водных и экологических проблем СО РАН.

Трошкова И.А., младший научный сотрудник лаборатории биогеохимии Института Водных и экологических проблем СО РАН.

Двуреченская С.Я., кандидат химических наук, ученый секретарь Новосибирского филиала Института Водных и экологических проблем СО РАН.

UDC 556:556.314:550.47

INFLUENCE OF THE BIOGEOCHEMICAL SITUATION OF THE LAKE TELETSKOE CATCHMENT (NORTH-EASTERN ALTAI) ON THE CONTENT OF THE MAJOR IONS AND Fe IN THE TRIBUTARIES WATERS

Alexander V. Puzanov¹,
puzanov@iwep.ru

Svetlana V. Baboshkina¹,
svetlana@iwep.ru, arsenida@rambler.ru

Tamara A. Rozhdestvenskaya¹,
rtamara@iwep.ru

Sergey N. Balykin¹,
balykins@rambler.ru

Dmitry N. Balykin¹,
balykindn@yandex.ru

Alexey V. Saltykov¹,
saltykov@iwep.ru

Irina A. Troshkova¹,
egorka_iren@mail.ru

Serafima Ya. Dvurechenskaya²,
serafima_dv@mail.ru

¹ Institute of Water and Environmental Problems SB RAS,
1, Molodezhnaya street, Barnaul, 656038, Russia.

² Institute of Water and Environmental Problems SB RAS,
2, Morskoy avenue, Novosibirsk, Russia.

The relevance of the research is caused by the necessity to expand and deepen knowledge about the formation and functioning of large freshwater objects, the chemical composition of which is closely related to the peculiarities of biogeochemical processes and soil cover of the catchment, with type of the anthropogenic environmental impact of catchment basins. However, the mechanisms of these interactions in the mountainous territories have not been fully studied yet.

The main aim of the research is to establish the relationship between the content of the major components in the tributaries waters of Lake Teletskoe and the features of their chemical denudation with the biogeochemical situation on the catchments.

Methods. Water samples from the tributaries of Lake Teletskoe were collected in clean polyethylene dishes in the estuary of the rivers, during the spring-summer high water and autumn low water. Determination of the ionic composition of surface waters (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ and K^+) was carried out according to standard methods, with titrimetric or spectrophotometric completion. Na^+ and K^+ in 2018 and 2019 were determined by atomic emission spectrometry on the IRIS Advantage Thermo Jarrell Ash Corp. instrument. (1999). Fe content in waters and water extracts from soils was determined by atomic absorption spectrometry using electrothermal atomization on the SOLAAR M-6 device.

Results. It is established that the waters of the Lake Teletskoe tributaries are characterized by a low total mineralization (TDS), from 18 to 159 mg/L. It is shown that the seasonal dynamics of the major ions is determined by the biogeochemical processes in the catchment. It is revealed that the waters of the eastern and western tributaries, draining different geological and landscape structures, as well as the degree of recreational load of the coast, differ both in content and in the ratio of the major ions. Thus, Cl^- and SO_4^{2-} , K^+ and Na^+ make a greater contribution to the ionic composition of the waters of the eastern tributaries originating on the Korbu granite ridge, whereas in the waters of the western tributaries, draining sedimentary deposits for the most part, bicarbonates and calcium dominate. The influence of biogeochemical conditions of catchment on the content and ratio of iron in water and water extraction of soils is shown. It is revealed that most of the tributaries carry bicarbonate-magnesium-calcium type waters. The indicators of ion runoff of three tributaries of the lake of different sizes are calculated, chemical denudation in their catchment basins is estimated. In one year, 364 thousand tons of soluble salts enter the lake with the waters of the largest tributary – the Chulyshman River. 21 tons of salts are removed from 1 km² of the Chulyshman River catchment (this is less than from the catchments of smaller tributaries), of which 12,8 tons are hydrocarbonates, 1,4 tons are chlorides, 1,6 tons are sulfates, 4,5 tons are calcium, 0,4 tons are magnesium.

Key words:

Lake Teletskoe, tributaries, catchment area, major ions, iron, biogeochemical situation, ion runoff.

The work was carried out within the framework of the state task of the IWEP SB RAS under project No. 0306-2021-0003 (state registration No. 1021032424138-9).

REFERENCES

- Vernadskiy V.I. *Biosfera i noosfera*. [Biosphere and noosphere]. Moscow, Ajris-press Publ., 2012. 576 p.
- Dobrovolskiy V.V. *Osnovy biogeokhimi* [Fundamentals of biogeochemistry]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1998. 413 p.
- Bishop K., Seibert J., Köhler S., Laudon H. Resolving the double paradox of rapidly mobilized old water with highly variable responses in runoff chemistry. *Hydrological Processes*, 2004, vol. 18, pp. 185–189.
- Stutter M.I., Deeks L.K., Low D., Billett M.F. Impact of soil and groundwater heterogeneity on surface water chemistry in an upland catchment. *Journal of Hydrology*, 2006, vol. 318, pp. 103–120.
- Siwek J.P., Zelazny M., Chelmicki W. Influence of catchment characteristics and flood type on relationship between streamwater chemistry and streamflow: case study from Carpathian Foothills in Poland. *Water Air and Soil Pollution*, 2011, vol. 214, pp. 547–563.
- Danilenko A.O., Reshetnyak O.S., Kosmenko L.S., Kondakova M.Yu. Changes in the chemical denudation intensity in the river Pechora catchment under the influence of non-stationary climate and eco-

- nom activities. *Water and ecology*, 2020, vol. 84, no. 4, pp. 38–49. In Rus.
7. Taboada-Castro M.M., Rodriguez-Blanco M.L., Taboada-Castro M.T. Assessing the influence of catchment land-use patterns on the nutrients and major ions chemistry of drainage water. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2013, vol. 44, Iss. 1–4, pp. 422–428.
 8. Chetelat B., Liu C.Q., Zhao Z.Q., Wang Q.L., Li S.L., Li J., Wang B.L. Geochemistry of the dissolved load of the Changjiang Basin Rivers: anthropogenic impacts and chemical weathering. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, vol. 72 (17), pp. 4254–4277.
 9. Zhang L., Song X.F., Xia J., Yuan R.Q., Zhang Y.Y., Liu X., Han D.M. Major element chemistry of the Huai River Basin, China. *Applied Geochemistry*, 2011, vol. 26, Iss. 3, pp. 293–300.
 10. Musolf A., Schmidt C., Selle B., Fleckenstein J.H. Catchment controls on solute export. *Advances in water resources*, 2015, vol. 86, pp. 133–146.
 11. Abduev M.A.O. Chemical denudation on the Azerbaijan mountain territory. *Water sector of Russia: problems, technologies, management*, 2016, no. 1, pp. 4–16. In Rus.
 12. Selegey V.V., Selegey T.S. *Teletskoe ozero* [Teletskoe lake]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1978. 142 p.
 13. Marinin A.M., Samoylova G.S. *Fizicheskaya geografiya Gornogo Altaya* [Physical geography of the Altai Mountains]. Barnaul, BGPI Publ., 1987. 110 p.
 14. *Avtomatizirovannaya informatsionnaya sistema gosudarstvennogo monitoring vodnykh ob'ektov* [Automated information system for state monitoring of water bodies]. Available at: <https://gmvo.skniivh.ru> (accessed 20 June 2021).
 15. Chernyh D.V., Samoylova G.S. *Landshafty Altaya (Respublika Altay i Altayskiy kray) Masshtab 1:500000* [Landscapes of Altay (Republic of Altay and Altay Krai). Scale 1:500000]. Novosibirsk, Novosibirskaya kartograficheskaya fabrika Publ., 2011.
 16. Novikov Yu.V., Lastochkina K.O., Boldina Z.N. *Metody issledovaniya kachestva vody vodoemov* [Methods of water quality research in reservoirs]. Moscow, Meditsina Publ., 1990. 397 p.
 17. Lakin G.F. *Biometriya* [Biometrics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990. 351 p.
 18. Puzanov A.V., Baboshkina S.V., Dvurechenskaya S.Ya., Rozhdestvenskaya T.A. Impact of the biogeochemical situation at catchments on the microelement composition of lake Teletskoye tributaries' waters. *Water and ecology*, 2020, no. 3 (83), pp. 70–78. In Rus.
 19. Efimova L.E., Povalishnikova E.S., Frolova N.L. Hydroecological features of the Multa river basin (Gorny Altai). *Geography and natural resources*, 2011, no. 1, pp. 34–42. In Rus.
 20. Novikov D.A., Maksimova A.A., Napreev D.V., Kopylova Yu.G., Khvachevskaya A.A. Geochemical features of natural waters in the basin of the Vitim river (Western regions of Patom upland). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 11, pp. 7–17. In Rus.
 21. Savichev O.G., Domarenko V.A., Arbutov S.I., Pshenichkin A.Ya., Wilgelm E.A. Ablation and accumulation condition of chemical elements in the mountain-glacial basin Aktru (Mountain Altai). *Prospect and protection of mineral resources*, 2019, no. 3, pp. 55–62. In Rus.
 22. Dolmatova L.A. The peculiarities of hydrochemical regime of lake Teletskoye during its autumn cooling. *World of Science, Culture, Education*, 2011, vol. 6, no. 31, pp. 417–423. In Rus.
 23. Maloletko A.M., Shestakova T.P. *Materialy k gidrokhimii basseyna Teletskogo ozera* [Materials for the hydrochemistry of the Teletskoe Lake basin]. *Voprosy geografii Sibiri* [Questions of the geography of Siberia]. Tomsk, TGU Publ., 1979. pp. 110–126.
 24. Khazheeva Z.I., Tulokhonov A.K., Dashibalova L.T. Seasonal and spatial dynamics of TDS and major ions in the Selenga river. *Water Resources*, 2007, vol. 34, no. 4, pp. 444–449.
 25. Hofmann H., Cartwright I., Morgenstern U. Estimating retention potential of headwater catchment using Tritium time series. *Journal of Hydrology*, 2018, vol. 561, pp. 557–572.
 26. Cartwright I. Concentration vs. streamflow (C-Q) relationships of major ions in south-eastern Australian rivers: sources and fluxes of inorganic ions and nutrients. *Applied Geochemistry*, 2020, vol. 120, no. 104680, pp. 1–11.
 27. Holloway J.M., Dahlgren R.A. Seasonal and event-scale variations in solute chemistry for four Sierra Nevada catchments. *Journal of Hydrology*, 2001, vol. 250, pp. 106–121.
 28. Galaziy G.I. *Baykal v voprosakh i ovetakh* [Baikal in questions and answers]. Irkutsk, Vostochno-Sibirskoe knizhnoe izdatelstvo Publ., 1987. 167 p.
 29. Savichev O.G. Ion runoff of the Middle Ob and its major tributaries. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2004, vol. 307, no. 6, pp. 40–44. In Rus.

Received: 2 July 2021.

Information about the authors

Alexander V. Puzanov, Dr. Sc., professor, director, Institute of Water and Environmental Problems SB RAS.

Svetlana V. Baboshkina, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Water and Environmental Problems SB RAS.

Tamara A. Rozhdestvenskaya, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Water and Environmental Problems SB RAS.

Sergey N. Balykin, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Water and Environmental Problems SB RAS.

Dmitry N. Balykin, Cand. Sc, scientific researcher, Institute of Water and Environmental Problems SB RAS.

Alexey V. Saltykov, researcher, Institute of Water and Environmental Problems SB RAS.

Irina A. Troshkova, junior researcher, Institute of Water and Environmental Problems SB RAS.

Serafima Ya. Dvurechenskaya, Cand. Sc., senior researcher, scientific secretary, Institute of Water and Environmental Problems SB RAS (Novosibirsk Department).

УДК 622.621.6

УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УЧАСТКА МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА С ЛУПИНГОМ

Шестаков Роман Алексеевич¹,
shestakov.r@gubkin.ru

Резанов Константин Сергеевич¹,
rezanov_ks@mail.ru

Матвеева Юлия Сергеевна²,
yulia2@yandex.ru

Ванчугов Иван Михайлович¹,
imvanchugov@yandex.ru

¹ Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина,
Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр., 65, корп. 1.

² АО «МОСГАЗ»,
Россия, 109390, г. Москва, ул. Люблинская, 8.

Актуальность. В современном мире трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов занимает лидирующие позиции и является важным аспектом промышленности не только Российской Федерации, но и всего мира в целом. Однако, несмотря на все его достоинства, существуют и существенные недостатки, в том числе связанные с эксплуатацией трубопроводных систем и точностью определения технологических параметров работы трубопровода во время математического моделирования при эксплуатации и проектировании. В связи с этим разработка новых и повышение точности уже существующих математических моделей трубопроводных систем являются актуальными задачами проектирования и эксплуатации трубопроводных систем, в том числе при проектировании лупингов.

Цель: исследование влияния местных сопротивлений, возникающих в точках подключения лупинга к основной нитке трубопровода, на увеличение пропускной способности участка магистрального нефтепровода между двумя нефтеперекачивающими станциями путем прокладки лупинга.

Методы: математическое моделирование работы участка магистрального трубопровода с учетом местных сопротивлений в точках подключения лупинга и без их учета, а также сравнительный анализ полученных результатов путем построения трехмерных зависимостей.

Результаты. Разработана уточненная математическая модель межстанционного участка трубопровода с лупингом, по которому перекачивается нефть или нефтепродукт. Построен трехмерный график зависимости отклонения результатов расчета длины лупинга стандартной и при уточненной модели от длины и диаметра прокладываемого лупинга. Проведена экономическая оценка прокладки дополнительной длины лупинга, и построены трехмерные зависимости прибыли от диаметра и длины лупинга с учетом перевалочных операций и без них.

Ключевые слова:

Нефть, жидкость, трубопровод, нефтепровод, лупинг, математическая модель, численное моделирование, увеличение пропускной способности, местное сопротивление, гидравлический расчет.

Введение

Трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов является основным видом транспорта не только в России, но и в мире в целом [1–3]. На текущий момент существует ряд основных задач в данной области – обеспечение бесперебойной и безопасной транспортировки нефти и нефтепродуктов по трубопроводам, обеспечение экономической эффективности, а также экологической безопасности при их транспорте, хранении и распределении [4–12].

Современные нефте- и нефтепродуктопроводные системы представляют собой разветвленную сеть трубопроводов, по которым перекачивают нефть от мест добычи к местам переработки и перевалки на другие виды транспорта, а нефтепродукты – от мест переработки нефти к перевалочным комплексам и распределительным нефтебазам с целью обеспечения конечного потребителя нефтепродуктами [1, 13, 14].

В связи с вышесказанным повышение пропускной способности отдельного участка магистрального трубопровода представляет собой сложную и временами капиталоемкую задачу, которая может быть решена в зависимости от условий на рассматриваемом участке трубопровода [13, 14–20]:

- повышением рабочего давления на выходе нефтеперекачивающей станции (НПС) без замены секций труб и с их заменой в случае с недостаточной несущей способностью;
- сооружением лупингов;
- сооружением вставок большего диаметра;
- увеличением числа насосных станций;
- применением противотурбулентных присадок;
- изменением реологических свойств нефти и нефтепродукта;
- комбинированием выше представленных методов.

Каждый из перечисленных методов увеличения пропускной способности участка трубопровода имеет свои плюсы и минусы, а также ряд «тонких» мест и нюансов и определяется согласно технико-экономическому расчету [1, 13]. В то же время может рассматриваться во-

прос оптимизации энергопотребления и минимизации выбросов диоксида углерода [21], но рассмотрим увеличение пропускной способности лупингом (рис. 1). Данный способ является одним из самых капиталоемких, однако применяется довольно часто.

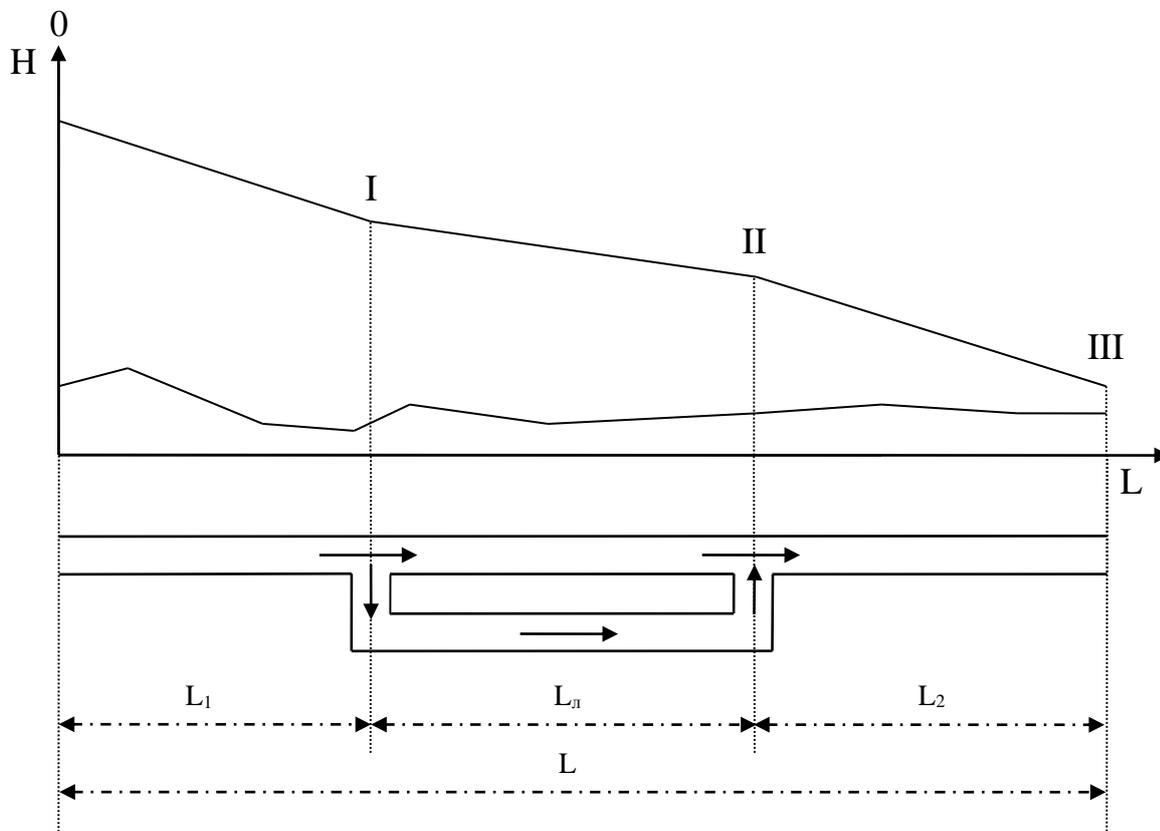


Рис. 1. Схема участка с лупингом и его линия гидравлического уклона
Fig. 1. Schematic representation of the looping section and its hydraulic slope line

Чаще всего лупинг сооружается в конце межстанционного перегона (рис. 1), однако в зависимости от рельефа или иных факторов может присутствовать и в середине участка – между НПС, или даже несколько лупингов могут быть на одном перегоне.

Материалы и методы

Общепринятая математическая модель

В общем виде задача определения требуемой протяженности лупинга при увеличении расхода на заданном участке на величину будет представлять собой систему уравнений:

$$\begin{cases} Q_c = Q_{oc} + \Delta Q; \\ L = L_1 + L_\lambda + L_2; \\ H_{co} = H_c; \\ H_{I-II\lambda} = H_{I-II\pi}. \end{cases} \quad (1)$$

Суммарные потери напора в трубопроводе до сооружения лупинга определяются по формуле [13, 14, 22]:

$$H_{co} = 1,02 \lambda_{co} \frac{L w_{co}^2}{d_n 2g}. \quad (2)$$

Суммарные потери напора в трубопроводе после сооружения лупинга обычно определяются по формуле:

$$H_c = \frac{1,02}{2gd_n} [\lambda_c (L_1 + L_2) w_c^2 + \lambda_\lambda L_\lambda w_\lambda^2]. \quad (3)$$

Для определения длины лупинга, требуемой для увеличения расхода на заданную величину ΔQ , необходимо решить не только систему (1). Для учета потерь напора на местных сопротивлениях их величину принимают равной 2 % от величины потерь напора на трение, и, как показывает практика, это является весьма достоверным и мало влияет на точность гидравлических расчетов стационарных режимов однониточных нефтепроводов [23].

Уточненная математическая модель

Как видно из (3) и из анализа [1, 13–15, 22, 24–27], в расчете определения протяженности лупинга не учитываются местные сопротивления, возникающие в местах подключения лупинга к основной нитке. Поэтому в [28] была разработана система уравнений, описывающая распределение потоков жидкости в трубопроводе с лупингом для различных диаметров

основной нитки, лупинга и перемычек с учетом местных сопротивлений, которые вычисляются согласно [29]. Был проведен расчет минимального отклонения распределения потоков при одинаковых внутренних диаметрах основной нитки и лупинга сортаментом $\text{Ø}720 \times 10$ мм и расходом $3500 \text{ м}^3/\text{ч}$ до лупинга, величина которого составила в основной нитке $+14,4 \text{ м}^3/\text{ч}$, а в лупинге $-14,4 \text{ м}^3/\text{ч}$ [28], однако не была построена математическая модель всего участка трубопровода между нефтеперекачивающими станциями.

Уточненная общая модель всего участка позволит точно определить распределение потоков жидкости между основной ниткой и лупингом при необходимости увеличения пропускной способности трубопровода, что позволит более точно определять параметры режима работы участков трубопроводов с лупингами, а также в ходе проектных расчетов позволит уточнить протяженность требуемого для заданной ΔQ лупинга.

Как сказано ранее, необходимо оценить точность вычисления длины лупинга при увеличении пропускной способности без учета местных сопротивлений в местах присоединения лупинга (система (1) и уравнения (2) и (3)) и с их учетом. Для этого необходимо составить уточненную математическую модель (с учетом влияния местных сопротивлений в точках подключения лупинга к основной нитке) участка трубопровода с лупингом:

$$\left\{ \begin{aligned} Q_c &= Q_{oc} + \Delta Q; \\ Q_c &= Q_6 + Q_n; \\ L &= L_1 + L_n + L_2; \\ 1,02\lambda_{co} \frac{L}{d_n} \frac{w_{co}^2}{2g} &= \\ &= \frac{1,02}{2gd_n} \left[\lambda_c (L_1 + L_2) w_c^2 + \lambda_n L_n w_n^2 \right] + \\ &+ (\zeta_{c.n.I} + \zeta_{c.n.II}) \frac{w_c^2}{2g}; \\ (\zeta_{c.n.I} + \zeta_{c.n.II}) \frac{w_c^2}{2g} + 1,02\lambda_n \frac{L_n}{d_n} \frac{w_n^2}{2g} &= \\ &= (\zeta_{c.6.I} + \zeta_{c.6.II}) \frac{w_c^2}{2g} + \left(\lambda_{6.I} \frac{l_{6.I}}{d_{6.I}} + \zeta_{90^\circ} \right) \frac{w_{6.I}^2}{2g} + \\ &+ \left(\lambda_{6.II} \frac{l_{6.II}}{d_{6.II}} + \zeta_{90^\circ} \right) \frac{w_{6.II}^2}{2g} + 1,02\lambda_n \frac{L_n}{d_n} \frac{w_n^2}{2g}. \end{aligned} \right. \quad (4)$$

Уравнения 1–3 системы (4) аналогичны системе (1), уравнение 4 и 5 системы (4) записаны с учетом местных сопротивлений, которые рассчитываются согласно [29]. Скорости движения в соответствующих участках сложного трубопровода определяются в соответствии с [23, 30].

Численное моделирование

В качестве практического примера возьмем участок магистрального нефтепровода, параметры которого указаны в табл. 1.

Таблица 1. Исходные параметры

Table 1. Initial parameters

Наименование Name of the parameter	Обозначение Designation	Значение Value	Размерность Dimension
Параметры перекачки и транспортируемой среды Parameters of pumping and transported liquid			
Общий объемный расход до лупинга Total flow rate before looping	Q_{co}	5137	$\text{м}^3/\text{ч}$ m^3/h
Увеличение объемного расхода Increase in flow rate	ΔQ	570	
Коэффициент кинематической вязкости Kinematic viscosity coefficient	ν	12	сСт cSt
Конструкционные параметры трубопровода Structural parameters of the pipeline			
Протяженность участка Pipeline length	L	100	км/км
Наружный диаметр External diameter	D_n	1020	мм/мм
Толщина стенки Wall thickness	δ	10	
Абсолютная шероховатость Absolute roughness	Δ	0,03	
Конструкционные параметры предполагаемого лупинга Structural parameters of the proposed looping			
Наружный диаметр External diameter	D_n	720	мм/мм
Толщина стенки Wall thickness	δ	9	
Абсолютная шероховатость Absolute roughness	Δ	0,04	
Длина перемычки [31] Length of connecting pipe [31]	l_6	5	

Для того, чтобы оценить степень влияния местных сопротивлений, была определена длина лупинга согласно системе (1) и уравнениям (2) и (3), необходимого для увеличения пропускной способности на 10 % без учета местных сопротивлений в точках I и II, которая составила 27,337 км. Далее, согласно системе (4), определяем требуемую длину лупинга с учетом местных сопротивлений и неодинакового распределения потоков нефти между лупингом и основной ниткой, которая составила 29,215 км. Неточность составляет 1878 м, или 6,87 %.

Вторым примером было решено просчитать увеличение пропускной способности на 5 % от первоначальной производительности трубопровода. Последовательность расчета аналогична предыдущему абзацу, а вот результаты получились уже интереснее. Общие результаты расчетов представлены в табл. 2.

Как видно из итогов расчета, уточненная модель дает большую протяженность требуемого лупинга для обеспечения заданного увеличения расхода в трубопроводе. Это связано с дополнительными потерями энергии в точках I и II, а также с учетом потерь на трение в перемычках.

По результатам моделирования при различных диаметрах и длинах лупинга была проведена экономическая оценка эффективности реконструкции трубопровода. Для этого сравнивались две математические модели расчета потерь напора в лупинге, которые сопоставлялись при одинаковых планируемых увеличениях расхода, после чего определялась необходимая дополнительная длина лупинга, стоимость строительства которой приводит к убыткам [14].

Таблица 2. Результаты численного расчета

Table 2. Results of the numerical calculation

Наименование Name of the parameter	Обозначение Designation	Значение Value	Размерность Dimension
$Q_c = 1,05 \cdot Q_{ср}$			
Протяженность лупинга без учета местных сопротивлений Looping length without taking into account local resistances	L_{l1}	12694	м/м
Протяженность лупинга с учетом местных сопротивлений Looping length taking into account local resistances	L_{l2}	13626	
Абсолютное уточнение Absolute correction	$L_{l2} - L_{l1}$	932	
Относительное уточнение Comparative correction	$\frac{L_{l2} - L_{l1}}{L_{l1}} \cdot 100$	7,34	%
$Q_c = 1,1 \cdot Q_{ср}$			
Протяженность лупинга без учета местных сопротивлений Looping length without taking into account local resistances	L_{l1}	27337	м/м
Протяженность лупинга с учетом местных сопротивлений Looping length taking into account local resistances	L_{l2}	29215	
Абсолютное уточнение Absolute correction	$L_{l2} - L_{l1}$	1878	
Относительное уточнение Comparative correction	$\frac{L_{l2} - L_{l1}}{L_{l1}} \cdot 100$	6,87	%

При анализе экономической эффективности данные затраты сравнивались с возможной прибылью, получаемой от дополнительной перекачки (разностью в расходах между двумя математическими моделями). При расчете дополнительного дохода использовались

тарифы на выполнение заказа и диспетчеризацию при поставках нефти, перекачку по АО «Черномортранс-нефть» и услуги по наливу на ПК «Шесхарис» [32].

Результатом оценки экономической эффективности служат зависимости дохода от длины и диаметра лупинга (рис. 3, 4) для двух вариантов: с учетом перевалки на ПК «Шесхарис» и без учета.

Прибыль с учетом сдачи в зависимости от диаметра и длины

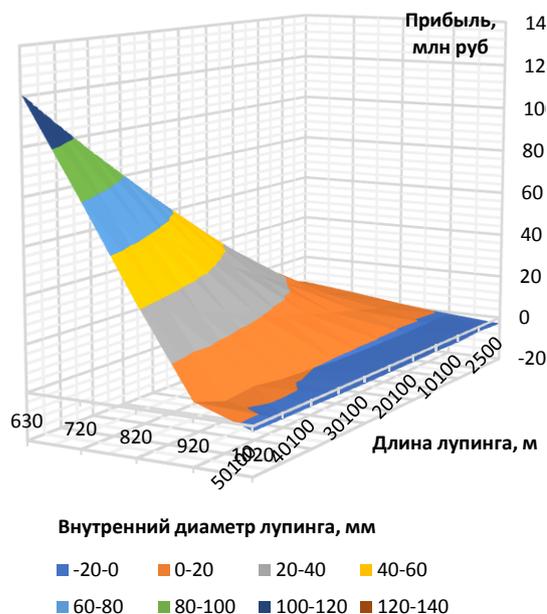


Рис. 3. График зависимости прибыли от внешнего диаметра и длины лупинга с учетом перевалки

Fig. 3. Graph of the profit dependence on the outer diameter and length of the loop, taking into account the filling

Прибыль без учета сдачи в зависимости от диаметра и длины

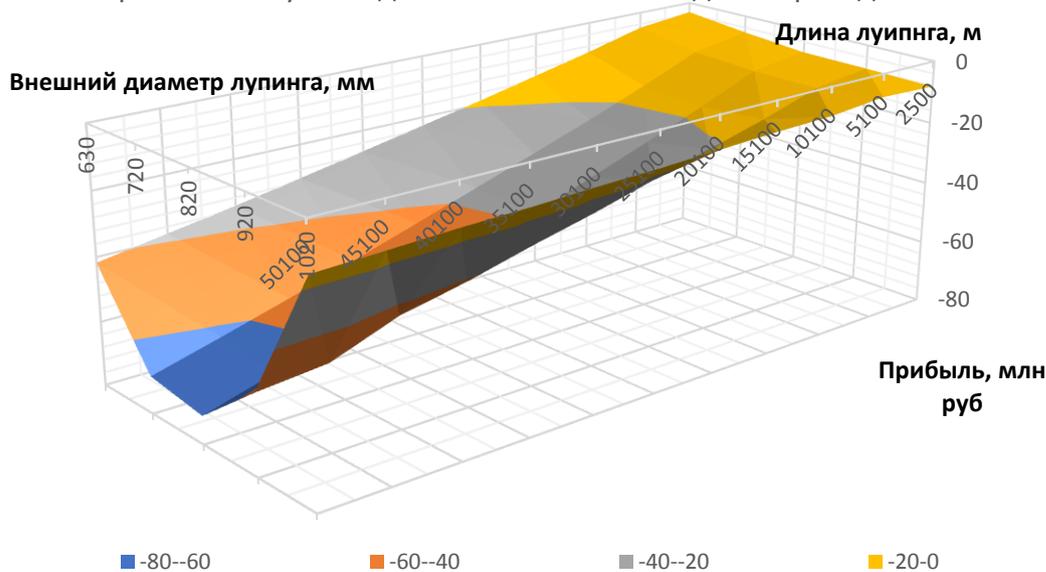


Рис. 4. График зависимости прибыли от внешнего диаметра и длины лупинга без учета перевалки

Fig. 4. Graph of the profit dependence on the outer diameter and length of the loop, without taking into account the filling

На рис. 5 отражена зависимость необходимой дополнительной длины строительства лупинга от его длины и внутреннего диаметра.

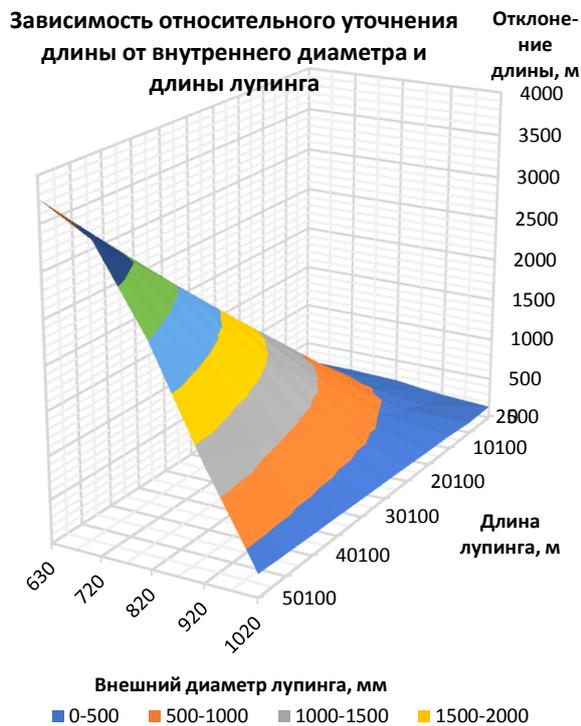


Рис. 5. График зависимости уточненной длины от длины и диаметра лупинга

Fig. 5. Graph of the refined length dependence on the length and diameter of the loop

Оценивая полученные зависимости, стоит отметить, что наименьшая эффективность применения уточненной математической модели проявляется при диаметре лупинга 920 и 1020 мм, так как завихрений в данных случаях будет меньше и потоки разделяются более плавно. Однако для диаметров 630, 720 и 820 мм при длине лупинга не менее 30 км уточненная длина может составлять вплоть до 4 км, что при оценке экономической эффективности с учетом строительства составляет около 130 млн р. Также стоит отметить, что без учета возможной сдачи на терминал положительное значение прибыли не наблюдается ни при каких значениях длины и диаметра лупинга. Оценивая стоимость строительства, стоит выделить такой момент, что по мере роста длины лупинга будет увеличиваться необходимая дополнительная длина, что отчетливо видно на рис. 5.

Заключение

Разработана уточненная математическая модель трубопровода, по которому перекачивается нефть или один сорт нефтепродукта, с учетом местных сопротивлений, возникающий в точках I и II, а также перемычек, соединяющих лупинг с основной ниткой трубопровода. Местные сопротивления в точках I и II приводят к неравномерному распределению потоков жидкости между лупингом и проходным трубопрово-

дом, что влечет за собой ошибку при расчете необходимой длины лупинга для требуемого увеличения расхода.

В ходе численного моделирования была решена задача определения протяженности лупинга, необходимого для увеличения пропускной способности на требуемую величину. В рамках данной задачи было определено, что учет местных сопротивлений привел к увеличению длины лупинга, причем чем больше длина лупинга, тем меньше влияние местных сопротивлений и потерь в перемычке на распределение потоков жидкости в трубопроводе, а следовательно, и на требуемую длину лупинга.

Обозначения и сокращения:

- Q_c – суммарный объемный расход жидкости в трубопроводе с лупингом, $\text{м}^3/\text{с}$;
- ΔQ – требуемое увеличение объемного расхода жидкости в трубопроводе, $\text{м}^3/\text{с}$;
- Q_{co} – суммарный объемный расход жидкости в трубопроводе до сооружения лупинга, $\text{м}^3/\text{с}$;
- Q_b – объемный расход жидкости в боковом ответвлении, $\text{м}^3/\text{с}$;
- Q_n – объемный расход жидкости в основной нитке между точками I и II, $\text{м}^3/\text{с}$;
- H_{co} – суммарные потери напора в трубопроводе до сооружения лупинга, м;
- H_c – суммарные потери напора в трубопроводе после сооружения лупинга, м;
- H_{l-ln} – суммарные потери напора лупинге, м;
- H_{I-II} – суммарные потери напора в основной нитке между точками I и II, м;
- L – протяженность трубопровода, м;
- L_1 – протяженность участка трубопровода перед лупингом, м;
- L_2 – протяженность участка трубопровода после лупинга, м;
- L_n – протяженность лупинга, м;
- $l_{b I}$ – длина перемычки, подключающей лупинг в сечении I, м;
- $l_{b II}$ – длина перемычки, подключающей лупинг в сечении II, м;
- $d_{b I}$ – внутренний диаметр перемычки, подключающей лупинг в сечении I, м;
- $d_{b II}$ – внутренний диаметр перемычки, подключающей лупинг в сечении II, м;
- d_n – внутренний диаметр основной нитки трубопровода, м;
- d_n – внутренний диаметр лупинга, м;
- g – ускорение свободного падения, равное $9,81 \text{ м}/\text{с}^2$;
- w_c – скорость движения жидкости в сборном трубопроводе после сооружения лупинга, $\text{м}/\text{с}$;
- w_{co} – скорость движения жидкости в трубопроводе до сооружения лупинга, $\text{м}/\text{с}$;
- $w_{b I}$ – скорость движения жидкости в боковом ответвлении, подключающей лупинг в сечении I, $\text{м}/\text{с}$;
- $w_{b II}$ – скорость движения жидкости в боковом ответвлении, подключающей лупинг в сечении II, $\text{м}/\text{с}$;

- w_d – скорость движения жидкости в лупинге, м/с;
- w_n – скорость движения жидкости в основной нитке трубопровода между точками I и II, м/с;
- $\zeta_{с.п. I}$ – коэффициент местного сопротивления относительно скорости w_c , возникающего при проходе жидкости через раздающий тройник [28, 29];
- $\zeta_{с.б. I}$ – коэффициент местного сопротивления относительно скорости w_c , возникающего при проходе жидкости через тройник в боковое ответвление [28, 29];
- ζ_{90° – коэффициент местного сопротивления в колене 90° ;
- $\zeta_{с.п. II}$ – коэффициент местного сопротивления относительно скорости w_c , возникающего при проходе жидкости перед собирающим тройником в основной нитке [23, 28];
- $\zeta_{с.б. II}$ – коэффициент местного сопротивления относительно скорости w_c , возникающего при проходе жидкости перед собирающим тройником в боковом ответвлении в сечении II [28, 29];
- $\lambda_{с0}$ – коэффициент гидравлического сопротивления в трубопроводе до сооружения лупинга, определяемый согласно классическим формулам гидравлики [15, 22];
- λ_c – коэффициент гидравлического сопротивления в трубопроводе до точки I и после точки II;
- $\lambda_{б I}$ – коэффициент гидравлического сопротивления в перемычке, подключающей лупинг в сечении I;
- $\lambda_{б II}$ – коэффициент гидравлического сопротивления в перемычке, подключающей лупинг в сечении II;
- λ_n – коэффициент гидравлического сопротивления в основной нитке после подключения лупинга;
- λ_l – коэффициент гидравлического сопротивления в лупинге.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поляков В.А. Методы и нормы технологического проектирования нефтепроводов. – М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2019. – 113 с.
2. Васильев Г.Г., Леонович И.А. Ретроспективный анализ методологии прочностных расчетов магистральных трубопроводов // Газовая промышленность. – 2019. – № 7. – С. 78–86.
3. Vanchugov I.M., Shestakov R.A. Influence of accounting for thermodynamic processes on the processes of mixture formation during sequential pumping of petroleum products // Oil & Gas Science and Technology – Revue d'IFP Energies nouvelles. – 2021. – V. 76. – P. 16. DOI: 10.2516/ogst/2020100.
4. Safety and security of oil and gas pipeline transportation: a systematic analysis of research trends and future needs using WoS / Chao Chen, Changjun Li, Genserik Reniers, Fuqiang Yang // Journal of Cleaner Production. – 2021. – V. 279. – P. 123583.
5. Уланов В.В., Яцкевич Д.А., Филиппов С.А. К вопросу о моделировании гидравлического удара в трубопроводах // Промышленный сервис. – 2015. – № 4. – С. 33–39.
6. Obaseki M., Elijah P.T. Dynamic modeling and prediction of wax deposition thickness in crude oil pipelines // Journal of King Saud University – Engineering Sciences. – 2021. – V. 33. – P. 437–445.
7. Филиппов С.А., Матвеева Ю.С. К вопросу о нормативных методах обнаружения утечек нефти и нефтепродуктов // Сборник тезисов 73-й Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ-2019». – М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2019. – Т. 2. – С. 242–243.
8. Li Bo, Gai Jiannan, Xue Xiangdong. The digital twin of oil and gas pipeline system // IFAC PapersOnLine. – 2020. – № 53-5 – P. 710–714.
9. Поляков В.А., Шестаков Р.А. Влияние геодезических параметров нефтепровода и вставок на режим перекачки при отборе нефти // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина. – 2014. – № 3. – С. 40–47.
10. An investigation of mitigating the safety and security risks allied with oil and gas pipeline projects / L. Kraidi, R. Shah, W. Matipa, F. Borthwick // Journal of Pipeline Science and Engineering. 2021. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667143321000482> (дата обращения: 11.11.2021).
11. Земенкова М.Ю. Методы снижения технологических и экологических рисков при транспорте и хранении углеводородов. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2019. – 397 с.
12. Research on the initial state and safety of pipeline shutdown in crude oil forward and reverse transportation / Gang Zhou, Guang-De Huang, Cheng-Fu Wang, Zhi-Qi Jiang, Shuai Bing, Chang-Lin Li // Case Studies in Thermal Engineering. – 2020. – V. 22. – P. 100733.
13. Поляков В.А., Шестаков Р.А. Системный подход к проектированию трубопроводов. – М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2018. – 98 с.
14. Проектирование и эксплуатация нефтепроводов / М.В. Лурье, Б.Н. Мастобаев, П.А. Ревель-Муроз, А.Е. Сощенко. – М.: ООО ИД «Недра», 2019. – 434 с.
15. РД-23.040.00-КТН-084-18 Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Линейная часть магистрального трубопровода. Нормы проектирования. – М.: ПАО «Транснефть», 2018. – 238 с.
16. Голунов Н.Н., Мерзоев М.Г. Теория и алгоритм расчета квазистационарных режимов перекачки нефти с противотурбулентными присадками // Территория «Нефтегаз». – 2017. – № 12. – С. 72–77.
17. Molecular interactions between heavy crude oil and a flow enhancer in a pipeline for pressure drop reduction / E.J. Suarez-Dominguez, A. Palacio-Perez, J.F. Perez-Sanchez, A. Rodriguez-Valdes, S. Gonzalez-Santana, E. Izquierdo-Kulich // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2021. – V. 627. – P. 127134.
18. Полимерные агенты снижения гидродинамического сопротивления для тяжелой нефти / П.А. Ревель-Муроз, Г.В. Несын, Ф.С. Зверев, А.Ю. Ляпин // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2016. – № 4. – С. 42–47.
19. Sustainable crude oil transportation: design optimization for pipelines considering thermal and hydraulic energy consumption / Bohong Wang, Haoran Zhang, Meng Yuan, Yufei Wang, B.C. Menezes, Zhongjie Li, Yongtu Liang // Chemical Engineering Research and Design. – 2019. – V. 151. – P. 23–39.
20. Челинцев Н.С. Увеличение пропускной способности нефтепродуктопровода противотурбулентной присадкой // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2010. – № 4. – С. 12–14.
21. Kazemzadeh H., Amani H., Kariminezhad H. Evaluation of pipeline networks to predict an increase in crude oil flow rate // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2021. – V. 197. – P. 104374.
22. Лурье М.В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа. – М.: ИЦ РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2012. – 456 с.
23. К вопросу о местных сопротивлениях на магистральных нефте- и нефтепродуктопроводах / Д.Н. Комаров, А.Р. Хасанова, Н.П. Чупракова, Ю.С. Матвеева // Магистральные и промысловые трубопроводы: проектирование, строительство, эксплуатация, ремонт. – М.: ИЦ РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 2017. – С. 67–70.
24. Дидковская А.С. Теоретическое обобщение расчета гидродинамических процессов в трубопроводах для перекачки жидких углеводородов: дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2019. – 226 с.
25. Namam Y.M., Brameller A. Hybrid method for the solution of piping networks // Proc. IEE. – 1971. – V. 113 (11). – P. 1607–1612.

26. Sârbu I., Valea E.S. Analysis of looped water distribution networks using variational formulations // *Metarlugia Int.* – 2011. – V. 16 (1). – P. 48–53.
27. Raoni R., Secchi A.R., Biscari Jr E.C. Novel method for looped pipeline network resolution // *Computers and Chemical Engineering.* – 2017. – 96. – P. 169–182. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2016.10.001.
28. Shestakov R.A. Research of distribution of oil flow in the pipeline with looping // *Journal of Physics: Conference Series.* – 2020. – V. 1679. – № 5. – P. 052035. DOI: 10.1088/1742-6596/1679/5/052035.
29. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
30. Резанов К.С., Уланов В.В. К вопросу о распределении потоков в нефтепроводе с лупингом // *Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности.* – Казань: ООО «Конверт», 2021. – С. 117–119.
31. СП 36.13330.2012 Магистральные трубопроводы. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200103173> (дата обращения: 05.02.2021).
32. Информация о тарифах на услуги ПАО «Транснефть» по транспортировке нефти/нефтепродуктов по магистральным трубопроводам. URL: <https://www.transneft.ru/information/113/2018/1/> (дата обращения: 05.02.2021).

Поступила 02.02.2022 г.

Информация об авторах

Шестаков Р.А., кандидат технических наук, доцент кафедры нефтепродуктообеспечения и газоснабжения РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина.

Резанов К.С., студент кафедры нефтепродуктообеспечения и газоснабжения РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина.

Матвеева Ю.С., заместитель начальника службы эксплуатации газопроводов АО «МОСГАЗ».

Ванчуров И.М., магистрант кафедры нефтепродуктообеспечения и газоснабжения РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина.

UDC 622.621.6

IMPROVED MATHEMATICAL MODEL OF THE MAIN PIPELINE WITH LOOPING

Roman A. Shestakov¹,
shestakov.r@gubkin.ru

Konstantin S. Rezanov¹,
rezanov_ks@mail.ru

Yulia S. Matveeva²,
yulia2@yandex.ru

Ivan M. Vanchugov¹,
imvanchugov@yandex.ru

¹ National University of Oil and Gas «Gubkin University»,
65, bld. 1, Leninsky avenue, Moscow, 119991, Russia.

² JSC «MOSGAZ»,
8, Lublinskaya street, Moscow, 109390, Russia.

The relevance of the research. In the modern world, pipeline transportation of oil and petroleum products occupies a leading position and it is an important aspect of the industry not only of the Russian Federation, but of the whole world. However, despite all its advantages, there are also significant disadvantages, including those related to the operation of pipeline systems and the accuracy of determining the technological parameters of the pipeline during mathematical modeling in operation and design. In this regard, the development of new and improving the accuracy of existing mathematical models of pipeline systems are urgent tasks of designing and operating pipeline systems, including when designing looping.

The main aim of the research is the investigation of the influence of local resistances arising at the points of connection of the looping to the main line of the pipeline on increasing the throughput capacity of the section of the main oil pipeline between two oil pumping stations by laying the looping.

Methods: mathematical modeling of the main pipeline section operation taking into account local resistances at the looping connection points and without taking them into account, as well as a comparative analysis of the results obtained by constructing three-dimensional dependencies.

Results. A refined mathematical model of the inter-station section of the pipeline with looping, through which oil or petroleum products are pumped, has been developed. The authors have constructed a three-dimensional graph of the dependence of the deviation in calculation results of the looping length of the standard and refined models on the length and diameter of the laid looping. An economic assessment of the additional length of the looping was carried out and three-dimensional dependences of profit on the diameter and length of the looping were constructed, taking into account transshipment operations and without them.

Key words:

Oil, liquid, pipeline, oil pipeline, looping, mathematical model, numerical modeling, capacity increase, local resistance, hydraulic calculation.

REFERENCES

1. Polyakov V.A. *Metody i normy tekhnologicheskogo proektirovaniya nefteprovodov* [Methods and norms of technological design of oil pipelines]. Moscow, National University of Oil and Gas «Gubkin University» Publ., 2019. 113 p.
2. Vasiliev G.G., Leonovich I.A. Retrospective analysis of strength calculation methodology for trunk pipelines. *Gas industry*, 2019, no. 7, pp. 78–86. In Rus.
3. Vanchugov I.M., Shestakov R.A. Influence of accounting for thermodynamic processes on the processes of mixture formation during sequential pumping of petroleum products. *Oil & Gas Science and Technology - Revue d'IFP Energies nouvelles*, 2021, vol. 76, pp. 16. In Rus. DOI: 10.2516/ogst/2020100.
4. Chao Chen, Changjun Li, Genserik Reniers, Fuqiang Yang. Safety and security of oil and gas pipeline transportation: A systematic analysis of research trends and future needs using WoS. *Journal of Cleaner Production*, 2021, vol. 279, pp. 123583.
5. Ulanov V.V., Yatskevich D.A., Filippov S.A. *On the issue of modeling hydraulic shock in pipelines. Industrial service*, 2015, no. 4, pp. 33–39. In Rus.
6. Obaseki M., Elijah P.T. Dynamic modeling and prediction of wax deposition thickness in crude oil pipelines. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 2021, vol. 33, pp. 437–445.
7. Filippov S.A., Matveeva Yu.S. K voprosu o normativnykh metodakh obnaruzheniya utechek nefi i nefteproduktov [On the issue of regulatory methods for detecting leaks of oil and petroleum products]. *Sbornik tezisov 73-y Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoj konferencii «Nef' i gaz-2019»* [Collection of abstracts of the 73rd International Youth Scientific Conference]. Moscow, National University of Oil and Gas «Gubkin University» Publ., 2019, vol. 2, pp. 242–243.
8. Li Bo, Gai Jiannan, Xue Xiangdong. The digital twin of oil and gas pipeline system. *IFAC PapersOnLine*, 2020, no. 53-5, pp. 710–714.
9. Polyakov V.A., Shestakov R.A. Effects of terrain topography and branches on pipeline transportation mode in the process of oil offtake. *Proceedings of the Gubkin Russian State University of Oil and Gas*, 2014, no. 3, pp. 40–47. In Rus.
10. Kraidi L., Shah R., Matipa W., Borthwick F. An investigation of mitigating the safety and security risks allied with oil and gas pipeline projects. *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 2021. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667143321000482> (accessed: 11 November 2021).
11. Zemenkova M.Yu. *Metody snizheniya tekhnologicheskikh i ekologicheskikh riskov pri transporte i khranении uglevodorodov* [Methods of reducing technological and environmental risks in the transport and storage of hydrocarbons]. Tyumen, Tyumen Industrial University Publ., 2019. 397 p.

12. Gang Zhou, Guang-De Huang, Cheng-Fu Wang, Zhi-Qi Jiang, Shuai Bing, Chang-Lin Li. Research on the initial state and safety of pipeline shutdown in crude oil forward and reverse transportation. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2020, vol. 22, pp. 100733.
13. Polyakov V.A., Shestakov R.A. *Sistemny podkhod k proektirovaniyu truboprovodov* [A systematic approach to pipeline design]. Moscow, National University of Oil and Gas «Gubkin University» Publ. 2018. 98 p.
14. Lurie M.V., Mastobaev B.N., Revel-Muroz P.A., Soshchenko A.E. *Proektirovanie i ekspluatatsiya nefteprovodov* [Design and operation of oil pipelines]. Moscow, Nedra Publ. House LLC, 2019. 434 p.
15. RD-23.040.00-KTN-084-18 *Magistralny truboprovodny transport nefiti i nefteproduktov. Lineynaya chast magistralnogo truboprovoda* [Design standards RD-23.040.00-KTN-084-18. Main pipeline transport of oil and petroleum products. The linear part of the main pipeline]. Moscow, PJSC «Transneft» Publ., 2018. 238 p.
16. Golunov N.N., Merzhoev M.G. Theory and algorithm of calculation of the quasi-stationary modes of the oil pumping with drag reducing additives. *Oil and Gas Territory*, 2017, no. 12, pp. 72–77. In Rus.
17. Suarez-Dominguez E.J., Palacio-Perez A., Perez-Sanchez J.F., Rodriguez-Valdes A., Gonzalez-Santana S., Izquierdo-Kulich E. Molecular interactions between heavy crude oil and a flow enhancer in a pipeline for pressure drop reduction. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021, vol. 627, pp. 127134.
18. Revel-Muroz P.A., Nesyn G.V., Zverev F.S., Lyapin A.Yu. Polymer-based hydrodynamic resistance reducing agents for heavy. *Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*, 2016, no. 4, pp. 42–47. In Rus.
19. Bohong Wang, Haoran Zhang, Meng Yuan, Yufei Wang, B.C. Menezes, Zhongjie Li, Yongtu Liang. Sustainable crude oil transportation: design optimization for pipelines considering thermal and hydraulic energy consumption. *Chemical Engineering Research and Design*, 2019, vol. 151, pp. 23–39.
20. Chelintsev N.S. Increase in the throughput capacity of the oil product pipeline with an anti-turbulent additive. *Transport and storage of petroleum products and hydrocarbons*, 2010, no. 4, pp. 12–14. In Rus.
21. Kazemzadeh H., Amani H., Kariminezhad H. Evaluation of pipeline networks to predict an increase in crude oil flow rate. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2021, vol. 197, pp. 104374.
22. Lurye M. V. *Matematicheskoe modelirovanie protsessov truboprovodnogo transporta nefiti, nefteproduktov i gaza* [Mathematical modeling of the processes of pipeline transport of oil, petroleum products and gas]. Moscow, National University of Oil and Gas «Gubkin University» Publ., 2012. 456 p.
23. Komarov D.N., Khasanova A.R., Chuprakova N.P., Matveeva Yu.S. K voprosu o mestnykh soprotivleniyakh na magistralnykh nefte- i nefteproduktorovodakh [On the issue of local resistances on the main oil and oil product pipelines]. *Magistralnye i promyslovye truboprovody: proektirovanie, stroitelstvo, ekspluatatsiya, remont* [Main and field pipelines: design, construction, operation, repair]. Moscow, National University of Oil and Gas «Gubkin University» Publ., 2017. pp. 67–70.
24. Didkovskaya A.S. *Teoreticheskoe obobshchenie rascheta gidrodinamicheskikh processov v truboprovodah dlya perekachki zhidkikh uglevodorodov*. Diss. Dokt. nauk [Theoretical generalization of the calculation of hydrodynamic processes in pipelines for pumping liquid hydrocarbons. Dr. Diss.]. Moscow, 2019. 226 p.
25. Hamam Y.M., Brameller A. Hybrid method for the solution of piping networks. *Proc. IEE*, 1971, no. 113, pp. 1607–1612.
26. Sârbu I., Valea E.S. Analysis of looped water distribution networks using variational formulations. *Metarlugia Int*, 2011, no. 16, pp. 48–53.
27. Raoni R., Secchi A.R., Biscari Jr E.C. Novel method for looped pipeline network resolution. *Computers and Chemical Engineering*, 2017, no. 96, pp. 169–182. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2016.10.001.
28. Shestakov R.A. Research of distribution of oil flow in the pipeline with looping. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1679, no. 5, pp. 052035. DOI: 10.1088/1742-6596/1679/5/052035.
29. Idelchik I.E. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam* [Handbook of hydraulic resistances]. Moscow, Mechanical Engineering Publ., 1992. 672 p.
30. Ryazanov K.S., Ulanov V.V. K voprosu o raspredelenii potokov v nefteprovode s lupingom [On the issue of the distribution of flows in an oil pipeline with looping]. *Prioritetnye napravleniya innovatsionnoy deyatel'nosti v promyshlennosti* [Priority directions of innovative activity in industry]. Kazan, Konvert Publ. 2021. pp. 117–119.
31. *SP 36.13330.2012 Magistralnye tryboprovody* [SP 36.13330.2012 Main pipelines]. 2012. State Standard. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200103173> (accessed 5 February 2021).
32. *Informatsiya o tarifakh na usluzhi PAO "Transneft" po transportirovke nefiti/nefteproduktov po magistralnym truboprovodam* [Information on tariffs for the services of PJSC "Transneft" for the transportation of oil/oil products through main pipelines]. 2018. PJSC «Transneft». Available at: <https://www.transneft.ru/information/113/2018/1/> (accessed 5 February 2021).

Received: 2 February 2022.

Information about the authors

Shestakov R.A., Cand. Sc., associate professor, National University of Oil and Gas «Gubkin University».

Rezanov K.S., student, National University of Oil and Gas «Gubkin University».

Matveeva Yu.S., Deputy Head of the Gas Pipeline Operation Service, JSC «MOSGAZ».

Vanchugov I.M., student, National University of Oil and Gas «Gubkin University».

УДК 553.434:550.42

УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ И ИСТОЧНИКИ ФЛЮИДА ЮБИЛЕЙНОГО МЕДНОКОЛЧЕДАННОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЮЖНЫЙ УРАЛ) ПО ДАННЫМ ТЕРМОБАРОГЕОХИМИИ И ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Целуйко Александр Сергеевич¹,
celyukoa@rambler.ru

Анкушева Наталья Николаевна^{1,2},
ankusheva@mail.ru

Садыков Сергей Ахматович¹,
sergei_sadykov@mail.ru

¹ Институт минералогии Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН, Россия, 456317, г. Миасс, тер. Ильменский заповедник.

² Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе, Россия, 456304, г. Миасс, ул. 8 июля, 10.

Актуальность работы связана с проблемой определения PT (P – давление, T – температура) и изотопно-геохимических параметров образования руд и донных сульфидных построек Юбилейного медноколчеданного месторождения, включающих палеогидротермальные трубы, сульфидные диффузоры и биолититы, в сравнении с другими колчеданными месторождениями Южного Урала и современными сульфидными холмами.

Цель: определение условий формирования и изотопно-геохимического состава рудоносных флюидов, сформировавших донные сульфидные постройки Юбилейного месторождения.

Объектом исследования является Юбилейное медноколчеданное месторождение, расположенное в Республике Башкортостан на Южном Урале.

Методы. Содержания примесных компонентов в кальците определены на электронном микроскопе Tescan Vega 3 sbu (Институт минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН). Флюидные включения проанализированы в термокамере TMS-600 (Linkam) с микроскопом Olympus BX-51 (ЮУрГУ, филиал в г. Миассе). Газовые фазы флюидных включений в кварце определены методом рамановской спектроскопии на спектрометре Horiba Lab Ram HR 800 (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск). Изотопный анализ углерода ($\delta^{13}C$ ‰ VPDB) и кислорода ($\delta^{18}O$ ‰ VSMOW) измерен на масс-спектрометре Delta Plus Advantage (Thermo Finnigan), сопряженном с элементным анализатором EA Flash 1112 с интерфейсом ConFlo III (Институт минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН).

Результаты. Гомогенизация флюидных включений в кальците и кварце рудных жил Юбилейного месторождения происходила в интервале 120–225 °С, соленость захваченного флюида составила 3,3...10,2 мас. % NaCl-экв. Отложение прозрачных минералов ($T_{\text{гом}} < 200$ °С) реликтов палеогидротермальных труб, сульфидных диффузоров и кальцитовых прожилков в колломорфных рудах, вероятно, связано с эпигенетическими процессами преобразования колчеданных руд. Флюидные включения в кварце и кальците с $T_{\text{гом}} > 200$ °С могли образоваться во время низкотемпературных стадий первичного колчеданообразования. Изотопный состав $\delta^{13}C$ и $\delta^{18}O$ кальцита, а также расчетные величины $\delta^{18}O_{\text{H}_2\text{O}}$ и $\delta^{13}C_{\text{CO}_2}$ флюида предполагают смешение морской воды и магматического флюида.

Ключевые слова:

Сульфидные палеогидротермальные трубы, флюидные включения, изотопы С и О, колчеданные месторождения, Южный Урал.

Введение

На колчеданных месторождениях в сульфидных рудах и вмещающих породах распространены прожилки и гнезда разнообразных по составу карбонатов (кальцита, арагонита, доломита, магнезита, сидерита) и кварца [1–5 и др.]. Формирование прожилков карбонатов, кварца и барита сопровождало процессы гидротермального рудообразования, диагенетического и эпигенетического преобразования колчеданных руд. Анализ флюидных включений в прозрачных минералах сульфидных руд и окколорудном пространстве позволяет, например, локализовать зоны повышенных температур в колчеданных залежах, выявить роль магматического флюида и установить взаимосвязь температур кристаллизации с текстурно-структурными особенностями руд [1, 4, 6].

Объектами исследования условий рудообразования на медноколчеданном месторождении Юбилей-

ное стали реликты палеогидротермальных труб, сульфидных диффузоров и корок, запечатанные кальцитом, кварцем, баритом или сфалеритом, обнаруженные на месторождении и многих других залежах Урала [7–10]. Интервал температур гомогенизации флюидных включений в прозрачных минералах в целом ниже, чем замеренные температуры флюида на современных сульфидных гидротермальных постройках [8, 11–16]. Однако современные сульфидные трубы, принадлежащие одной гидротермальной системе, могут значительно различаться по температурам минералообразования и солености [7]. Наличие в рудах слабометаморфизованного месторождения Юбилейное запечатанных кальцитом и кварцем сульфидных труб различного минерального состава, а также карбонатсодержащих сульфидных диффузоров и биолититов позволил оценить PT параметры гидротермальных процессов в различных типах донных построек.

По результатам изотопно-геохимических исследований карбонатов были оценены возможные источники воды колчеданообразующего флюида.

Приведенные данные по гомогенизации флюидных включений и изотопному составу углерода и кислорода продолжают серию работ по оценке условий формирования, газового и изотопного состава рудоносных флюидов, сформировавших донные сульфидные постройки Юбилейного месторождения [17–19].

Краткая геологическая характеристика месторождения

Юбилейное медноколчеданное месторождение находится в юго-восточной части республики Башкортостан и приурочено к Западно-Магнитогорской палеовулканической зоне, колчеданоносные комплексы которой принадлежат фронтальной части энсиматической островодужной системы [20]. Рудные залежи месторождения находятся в породах баймакбурибайской свиты (D_{1e_2b-br}), представленной базальтами, бонинитами, андезибонинитами, андезитами и андезидацитами, и перекрыты породами верхнетаналыкского комплекса (D_{2e_2vtn}): базальтами, андезибазальтами, андезитами, дацитами и риолитами (рис. 1) [21].

На месторождении установлено шесть рудных залежей, в статье рассмотрены руды Второй залежи, в которых обнаружены сульфидные палеогидротермальные трубы, биоморфные руды (биолититы), сульфидные диффузоры, корки и плиты [8–10].

Согласно фоновым материалам, кальцит на месторождении тяготеет к медно-цинковым рудам, где образует гнезда, пятнообразные выделения и прожилки в ассоциации с сульфидами, кварцем и хлоритом [22]. Карбонаты также входят в состав сплошных медно-цинково-колчеданных и медноколчеданных руд. Кальцит в ассоциации с тальком, кварцем, сфалеритом и другими сульфидами заполняет осевые каналы палеогидротермальных сульфидных труб [9]. Кальцит входит в состав ажурных карбонатно-пиритовых руд, содержащих оруденелые реликты фауны и часто выполняет полости сульфидизированных биоморфов [23].

Методы исследования

Оптические исследования кальцита и ассоциирующих сульфидных минералов проведены на микроскопе для отраженного и проходящего света Olympus BX51 с использованием цифровой камеры DP12 для фотографирования.

Содержания примесных компонентов в кальците определены с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega 3 sbu с энергодисперсионным анализатором Oxford Instruments X-act (Институт минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, аналитик И.А. Блинов).

Двухфазные флюидные включения в кварце и кальците проанализированы в термокамере TMS-600 с рабочей температурной областью от -196 до $+600$ °С на микроскопе Olympus BX-51 (Южно-Уральский государственный университет, г. Миасс, аналитик Н.Н. Анкушева) с программным пакетом

LinkSystem V-2.39. Погрешность составляет $\pm 0,1$ °С при $-20...+80$ °С и ± 1 °С – за пределами этого интервала. Солевой состав флюида оценен по температурам эвтектик растворов включений [24–26]. Концентрации солей рассчитаны по температурам плавления последних кристаллических фаз во включениях [27]. Исследовано 126 включений в кальците.

Методом рамановской спектроскопии определены газовые фазы во включениях в кварце кварц-пирит-халькопиритовой палеогидротермальной трубы (обр. юб-12-21) (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск, аналитик Н.Н. Анкушева) на спектрометре Horiba Lab Ram HR 800 с полупроводниковым детектором. Возбуждение производилось твердотельным лазером (532 нм) мощностью 50 мВт, для получения удовлетворительного соотношения сигнал/шум производилось 10 накоплений по 10 секунд. Оценка молекулярных соотношений газов без учета паров воды проведена согласно [28]. Исследовано 12 флюидных включений и снято 53 спектра. Процедуры вычитания фона и сглаживания проведены в программе Origin 8.0.

Для изотопных исследований отобраны монофракции кальцита из осевых каналов реликтов палеогидротермальных сульфидных труб, ажурных серноколчеданных руд и кальцитовых прожилков в обломочных медно-цинково-колчеданных рудах. Материал для анализа высверливался алмазным сверлом.

Изотопный анализ углерода ($\delta^{13}C$ ‰ VPDB) проводился на масс-спектрометре Delta Plus Advantage (Thermo Finnigan), сопряженном с элементным анализатором EA Flash 1112 с интерфейсом ConFlo III (Институт минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, аналитик С.А. Садыков). В работе использовались международные стандарты NBS-19 и NBS-123. Воспроизводимость измерений $\delta^{13}C$ составляет $\pm 0,06$ ‰.

Определение изотопного состава кислорода ($\delta^{18}O$ ‰ VSMOW) сделано на масс-спектрометре Delta Plus Advantage (Thermo Finnigan), сопряженном с высокотемпературным конвектором EA/TC с интерфейсом ConFlo III (Институт минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, аналитик С.А. Садыков). Использовались стандарты NBS-18 и NBS-19. Воспроизводимость измерений $\delta^{18}O$ составляет $\pm 0,2$ ‰. Всего выполнено по 24 анализа $\delta^{13}C$ и $\delta^{18}O$, соответственно.

Значения $\delta^{18}O_{H_2O}$ и $\delta^{13}C_{CO_2}$ минералообразующего флюида при заданных температурах рассчитаны по формулам $\Delta = \delta^{18}O - 1000 \ln \alpha^{18}$ и $\Delta = \delta^{13}C - 1000 \ln \alpha^{13}$, соответственно [29, 30].

Результаты исследования

Колчеданные руды Юбилейного месторождения, среди которых диагностированы реликты донных сульфидных построек (палеогидротермальных труб и диффузеров), содержат многочисленные прожилки и гнезда кальцита молочного-белого, светло-серого и темно-серого цветов. В ходе работы акцент был сделан на изучение карбонатного вещества, связанного с сульфидными палеогидротермальными трубами, маркирующими выходы высокотемпературного (до $350-400$ °С) высокоминерализованного флюида на поверхность древнего морского дна. Реликты палеогидротермаль-

ных труб, как и их современные аналоги, характеризуются концентрически-зональным строением, округлой или овальной формой в поперечном сечении и небольшим диаметром (до 3–4 см) одиночных трубок (рис. 1, а). Кальцит сосредоточен в центральном осевом канале, окруженном крустификационными, почковидными и дендритовидными агрегатами халькопирита, сфалерита и пирита.

Гнезда и мелкие прожилки кальцита зафиксированы в ажурных пиритовых агрегатах, вероятно, представляющих собой реликты сульфидных диффузоров, палеогидротермальных плит и корок (рис. 1, б). Струйное или диффузное поступление восстановленных гидротермальных флюидов и их смешение с кислородсодержащей морской водой формирует благо-

приятную среду для развития пригидротермальной фауны, которая часто фиксируется в виде трубчатых оруденелых биоморфов в колломорфных пиритовых рудах [23]. Кальцит в ассоциации с халькопиритом, сфалеритом, зернистым и фрамбоидальным пиритом заполняет внутренние пространства сульфидизированной фауны и часто обнаруживается в сосуществующих серноколчеданных рудах.

В серно-, медно-медно-цинково-колчеданных рудах распространены кальцитовые, тальк-кальцитовые и кварц-кальцитовые прожилки и гнезда (рис. 1, а). В химическом составе кальцита реликтов сульфидных построек и прожилков отмечаются примеси Mn (до 1,12 мас. %) и Fe (до 0,22 мас. %).

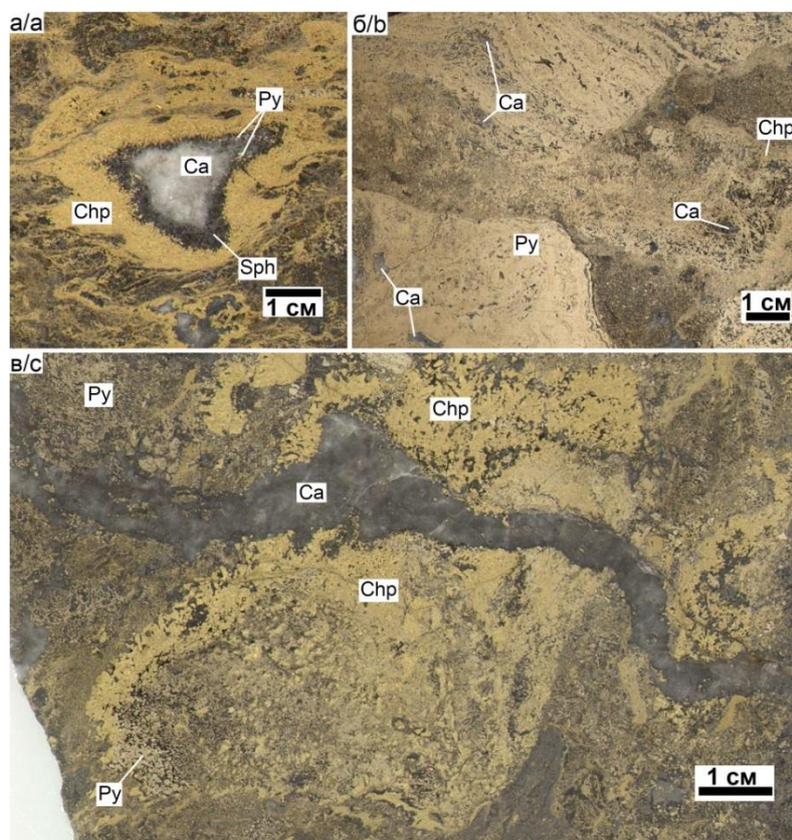


Рис. 1. Реликты сульфидных палеогидротермальных построек с кальцитовой минерализацией: а) кальцитовое заполнение осевого канала в сфалерит-пирит-халькопиритовой палеогидротермальной трубе; б) гнезда кальцита в колломорфных и тонкозернистых пиритовых агрегатах фрагментов сульфидных диффузоров; в) прожилков кальцита, секущих обломочную сульфидную руду. Ca – кальцит, Chp – халькопирит, Py – пирит, Sph – сфалерит. Полированные образцы

Fig. 1. Relics of sulfide paleohydrothermal edifices with calcite mineralization: a) calcite filling of the axial tube in the sphalerite-pyrite-chalcopyrite paleohydrothermal chimneys; b) calcite nests in collomorphic and fine-grained pyrite aggregates fragments of sulfide diffusers; c) calcite veins in clastic sulfide ore. Ca – calcite, Chp – chalcopyrite, Py – pyrite, Sph – sphalerite. Polished samples

Рассматриваемый в статье кальцит был разделен на две генерации: кальцитовые прожилки, гнезда и скопления, запечатывающие каналы и полости в сульфидных постройках (рис. 2, а–г), и прожилки, секущие тонкозернистые и колломорфные сульфидные руды (рис. 2, д, е). К первой генерации отнесен кальцит, цементирующий ажурные, почковидные и дендритовидные агрегаты пирита и халькопирита сульфидных диффузоров, запол-

няющий осевые каналы палеогидротермальных труб и выполняющий сульфидизированные биоморфы. Кальцитовые агрегаты содержат гнезда талька, мелкие включения сульфидных минералов (рис. 2, а, б) или сульфидные агрегаты, характеризующиеся закономерно ориентированным ростом (дендриты, почки, крустификации). Гнезда и прожилки кальцита в сульфидных диффузорах, палеогидротермальных плитах и корках

заполняют полости между почковидными и зернистыми агрегатами пирита и сфалерита и при этом практически не содержат включений рудных минералов (рис. 2, в, г).

Прожилки кальцита второй генерации мощностью до 1,0–1,5 см пересекают сплошные массивные и об-

ломочные тонкозернистые и колломорфные руды различного состава. Характерной особенностью поздних кальцитовых прожилков является присутствие обломков сульфидных руд различной формы, размера, минерального состава и ориентировки.

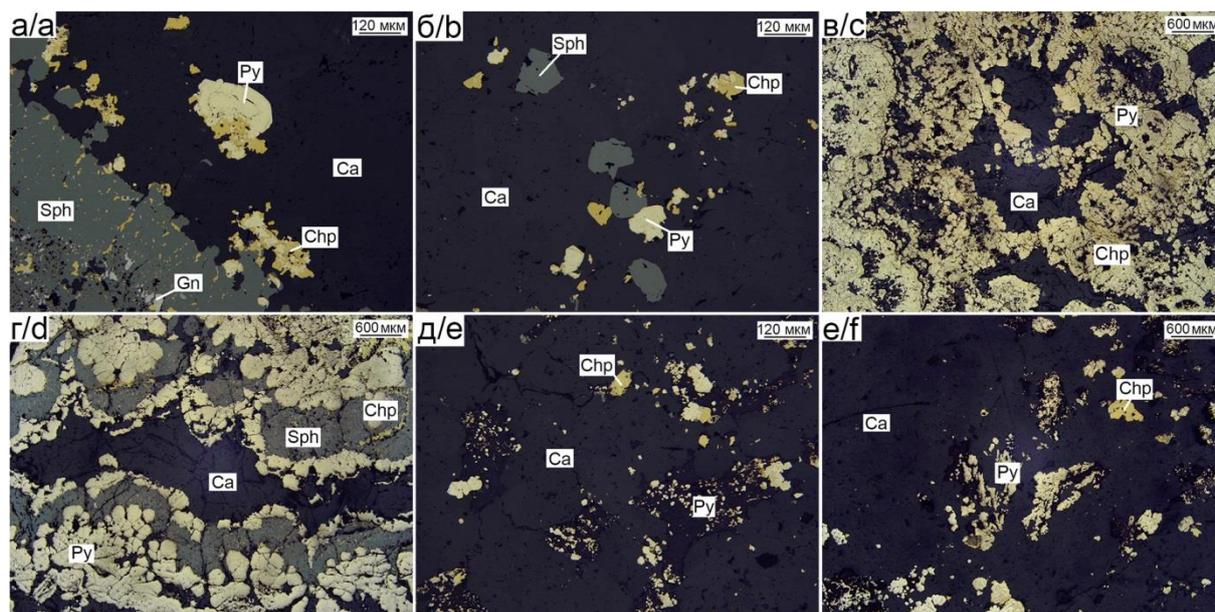


Рис. 2. Минералогические особенности кальцитового заполнения каналов палеогидротермальных труб, гнезд и прожилков в сульфидных рудах: а) агрегаты пирита (Py) и халькопирита (Chp) в кальците (Ca) осевого канала на границе со сфалеритовой (Sph) стенкой канала с мелкими включениями галенита (Gn); б) включения халькопирита (Chp), пирита (Py) и кристаллы сфалерита (Sph) в кальците (Ca) палеогидротермальной трубы; в) гнезда кальцита (Ca) в пирит-халькопиритовом агрегате (Py, Chp) сульфидного диффузера; г) халькопирит-сфалерит-пиритовый почковидный агрегат (Sph, Chp, Py), окаймляющий прожилок кальцита (Ca) в колломорфной руде; д, е) обломки агрегатов пирита (Py) и халькопирита (Chp) в кальцитовом прожилке (Ca). Отраженный свет

Fig. 2. Mineralogical peculiarities of calcite filling of the tubes of paleohydrothermal chimneys and veins in sulfide ores: а) aggregates of pyrite (Py) and chalcopyrite (Chp) in calcite (Ca) of the axial tube near sphalerite crustifications (Sph) with inclusions of galena (Gn); б) inclusions of chalcopyrite (Chp), pyrite (Py) and crystals of sphalerite (Sph) in calcite (Ca) of the paleohydrothermal chimneys; в) calcite (Ca) in the pyrite-chalcopyrite aggregate (Py, Chp) of sulfide diffuser; д) calcite (Ca) veins with chalcopyrite-sphalerite-pyrite reniform aggregate (Sph, Chp, Py) in a colломorphic sulfide ore; е, f) fragments of pyrite (Py) and chalcopyrite (Chp) aggregates in calcite vein (Ca). Reflected light

Для определения РТ параметров образования руд были проведены термобарогеохимические исследования синхронного с сульфидами кальцита сульфидных труб и диффузеров, а также поздних карбонатных прожилков в колчеданных рудах (рис. 3, 4). Ранее по результатам изучения флюидных включений в кварце (обр. юб-12-20-1; юб-12-21; юб-12-3) и кальците (обр. юб-11-12) палеогидротермальных труб установлены температуры ($T_{\text{гом}}$) 100–230 °С [19]. Концентрация солей в водных растворах включений в кварце и кальците изменяется от 1 до 6,4 мас. % NaCl-экв. (преобладают значения 4–6 мас. %). Локальные изменения $T_{\text{гом}}$ флюидных включений в кварце могут быть связаны с особенностями зональности сульфидной трубы: на контакте с сульфидными агрегатами кварц-1 является более высокотемпературным ($T_{\text{гом}}=200\text{--}230$ °С) по сравнению с кварцем-2 ($T_{\text{гом}}=120\text{--}140$ °С), заполняющим центральную часть осевого канала и не содержащим включения сульфидов [19].

Флюидные включения в кальците осевых каналов двух кальцит-сфалерит-пирит-халькопиритовых палеогидротермальных труб (обр. юб-12-115 и юб-12-99-4) размером 10–15 мкм имеют остроугольную изометричную форму, расположены обособленно или малочисленными группами по 2–3 включения (рис. 3). По фазовому составу включения двухфазные (VL) объем газовой вакуоли составляет 15 % их объема. Температуры эвтектики ($T_{\text{эвт}}$) включений в кальците труб отвечают солевым системам NaCl-H₂O и NaCl-KCl-H₂O (табл. 1). Температуры гомогенизации кальцита первой из исследованных сульфидных труб (обр. юб-12-115) составляют 139–180 °С (мода 160–180 °С). Температуры плавления последнего кристалла льда ($T_{\text{пнк}}$) (–2,4...–5,2 °С) указывают на соленость 4–8,1 мас. % NaCl-экв. Кальцитовые агрегаты второй палеогидротермальной трубы (обр. юб-12-99-4) характеризуются $T_{\text{гом}}$ от 120 до 148 °С (мода 135–140 °С). Концентрация солей составляет 3,3–6,3 мас. % NaCl-экв. ($T_{\text{пнк}}$ – 2...–3,9 °С).

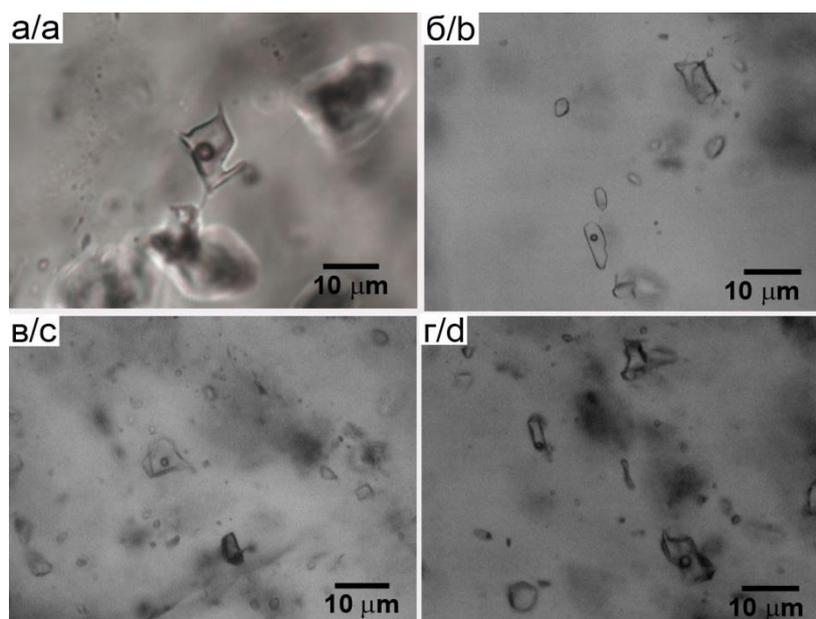


Рис. 3. Флюидные включения в кварце (а) и кальците (б–г) сульфидных руд Юбилейного месторождения
Fig. 3. Fluid inclusions in quartz (a) and calcite (b–d) of sulfide ores from Yubileynoe VMS deposit

Таблица 1. Результаты термобарогеохимических исследований кальцита и кварца сульфидных руд Юбилейного месторождения

Table 1. Fluid inclusion data of calcite and quartz from sulfide ores of Yubileynoe VMS deposit

№ обр. No.	Генерация флюидных включений Fluid inclusion generation	Фазовый состав Phase composition	$T_{гом}/T_{п}$	$T_{эвт}/T_{eut.}$	$T_{пл.льда}/T_{f.m.t.}$	С, мас. % NaCl-экв. С, wt. % NaCl-eq.
			°C			
Кальцит из осевых каналов палеогидротермальных сульфидных труб Calcite from axial channels of paleohydrothermal sulfide chimneys						
Юб-12-115 Yb-12-115	П, ПВ P, PS	VL	147–180	–21...–23	–2,4...–5,2	4–8,1
Юб-12-99-4 Yb-12-99-4			120–148		–2...–3,9	3,3–6,3
Юб-11-12 [19] Yb-11-12 [19]			180–220		–2,8...–4,7	3,7–6,7
Кальцит сульфидных диффузоров Calcite from sulfide diffusers						
Юб-12-18 Yb-12-18	П, ПВ P, PS	VL	150–200	–20...–23	–2,7...–4,0	4,4–6,4
Юб-12-61 Yb-12-61			167–208		–4,2...–6,8	4,4–10,2
Кальцит из прожилков колломорфных пиритовых руд Calcite from veinlets of collomorphic pyrite ores						
Юб-12-32 Yb-12-32	П, ПВ P, PS	VL	140–195	–21...–24	–3,3...–5,1	5,4–8,0
Кварц из осевых каналов палеогидротермальных сульфидных труб [20] Quartz from axial channels of paleohydrothermal sulfide chimneys						
Юб-12-20-1 Yb-12-20-1	П, ПВ P, PS	VL	200–230	–21...–22	–2,2...–4	3,7–6,4
Юб-12-35 (кварц-1) Yb-12-35 (quartz-1)			120–160		–2,7...–4,2	4,4–6,7
Юб-12-21 (кварц-2) Yb-12-21 (quartz-2)	ПВ, В P, PS		100–190	–21...–31	–0,5...–8	1,4–11

Примечание. Включения: П – первичные, ПВ – псевдовторичные, В – вторичные; VL – двухфазные газовой-жидкие. $T_{гом}$ – температура гомогенизации, $T_{эвт}$ – температура эвтектики, $T_{пл.льда}$ – температура плавления последнего кристалла льда; С – солёность.

Note. Inclusions: П – primary, ПВ – pseudosecondary, В – secondary; VL – two-phased (gas-liquid). $T_{гом}$ – homogenization temperature, $T_{эвт}$ – eutectic temperature, $T_{пл.льда}$ – final melting temperature; С – salinity.

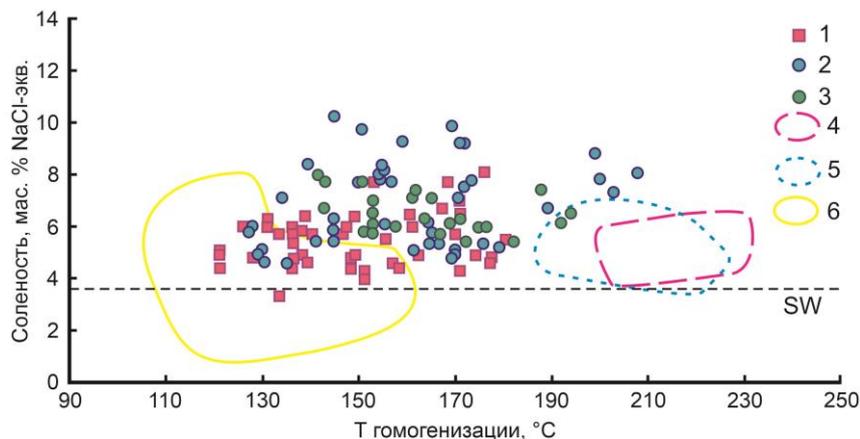


Рис. 4. Результаты исследований флюидных включений в кальците и кварце сульфидных руд Юбилейного месторождения: 1 – кальцит палеогидротермальных сульфидных труб (юб-12-99, юб-12-115); 2 – кальцит сульфидных диффузоров; 3 – прожилки кальцита в колломорфных пиритовых рудах. Флюидные включения в ранее изученных палеогидротермальных сульфидных трубах: 4 – кальцит; 5 – кварц-1; 6 – кварц-2 [19]. SW – соленость морской воды при 25 °C

Fig. 4. Fluid inclusions data of calcite and quartz from sulfide ores of Yubileynoe VMS deposit: 1 – calcite from paleohydrothermal sulfide chimneys (юб-12-99, юб-12-115); 2 – calcite of sulfide diffusers; 3 – calcite veins in collomorphic massive sulfide ores. Previous fluid inclusions data of paleohydrothermal sulfide chimneys: 4 – calcite; 5 – quartz-1; 6 – quartz-2 [19]. SW – salinity of seawater at 25 °C

Для флюидных включений в кальците сульфидных диффузоров (обр. юб-12-18 и юб-12-61) $T_{эвт}$ составили $-21 \dots -23$ °C, что также свидетельствует о Na-K хлоридном составе флюида. Температуры плавления последнего кристалла льда варьируют в диапазоне $-2,7 \dots -6,8$ °C, и соответствуют концентрациям флюида 4,4–10,2 мас. % NaCl-экв. Температуры гомогенизации в жидкую фазу варьируют от 122 до 208 °C (мода 140–180 °C).

В прожилках кальцита колломорфных пиритовых руд (обр. юб-12-32) температуры эвтектики растворов флюидных включений $-21 \dots -24$ °C указывают на Na-K-хлоридный состав флюида. Концентрации солей, оцененные по температурам плавления льда ($-3,3 \dots -5,1$ °C), составили 5,4–8 мас. % NaCl-экв. Гомогенизация включений в жидкую фазу происходила при 141–194 °C (моды 140–145; 150–155; 160–175 °C).

По результатам рамановской спектроскопии флюидные включения в кварце палеогидротермальных труб заполнены преимущественно CH_4 (2917 см^{-1}) и N_2 (2331 см^{-1}). Относительные концентрации N_2 варьируют от 0 до 21,3 мол. %, CH_4 – от 78,7 до 100 мол. %. В некоторых флюидных включениях N_2 преобладает над CH_4 (до 62–82 и 18–38 мол. %, соответственно).

Значения $\delta^{13}C$ и $\delta^{18}O$ в кальците, выполняющем осевые каналы палеогидротермальных сульфидных труб, варьируют от $-3,71$ до $0,72$ ‰ и от $8,82$ до $21,31$ ‰, соответственно (табл. 2, рис. 5). Величины $\delta^{13}C$ в кальците сульфидных диффузоров составляют от $-3,57$ до $0,67$ ‰, а $\delta^{18}O$ – от $7,4$ до $19,84$ ‰; для кальцита прожилков в колломорфных пиритовых рудах $-1,22 \dots 0,27$ ‰ $\delta^{13}C$ и $15,39 \dots 15,87$ ‰ $\delta^{18}O$. Дополнительные изотопно-геохимические данные, полученные для кальцита сульфидных биоморфоз, обладают значениями $\delta^{13}C$ ($-1,41 \dots -0,17$ ‰) и $\delta^{18}O$ ($11,23 \dots 13,76$ ‰)

Таблица 2. Значения $\delta^{13}C$ и $\delta^{18}O$ в кальците и равновесном с ним флюиде сульфидных построек и руд Юбилейного месторождения

Table 2. Values of $\delta^{13}C$ and $\delta^{18}O$ in calcite and equilibrium fluid of sulfide edifices and ores of Yubileynoe deposit

№ образца Sample no.	$\delta^{13}C$ ‰, VPDB	$\delta^{18}O$ ‰, VSMOW	$\delta^{13}C_{CO_2}$ ‰, VPDB	$\delta^{18}O_{H_2O}$ ‰, VSMOW
Палеогидротермальные сульфидные трубы Paleohydrothermal sulfide chimneys				
Юб-12-3х-1	0,65	21,31	–	–
Юб-12-7-2	-0,37	17,3	–	–
Юб-12-15-1	-0,24	19,07	–	–
Юб-11-63	-3,71	8,82	–	–
Юб-12-64	-0,09	18,82	–	–
Юб-12-76	0,46	15,83	–	–
Юб-12-94	-1,0	16,12	–	–
Юб-12-97	-1,41	12,66	–	–
Юб-12-99	0,94	12,45	-2,6	2,82
Юб-12-105-1	-0,21	13,69	–	–
Юб-12-105-2	0,72	21,61	–	–
Юб-12-114	0,18	15,97	–	–
Юб-12-115	-0,22	19,33	-0,62	8,33
Сульфидные диффузоры (ажурные серноколчеданные руды) Sulfide diffusers (reniform pyrite ores)				
Юб-16-2	-1,89	7,4	–	–
Юб-12-3х-2	0,23	19,84	–	–
Юб-11-11	-0,96	19,81	–	–
Юб-12-18	-3,57	13,25	3,17	2,25
Юб-11-61	-0,95	12,53	-0,55	3,23
Юб-11-61-1	0,67	10,73	1,07	1,43
Кальцит сульфидных биоморфоз Calcite of sulfide biomorphoses				
Юб-11-23	-0,17	13,76	–	–
Юб-11-25	-1,41	11,23	–	–
Юб-11-25-1	-0,92	13,39	–	–
Прожилки кальцита в колломорфных пиритовых рудах Calcite veins in collomorphic pyrite ores				
Юб-11-32	0,27	15,87	0,27	5,67
Юб-11-32-1	-1,22	15,39	-1,22	5,19

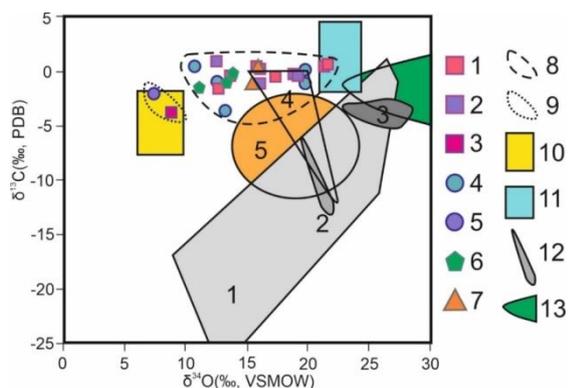


Рис. 5. Значения $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ кальцита реликтов сульфидных труб, диффузеров, биоморфоз и колломорфных руд Юбилейного месторождения: 1–3 – палеогидротермальные сульфидные трубы; 1 – кальцит-пирит-халькопиритовые, 2 – кальцит-сфалерит-пирит-халькопиритовые, 3 – тальк-кальцит-халькопирит-пирит-сфалеритовые; 4, 5 – сульфидные диффузоры: 4 – пиритовые и халькопирит-пиритовые; 5 – пирит-сфалеритовые; 6 – сульфидные биоморфозы; 7 – прожилки кальцита в колломорфных пиритовых рудах; 8 – кальцит сульфидных труб и диффузеров в ассоциации с пиритом и халькопиритом; 9 – кальцит сульфидных труб и диффузеров в ассоциации со сфалеритом; 10 – магматический флюид [31]; 11 – морские известняки [32–34]; 12, 13 – поля изотопного состава карбонатов: 12 – колчеданных месторождений Урала*; 13 – современных океанических базальтов [34–36]. *Колчеданные месторождения: 1 – Узельгинское; 2 – Сафьяновское; 3 – Александринское; 4 – Талганское; 5 – Иберийского пояса [32, 36–39]

Fig. 5. Values of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of calcite from sulfide chimneys relics, diffusers, biomorphoses and collomorphic ores of Yubileynoe deposit: 1–3 – paleohydrothermal sulfide chimneys: 1 – calcite-pyrite-chalcopyrite, 2 – calcite-sphalerite-pyrite-chalcopyrite, 3 – talc-calcite-chalcopyrite-pyrite-sphalerite; 4, 5 – sulfide diffusers: 4 – pyrite and chalcopyrite-pyrite; 5 – pyrite-sphalerite; 6 – sulfide biomorphoses; 7 – calcite veins in collomorphic pyrite ores; 8 – calcite in sulfide chimneys and diffusers associated with pyrite and chalcopyrite; 9 – calcite of sulfide chimneys and diffusers associated with sphalerite; 10 – magmatic fluid [31]; 11 – marine limestones [32–34]; 12, 13 – fields of isotopic composition of carbonates: 12 – VMS deposits of the Urals*; 13 – modern oceanic basalts [38–40]. *VMS deposits: 1 – Uzelga; 2 – Safyanovka; 3 – Alexandrinskoe; 4 – Talgan; 5 – Iberian belt [32, 36–39]

Значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ флюида сульфидных труб в равновесии с кальцитом составляют $-2,6 \dots -0,6$ ‰ при $148\text{--}180$ °C (рис. 6). Величины $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ ($-0,5 \dots 3,1$ ‰) в кальците сульфидных диффузеров рассчитаны для $179\text{--}208$ °C. Значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ ($-1,2 \dots 0,2$ ‰) флюида кальцитовых прожилков в колломорфных пиритовых рудах подсчитаны для 193 °C. Рассчитанные изотопные данные $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ флюида попали в интервалы изотопных соотношений углерода морских карбонатов ($-2,0 \dots 6,0$ ‰ [40]) и морской воды ($-5 \dots 4$ ‰ [41, 42]).

Расчетные величины $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ флюида для 148 и 180 °C сульфидных труб варьируют в пределах $2,82 \dots 8,53$ ‰ (рис. 6). Значения $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ флюида сульфидных диффузеров при $179\text{--}208$ °C составили $1,43 \dots 3,23$ ‰. Изотопный состав воды флюида прожилков кальцита при 193 °C равен $5,19 \dots 5,67$ ‰. Большая часть рассчитанных величин $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ попали в интервал значений, характерных для метеорной воды ($-40 \dots 5,5$ ‰) [43]. Единичные пробы кальцита сульфидных труб и прожилков в колломорфных рудах соответствуют величинам $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ магматической воды [43].

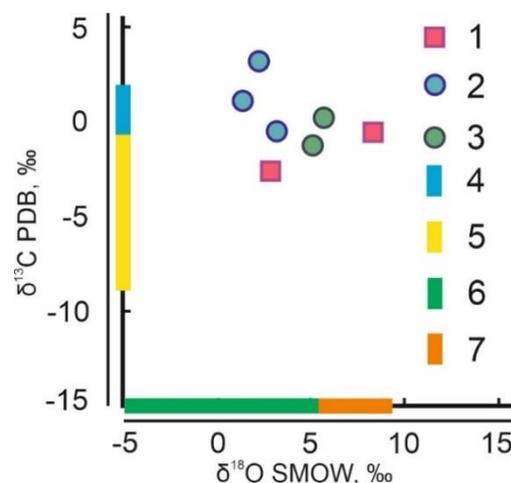


Рис. 6. Значения $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ флюида, отложившего кальцит сульфидных руд Юбилейного месторождения: 1 – палеогидротермальные сульфидные трубы; 2 – сульфидные диффузоры; 3 – прожилки кальцита колломорфных руд; изотопные составы: 4 – углерода морских известняков; 5 – углерода магматического или глубинного корового флюида; 6 – кислорода метеорной воды; 7 – кислорода магматической воды [43–46]

Fig. 6. Values of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of calcite-forming fluid of sulfide ores of Yubileynoe VMS deposit: 1 – paleohydrothermal sulfide chimneys; 2 – sulfide diffusers; 3 – calcite veins in collomorphic ores; isotopic compositions: 4 – carbon of marine limestone; 5 – carbon of magmatic or crustal fluid; 6 – oxygen of meteoric water; 7 – oxygen of magmatic water [43–46]

Обсуждение результатов

По результатам термобарогеохимических исследований гомогенизация флюидных включений в кальците реликтов донных палеогидротермальных сульфидных построек (сульфидные трубы, диффузеры и биоморфозы) происходила в температурном интервале от 120 до 210 °C. Моды значений $T_{\text{гом}}$ включений в кальците: палеогидротермальных труб – $135\text{--}140$ и $160\text{--}180$ °C; сульфидных диффузеров – $140\text{--}160$ °C. Флюидные включения в кальците прожилков колломорфных руд гомогенизировались при $140\text{--}190$ °C. Температуры гомогенизации оказались ниже, чем полученные ранее $T_{\text{гом}}$ для кальцита ($200\text{--}220$ °C) и кварца из осевых каналов ($215\text{--}225$ °C) палеогидротермальных труб, и сопоставимы с данными для позднего кварца-2 ($120\text{--}140$ °C) (табл. 1) [19]. Температуры гомогенизации флюидных вклю-

чений в кальцит-сфалерит-пирит-халькопиритовых трубах согласуются с температурами образования ассоциирующего с кальцитом сфалерита (149–243 °С), полученными с помощью эмпирического Ga-Ge геотермометра GGIMFis [47].

Большая часть полученных $T_{\text{гом}}$ ниже непосредственно измеренных температур флюидов на современных гидротермальных источниках дна океана (260–380 °С) и данных гомогенизации флюидных включений в минералах современных построек в задуговых бассейнах (150–385 °С) [48]. Температуры гомогенизации флюидных включений в кальците палеогидротермальных труб, сульфидных диффузеров и прожилков в колломорфных пиритовых рудах попадают в интервал, характерный для тонкозернистых и колломорфных руд (130–215 °С) колчеданных месторождений Верхнеуральского, Учалинского и Александринского рудных районов [1, 4, 6]. Отмечается, что в рудах колчеданных месторождений Южного Урала температуры гомогенизации флюидных включений в нерудных минералах не связаны с минеральным составом, а зависят от текстурно-структурных особенностей руд, обусловленных диагенетическими и эпигенетическими преобразованиями [1, 4]. Гомогенизация флюидных включений в сфалерите, кварце, барите и кальците, запечатывающих палеогидротермальные трубы на Яман-Касинском и Александринском месторождениях, происходила при температурах от 110 до 250 °С, с преобладанием значений 150–180 °С [7, 49, 50]. Сопоставимые температуры гомогенизации включений в прозрачных минералах реликтов палеогидротермальных труб (135–140; 160–180 °С), сульфидных диффузеров (140–160 °С) и кальцитовых прожилков в колломорфных колчеданных рудах (140–190 °С.) на Юбилейном и других колчеданных месторождениях Южного Урала могут быть объяснены схожими условиями эпигенетических процессов и, вероятно, завершают или следуют за процессами колчеданоаккумуляции. При этом участие в сульфидонакоплении низкотемпературных растворов (≤ 170 °С), наравне с высокотемпературными (до 355 °С), описано для гидротермальных полей Ашадзе и Логачев [13]. Исходя из этого, можно предположить, что температуры, определенные для кварца (215–225 °С) и кальцита осевых каналов труб (200–220 °С) в сочетании с включениями ориентированных агрегатов сульфидов в них, могут быть свидетельством образования этих нерудных минералов во время относительно низкотемпературных стадий первичного колчеданообразования.

Концентрация солей во флюидных включениях в кальците составляет 3,3–10,2 мас. % NaCl-экв. с пиком 4–7 мас. % NaCl-экв., при отсутствии разбавленных флюидов (< 3 мас. %) во включениях в низкотемпературном позднем кварце. Аналогичная соленость (4–6 мас. % NaCl-экв.) сообщается для многих современных сульфидных гидротермальных построек [51–53]. Возрастание солености может быть связано с взаимодействием флюида с породами реакционной зоны, конвекции нагретых вод и/или его вскипанием [29, 54, 55]. Другой причиной повышения солености

флюида могло стать участие высококонцентрированного магматического флюида [56]. Одновременное присутствие однофазных газовых и жидкостных, двухфазных газовой-жидкой включений с различной концентрацией солей может указывать на возможную фазовую сепарацию флюида [19].

По данным рамановской спектроскопии основными летучими компонентами флюида являются H_2O , CH_4 и N_2 . Концентрации метана фиксируются во флюидах и гидротермальных плюмах современных сульфидных полей, связанных с ультраосновными породами и характерны для труб «черных курильщиц» Срединно-Атлантического хребта [57]. Однако в то же время присутствие CH_4 может быть связано с восстановлением CO_2 [58].

Примесь марганца (до 1,12 мас. %) в кальците палеогидротермальных труб может быть связана с особенностями состава колчеданообразующих флюидов и приурочена ко времени отложения рудных ассоциаций [2, 59].

Изученный кальцит характеризуется широкими вариациями изотопного состава $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$, что может указывать на смешанную природу минералообразующего флюида (рис. 5). Кальцит сульфидных труб и диффузеров в ассоциации с пиритом и халькопиритом имеет более легкий изотопный состав кислорода (10,71...21,61 ‰) и углерода (–3,71...–0,72 ‰) по сравнению с морскими известняками. В то же время кальцит, связанный с существенно сфалеритовыми реликтами сульфидных труб и диффузеров, обладает наиболее легким изотопным составом $\delta^{18}\text{O}$ (7,4...8,82 ‰) и попадает в область значений магматического флюида. Облегчение изотопного состава $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{13}\text{C}$ существенно сфалеритовых труб и диффузеров может быть связано с кипением флюида, при котором тяжелые изотопы углерода и кислорода удалялись, однако такое фракционирование может изменить значения $\delta^{13}\text{C}$ не более чем на 1 ‰ [29, 31, 60]. Расчетные величины $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ и $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ флюида также свидетельствуют о смешанном магматогеогенно-метеорном происхождении флюида (рис. 5).

По сравнению с другими колчеданными месторождениями Южного Урала изученный кальцит Юбилейного месторождения характеризуется более легким изотопным составом углерода и кислорода (рис. 5). Разброс значений $\delta^{18}\text{O}$ в прожилках и гнездах кальцита руд Сафьяновского (19,8...21,2 ‰) и Александринского (22,9...28,2 ‰) месторождений меньше, чем на Юбилейном (7,4...21,31 ‰) [32]. Кальцит Узельгинского и Талганского колчеданных месторождений на Южном Урале и объектов Иберийского пиритового пояса характеризуется более легким $\delta^{13}\text{C}$ по сравнению с исследованными образцами Юбилейного месторождения [32, 36–39]. Относительно легкий изотопный состав $\delta^{13}\text{C}$ колчеданных месторождений и современных гидротермальных полей (–4...–7 ‰) интерпретируется как свидетельство глубинного источника углерода [61].

Полученные данные указывают на то, что основным источником углерода кальцита являлся бикарбо-

нат морской воды, который смешан с магматическим флюидом, обусловившим пониженные значения $\delta^{13}\text{C}$. Смешанное ювенильно-морское происхождение гидротермальных флюидов предполагается и для других колчеданных объектов Урала [32]. Изотопный состав кислорода кальцита может резко изменяться в одном образце и близких минеральных ассоциациях, например, в кальцит-пирит-халькопиритовых палеогидротермальных трубах вариации $\delta^{18}\text{O}$ составляют 12,66–21,61 ‰ (в среднем 17,3 ‰). Это может являться свидетельством того, что постседиментационные процессы не привели к гомогенизации изотопного состава кислорода.

Смешанный источник флюида, изотопный состав которого обусловлен поступлениями как магматической, так и морской воды, может быть подтвержден данными изотопного состава серы $\delta^{34}\text{S}$ гидротермального пирита сульфидных труб. Источником серы для формирования сульфидов могли быть базальты (0–1 ‰, [62]) и морская вода в раннем девоне (+18–23 ‰, [63]). Количество морской воды в рудообразующем флюиде может быть оценено по формуле [62, 64]:

$$\delta^{34}\text{S}_{\text{mix}} = X \times \delta^{34}\text{S}_{\text{морская вода}} + (1-X) \times \delta^{34}\text{S}_{\text{баз.}}$$

где X – количество морской воды во флюиде; изотопные составы серы $\delta^{34}\text{S}_{\text{mix}}$ – пирита, $\delta^{34}\text{S}_{\text{морская вода}}$ – морской воды, $\delta^{34}\text{S}_{\text{баз.}}$ – базальта. Изотопный состав $\delta^{34}\text{S}$ пирита варьирует от +0,58 до +2,02 ‰ [17], что соответствует смешению 2–11 ‰ серы морской воды и 89–98 ‰ серы вмещающих базальтов.

Таким образом, образование кальцита и кварца реликтов палеогидротермальных труб с $T_{\text{гом}}$ флюидных включений >200 °C каналов происходило одновременно с агрегатами талька и сульфидов. Прожилки карбонатов ($T_{\text{гом}}$ 140–190 °C.) в тонкозернистых колчеданных рудах, вероятно, связаны с трещинами скалывания и отрыва, в которых не происходило сульфидообразования. По-видимому, температуры гомогенизации флюидных включений в подавляющем большинстве агрегатов кальцита сульфидных диффузеров и палеогидротермальных труб отражают условия диагенеза колчеданных руд. Принимая во внимание глубину отложения современных сульфид-

ных построек «черных курильщиков» в 2500 м и давление около 250 бар [49], истинные температуры образования исследованных агрегатов кальцита и кварца составляют 140–220 °C.

Заключение

Гомогенизация флюидных включений в изученном кальците и кварце происходила в интервале 120–225 °C, соленость водного раствора – 3,3–10,2 мас. % NaCl-экв. Значительная часть флюидных включений ($T_{\text{гом}} < 200$ °C) в прозрачных минералах реликтов палеогидротермальных труб, сульфидных диффузеров и кальцитовых прожилков в колломорфных колчеданных рудах на Юбилейном медноколчеданном месторождении, вероятно, связана с эпигенетическими процессами преобразования колчеданных руд. Флюидные включения в кварце и кальците с $T_{\text{гом}} > 200$ °C могли образоваться во время относительно низкотемпературных стадий первичного колчеданообразования.

Изотопный состав $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ изученного кальцита, а также расчетные величины $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ и $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ флюида свидетельствуют о его двойственном происхождении, предполагающем смешение морской воды и магматического флюида.

По температурам гомогенизации и солевого составу флюиды кальцита и кварца сульфидных труб и диффузеров Юбилейного месторождения близки к прозрачным минералам, запечатывающим палеогидротермальные трубы колчеданных залежей Яман-Касы и Александринское, а также температурам гидротермальных растворов современных сульфидных построек.

Авторы выражают благодарность научным сотрудникам ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН чл. корр. РАН Валерию Владимировичу Масленникову за помощь в подготовке статьи и представленный каменный материал, к.г.-м.н. Михаилу Владимировичу Штенбергу и д.г.-м.н. Ивану Александровичу Блинову за проведение аналитических работ, а также Сергею Захаровичу Смирнову (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск) за предоставленную возможность изучения флюидных включений методом рамановской спектроскопии. Исследования выполнены в рамках госбюджетной темы ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН № АААА-А19-119061790049-3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпущина В.С., Баранов Э.Н. Физико-химические условия формирования колчеданных месторождений Верхнеуральского района, Южный Урал // Геохимия. – 1995. – № 1. – С. 48–63.
2. Марганец – индикатор условий образования карбонатов на колчеданных медно-цинковых месторождениях Южного Урала (Россия) / С.Л. Вотяков, В.В. Масленников, Д.Р. Борисов, А.А. Краснобаев // Геология рудных месторождений – 1996. – Т. 38. – № 6. – С. 558–569.
3. Викентьев И.В. Условия формирования и метаморфизм колчеданных руд. – М.: Научный мир, 2004. – 322 с.
4. Карпущина В.С., Наумов В.Б., Викентьев И.В. Генезис колчеданных месторождений Верхнеуральского рудного района (Южный Урал, Россия): свидетельства магматического вклада металлов и флюида // Геология рудных месторождений. – 2013. – Т. 55. – № 2. – С. 145–165.
5. Физико-химические исследования карбонатов Сафьяновского медно-колчеданного месторождения (Средний Урал) / Е.И. Сорока, М.Е. Притчин, В.П. Лютоев, И.В. Смолева // Вестник Пермского Университета. Геология. – 2019. – Т. 18. – № 2. – С. 152–164.
6. Роль магматического флюида в формировании Талганского медно-цинково-колчеданного месторождения, Южный Урал / Е.Е. Амплиева, И.В. Викентьев, В.С. Карпущина, Н.С. Бортников // Доклады Академии Наук. – 2008. – Т. 423. – № 4. – С. 516–519.
7. Масленникова С.П., Масленников В.В. Сульфидные трубы палеозойских «черных курильщиков» (на примере Урала). – Екатеринбург; Миасс: УрО РАН, 2007. – 312 с.
8. Масленников В.В., Масленникова С.П., Леин А.Ю. Минералогия и геохимия древних и современных черных курильщиков. – М.: РАН, 2019. – 832 с.
9. Минерального-геохимические особенности сульфидных труб Юбилейного медноколчеданного месторождения (Южный Урал) / А.С. Целуйко, В.В. Масленников, С.П. Масленникова, Л.В. Данюшевский, В.А. Котляров, И.А. Блинов // Минералогия. – 2019. – № 4. – С. 52–72.
10. Chimneys in Paleozoic massive sulfide mounds of the Urals VMS deposits: Mineral and trace element comparison with modern black, grey, white and clear smokers / V.V. Maslennikov, S.P. Maslennikova, R.R. Large, L.V. Danyushevsky, R.J. Herrington, N.R. Ayupova, V.V. Zaykov, A.Yu. Lein, A.S. Tseluyko,

- I.Yu. Melekestseva, S.G. Tessalina // *Ore Geology Reviews*. – 2017. – V. 85. – P. 64–106.
11. Гидротермальные сульфидные руды и металлоносные осадки океана / С.Г. Краснов, Г.А. Черкашев, А.И. Айнемер, Э.Ф. Грингаль, Д.В. Гричук, М.П. Давыдов, И.М. Порошина, Т.В. Степанова, С.М. Судариков, Л.И. Бочек, В.А. Даценко, Е.П. Дубинин, Е.А. Ельянова, Н.М. Заири, О.В. Колосов, Ю.В. Миронов, В.Е. Попов, И.А. Андреева, П.А. Ваганов, Н.Е. Герман, Н.И. Гуревич, И.И. Крейтер, М.Н. Маслов. – СПб: Недра, 1992. – 278 с.
 12. Гидротермальный рудогенез океанского дна / Ю.А. Богданов, А.П. Лисицын, А.М. Сагалевиц, Е.Г. Гурвич. – М.: Наука, 2006. – 527 с.
 13. Физико-химические условия гидротермальных рудообразующих систем «черных курильщиков», ассоциирующих с мантийными гипербазитами в Центральной Атлантике / Н.С. Бортников, В.А. Симонов, Е.Е. Амплиева, О.О. Ставрова, И. Фуке // *Геология и геофизика*. – 2011. – Т. 52. – № 11. – С. 1790–1801.
 14. Rona P.A., Widenfalk L., Bostrom K. Serpentinized ultramafics and hydrothermal activity at the Mid-Atlantic Ridge crest near 15° N // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 1987. – V. 92. – Iss. B2. – P. 1417–1427.
 15. The minor element endowment of modern sea-floor massive sulfides and comparison with deposits hosted in ancient volcanic successions / T. Monecke, S. Petersen, M.D. Hannington, H. Grant, I.M. Samson // *Economic Geology*. – 2016. – V. 18. – № 8. – P. 245–306.
 16. Effects of fluid boiling on Au and volatile element enrichment in submarine arc-related hydrothermal systems / J.J. Falkenberg, M. Keith, K.M. Haase, W. Bach, R. Klemd, H. Strauss, I.A. Yeo, K.H. Rubin, B. Storch, M.O. Anderson // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2021. – V. 307. – P. 105–132.
 17. Изотопный состав серы сульфидов продуктов разрушения палеокурильщиков Юбилейного медноколчеданного месторождения (Южный Урал) / А.С. Целуйко, В.В. Масленников, Н.Р. Аюпова, С.А. Садыков // *Минералогия*. – 2015. – № 4. – С. 103–111.
 18. Целуйко А.С., Анкушева Н.Н. Условия формирования труб «палеокурильщиков» Юбилейного медноколчеданного месторождения (Южный Урал) по данным термобарогеохимии и КР-спектроскопии // *Металлогения и современных океанов-2016*. – Миасс: Институт минералогии УрО РАН, 2016. – С. 101–106.
 19. Анкушева Н.Н., Целуйко А.С., Штенберг М.В. Условия формирования Юбилейного месторождения (Южный Урал) по данным термобарогеохимии и колебательной спектроскопии // *Наука ЮУрГУ: Материалы 68-й научной конференции Секции естественных наук*. – Челябинск: ЮУрГУ, 2016. – С. 239–247.
 20. Косарев А.М. О результатах разработки моделей рудно-магматических систем девонских колчеданоносных вулканических комплексов Магниторской островодужной мегазоны, Южный Урал // *Металлогения древних и современных океанов-2021*. – Миасс: Институт минералогии УрО РАН, 2021. – С. 10–12.
 21. Бонинитовые вариолиты Бурибайского вулканического комплекса Южного Урала: минералогия, геохимия и условия образования / А.М. Косарев, С.А. Светов, С.Ю. Чаженгина, Г.Т. Шафигуллина // *Литосфера*. – 2018. – Т. 18. – № 2. – С. 246–279.
 22. Воробьев В.В., Попов Е.В., Сапонов А.В., Антошкин Д.М., Попова Л.П. Отчет о детальной разведке Юбилейного медноколчеданного месторождения на Южном Урале в 1969–73 гг. – Бурибай, Переволочанская геологоразведочная экспедиция. – Т. 1. – 1973. – 351 с.
 23. The history of life at hydrothermal vent / M.N. Georgieva, C.T.S. Little, V.V. Maslennikov, A.G. Glover, N.R. Ayupova, R.J. Herrington // *Earth-Science Reviews*. – 2021. – V. 217. – P. 1–21.
 24. Борисенко А.С. Изучение солевого состава растворов газожидких включений в минералах методом криометрии // *Геология и геофизика*. – 1977. – № 8. – С. 16–28.
 25. Davis D.W., Lowenstein T.K., Spenser R.J. Melting behavior of fluid inclusions in laboratory-grown halite crystals in the systems NaCl-H₂O, NaCl-KCl-H₂O, NaCl-MgCl₂-H₂O and CaCl₂-NaCl-H₂O // *Geochimica Et Cosmochimica Acta*. – 1990 – V. 54 (3) – P. 591–601.
 26. Spenser R.J., Moller N., Weare J.N. The prediction of mineral solubilities in mineral waters: a chemical equilibrium model for the Na-K-Ca-Mg-Cl-SO₄ system at temperatures below 25°C // *Geochimica Et Cosmochimica Acta*. – 1990 – V. 54 (3) – P. 575–590.
 27. Bodnar R.J., Vityk M.O. Interpretation of microthermometric data for H₂O-NaCl fluid inclusions // *Fluid inclusions in minerals: methods and applications*. – Virginia Tech, Blacksburg, VA, 1994. – P. 117–130.
 28. Burke E.A.J. Raman microspectrometry of fluid inclusions // *Lithos*. – 2001. – V. 55. – № 1. – P. 139–158.
 29. Ohmoto H., Rye R.O. Isotopes of sulfur and carbon // *Geochemistry of hydrothermal ore deposits* / Ed. by H.L. Barner. – New York: Wiley, 1979. – P. 509–567.
 30. Знаменский С.Е., Анкушева Н.Н. Большекаранское и Николаевское золоторудные месторождения (Южный Урал): флюидные включения, элементы-примеси и стабильные изотопы S, C и O в минералах рудных жил // *Металлогения древних и современных океанов-2019*. – Миасс: Институт минералогии УрО РАН, 2019. – С. 160–163.
 31. Bowman J.R. Stable isotope systematic of skarns // *Mineralized intrusion-related Skarn systems* / Ed. by D.R. Lentz. – Canada: Mineralogical Association of Canada Short Course Series, 1998. – P. 99–146.
 32. Викентьев И.В. Условия формирования и метаморфизм колчеданных руд. – М.: Научный мир, 2004. – 322 с.
 33. Veizer J., Hoefs J. The nature of O¹⁸/O¹⁶ and C¹³/C¹² secular trends in sedimentary carbonate rocks // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1976. – V. 40. – P. 1387–1395.
 34. Kerrich R. Carbon-isotope systematics of Archean Au-Ag vein deposit in the Superior Province // *Canadian Journal Earth Science*. – 1990. – V. 27. – P. 40–56.
 35. Минералого-геохимические особенности гидротермальных сульфидных руд поля Рейнбоу, ассоциированного с серпентинитами, САХ (36° 4' с.ш.) / Ю.А. Богданов, Н.С. Бортников, И.В. Викентьев, А.Ю. Леин, Е.Г. Гурвич, А.М. Сагалевиц, В.А. Симонов, С.В. Икорский, О.О. Ставрова, В.Н. Аполлонов // *Геология рудных месторождений*. – 2002. – Т. 44. – № 6. – С. 510–542.
 36. Амплиева Е.Е. Геологическое строение, минералого-геохимические особенности и условия образования Талганского колчеданного месторождения, Южный Урал: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – М., 2008. – 38 с.
 37. Tornos F., Gonzalez-Clavijo E., Spiro B. The Filo'n Norte orebody (Tharsis, Iberian Pyrite Belt): a proximal low-temperature shale-hosted massive sulphide in a thin-skinned tectonic belt // *Mineralium Deposita*. – 1998. – V. 33. – P. 150–169.
 38. Relvas J.M.R.S. Geology and metallogenesis at the Neves Corvo deposit, Portugal. PhD Thesis. – Portugal, 2000. – 319 p.
 39. Source and evolution of ore-forming hydrothermal fluids in the northern Iberian Pyrite Belt massive sulphide deposits (SW Spain): evidence from fluid inclusions and stable isotopes / J. Sanchez-Espana, F. Velasco, A.J. Boyce, A.E. Fallick // *Mineralium. Deposita*. – 2003. – V. 38. – P. 519–537.
 40. McCuaig T.C., Kerrich R. P-T-t-deformation-fluid characteristics of lode gold deposits: evidence from alteration systematics // *Ore Geology Reviews*. – 1998. – V. 12. – P. 381–453.
 41. Sheppard S.M.H. Characterization and isotopic variations in natural waters // *Stable isotopes in high temperature geological processes* / Eds. J.W. Valley, H.P. Taylor, J.R. O'Neil. – Berlin: De Gruyter, 1986. – V. 16. – P. 165–183.
 42. Valley J.W. Stable isotope geochemistry of metamorphic rocks // *Stable isotopes in high temperature geological processes. Review Mineral* / Eds. J.W. Valley, H.P. Taylor, J.R. O'Neil. – Berlin: De Gruyter, 1986. – V. 16. P. 445–489.
 43. Rollinson H.R. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. – London, Longman Scientific and Technical, 1993. – 352 p.
 44. Знаменский С.Е., Анкушева Н.Н., Знаменская Н.М. Термобарогеохимические параметры и изотопный состав руд золотопорфирового месторождения Большой Каран (Южный Урал) // *Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий*. – Уфа: ИГ УНЦ РАН, 2018. – С. 245–248.

45. Omoto H., Goldhaber M.B. Sulfur and carbon isotopes // *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. – N.Y.: John Wiley and Sons, 1997. – P. 517–611.
46. Hoefs J. Stable isotope geochemistry. 6th ed. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. – 285 p.
47. Целуйко А.С., Артемьев Д.А. Применение Ga-Ge геотермометра для реконструкций условий формирования гидротермальной трубы Юбилейного медно-колчеданного месторождения (Южный Урал) // *Минералы: строение, свойства, методы исследования: Материалы XI Всероссийской молодежной научной конференции*. – Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2020. – С. 295–296.
48. Бортников Н.С., Симонов В.А., Богданов Ю.А. Флюидные включения в минералах из современных сульфидных построек: физико-химические условия минералов образования и эволюция флюида // *Геология рудных месторождений*. – 2004. – Т. 46. – № 1. – С. 74–87.
49. Физико-химические параметры магматических и гидротермальных процессов на колчеданном месторождении Яман-Касы, Южный Урал / В.А. Симонов, С.В. Ковязин, Е.О. Тереня, В.В. Масленникова, В.В. Зайков, С.П. Масленникова // *Геология рудных месторождений*. – 2006. – Т. 48. – № 5. – С. 423–438.
50. Bailly L., Orgeval J.-J., Tessalina S.G., Zaykov V.V., Maslennikov V.V. Fluid inclusion data of the Alexandrinka massive sulfide deposits, Urals // *Proc. of the Fifth Biennial SGA Meeting and the Tenth Quadrennial IAGOD Symposium / Ed. by A.A. Balkema*. – London, United Kingdom, 22–25 August 1999. – V. 1. – P. 13–16.
51. Peter J.M., Scott S.D. Mineralogy, composition, and fluid inclusion microthermometry of seafloor hydrothermal deposits in the southern trough of Guaymas Basin, Gulf of California // *Canadian Mineralogist*. – 1988. – V. 26. – P. 567–587.
52. Vanko D.A., Milby B.J., Heinzquith S.W. Massive sulphides with fluid-inclusion-bearing quartz from a young seamount on the East Pacific Rise // *Canadian Mineralogist*. – 1991. – V. 29. – P. 453–460.
53. Active and relict sea-floor hydrothermal mineralization at the TAG hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge / P.A. Rona, M.D. Hannington, C.V. Raman, G. Thompson, M.K. Tivey, S.E. Humphis, C. Lalou, S. Petersen // *Economic Geology*. – 1993. – V. 88. – P. 1989–2017.
54. Бортников Н.С., Викентьев И.В. Современное сульфидное полиметаллическое минералообразование в мировом океане // *Геология рудных месторождений*. – 2005. – Т. 47. – № 1. – С. 16–50.
55. Effects of fluid boiling on Au and volatile element enrichment in submarine arc-related hydrothermal systems / J.J. Falkenberg, M. Keith, K.M. Haase, W. Bach, R. Klemm, H. Strauss, I.A. Yeo, K.H. Rubin, B. Storch, M.O. Anderson // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2021. – V. 307. – P. 105–132.
56. Effects of magmatic volatile influx in mafic VMS hydrothermal systems: evidence from the Troodos ophiolite, Cyprus / A.J. Martin, M. Keith, D.B. Parvaz, I. McDonald, A.J. Boyce, K.A. McFall, G.R.T. Jenkin, H. Strauss, C.J. MacLeod // *Chemical Geology*. – 2020. – V. 531. – P. 119–325.
57. Sudarikov S., Narkensky E., Petrov V. Identification of two new hydrothermal fields and sulfide deposits on the Mid-Atlantic Ridge as a result of the combined use of exploration methods: methane detection, water column chemistry, ore sample analysis, and camera surveys // *Minerals*. – 2021. – V. 11. – № 7. – P. 726.
58. Carbonic fluid overprints in volcanogenic massive sulfide deposits: examples from The Kelan volcano-sedimentary basin, Altai, China / J. Xu, C.J. Hart, L. Wang, H. Chu, L. Lin, X. Wei // *Economic Geology*. – 2011. – V. 106. – P. 145–158.
59. Бороденков А.Г., Русин В.Л. Физико-химические условия образования карбонатов и некоторых рудных месторождений // *Геохимия*. – 1982. – № 9. – С. 1257–1276.
60. Грабежев А.И., Ронкин Ю.Л. Изотопы углерода, кислорода и стронция в карбонатах медно-скарновых месторождений Урала // *Литосфера*. – 2007. – № 4. – С. 102–114.
61. De Ronde C.E.J. Fluid chemistry and isotopic characteristics of seafloor hydrothermal systems and associated VMS deposits: potential for magmatic contributions // *Magmas, fluids, and ore deposits. Mineralogical Association of Canada Short Course Series / Ed. by J.F.H. Thompson*. – 1995. – V. 23. – P. 479–509.
62. Mineral-scale in the metal and sulfur isotope composition of pyrite: implications for metal and sulfur sources in mafic VMS deposits / A.J. Martin, I. McDonald, J.W. Jamieson, G.R. Jenkin, K.A. McFall, G. Piercey, C.J. MacLeod, G.D. Layne // *Mineralium Deposita*. – 2021. – V. 368. – P. 1–23.
63. Kampschulte A., Strauss H. The sulfur isotopic evolution of Phanerozoic seawater based on the analysis of structurally substituted sulfate in carbonates // *Chemical Geology*. – 2004. – V. 204. – P. 255–286.
64. Trace element and sulfur isotope compositions for pyrite across the mineralization zones of a sulfide chimney from the East Pacific Rise (1-2°S) / X. Meng, X. Li, F. Chu, J. Zhu, J. Lei, Z. Li, H. Wang, L. Chen, Z. Zhu // *Ore Geology Reviews*. – 2020. – V. 116. – P. 1–15.

Поступила: 03.11.2021 г.

Информация об авторах

Целуйко А.С., младший научный сотрудник Института минералогии Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН.

Анкушева Н.Н., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Института минералогии Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН; доцент, Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе.

Садыков С.А., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Института минералогии Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН.

UDC 553.434: 550.42

CONDITIONS OF FORMATION AND FLUID SOURCES OF YUBILEYNOE VMS DEPOSIT (SOUTHERN URALS): FLUID INCLUSION DATA AND ISOTOPIC AND GEOCHEMICAL STUDY

Alexander S. Tseluyko¹,
celyukoa@rambler.ru

Natalia N. Ankusheva^{1,2},
ankusheva@mail.ru

Sergey A. Sadykov¹,
sergei_sadykov@mail.ru

¹ Institute of Mineralogy of South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Territory of the Ilmeny Reserve, Miass, 456317, Russia.

² South Urals State University, branch in Miass, 10, 8 Iyulya street, Miass, 456304, Russia.

The relevance of the research is related to the problem of determining the PT (P – pressure, T – temperature) and isotopic and geochemical parameters of formation of massive sulfide ore and seafloor sulfide edifices of Yubileynoe VMS deposit, including various mineral types of paleohydrothermal chimneys, sulfide diffusers and biomorphic ores, in comparison with other VMS deposits of the Southern Urals and modern ocean tubes.

The aim of the research is to determine the conditions of formation and isotopic and geochemical composition of ore-bearing fluid formed seafloor sulfide edifices from Yubileynoe VMS deposit.

The object of the research is Yubileynoe VMS deposit located in Bashkortostan Republic area in the Southern Urals.

Methods. The trace element amounts in calcite were determined using Tescan Vega 3 sbu SEM (Institute of Mineralogy SU FRC MG UB RAS, Miass). Fluid inclusions were analyzed in TMS-600 (Linkam) thermostage equipped with Olympus BX-51 microscope (SUSU, Miass). The gas phases of fluid inclusions in quartz were determined by Raman spectroscopy on a Horiba Lab Ram HR 800 spectrometer (IGM SB RAS, Novosibirsk). The isotopic compositions of carbon ($\delta^{13}\text{C}$ ‰ VPDB) and oxygen ($\delta^{18}\text{O}$ ‰ VSMOW) were carried out on a Delta-Plus Advantage mass spectrometer (Thermo Finnigan) coupled to an EA Flash 1112 elemental analyzer with a ConFlo III interface (Institute of Mineralogy SU FRC MG UB RAS, Miass).

Results. Homogenization of fluid inclusions in calcite and quartz occurred in the range between 120 and 225 °C, the salinity is 3,3–10,2 wt. % NaCl eq. A significant part of fluid inclusions ($T_h < 200$ °C) in transparent minerals of relics of paleohydrothermal chimneys, sulfide diffusers, and calcite veinlets in collomorphic pyrite ores is probably associated with epigenetic processes of transformation of massive sulfide ores. Fluid inclusions in quartz and calcite with $T_h > 200$ °C were probably formed during relatively low-temperature stages of primary massive sulfide formation. The isotopic composition of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of calcite, as well as the calculated values of $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ of the ore-forming fluid, indicate the mixing of seawater and magmatic fluid.

Key words:

Sulfide paleohydrothermal chimneys, fluid inclusions, C and O isotopes, massive sulfide deposits, Southern Urals.

The authors express thanks to the researchers of South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology of UB RAS: Valery V. Maslennikov for assistance in preparing paper and rock material, Mikhail V. Shtenberg and Ivan A. Blinov for analytical works, as well as to Sergey Z. Smirnov (V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk) for the possibility to study fluid inclusions by the Raman spectroscopy method. This is the taxpayer-funded research of South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology of UB RAS no. AAAA-A19-119061790049-3.

REFERENCES

- Karpukhina V.S., Baranov E.N. Physical and chemical conditions of formation of the massive sulfide ore deposits of Verkhneuralsky ore area, Southern Urals. *Geochemistry*, 1995, no. 1, pp. 48–63. In Rus.
- Votyakov S.L., Maslennikov V.V., Borisov D.R., Krasnobaev A.A. Manganese is an indicator of carbonate mineralization formation at the zinc-copper massive sulfide deposits of the Southern Urals (Russia). *Geology of ore deposits*, 1996, vol. 38, no. 6, pp. 558–569. In Rus.
- Vikentyev I.V. *Usloviya formirovaniya i metamorfizm kolchedannykh rud* [Formation conditions and metamorphism of massive sulfide ores]. Moscow, Nauchny mir Publ., 2004. 322 p.
- Karpukhina V.S., Naumov V.B., Vikentyev I.V. Genesis of massive sulfide deposits in the Verkhneuralsk ore district (South Ural, Russia): evidence for magmatic contribution of metals and fluids. *Geology of ore deposits*, 2013, vol. 55, no. 2, pp. 145–165. In Rus.
- Soroka E.I., Pritchkin M.E., Lyutov V.P., Smoleva I.V. Physico-chemical studies of carbonates from the Safyanovsky massive copper sulfide deposit (Middle Urals). *Bulletin of the Perm University. Geology*, 2019, vol. 18, no. 2, pp. 152–164. In Rus.
- Amplieva E.E., Vikentyev I.V., Karpukhina V.S., Bortnikov N.S. Rol magmaticheskogo flyuida v formirovaniy Talganskogo medno-tsinkovo-kolchedannogo mestorozhdeniya, Yuzhnyy Ural [The role of magmatic fluid in the formation of the Talgan copper-zinc massive sulfide deposit, South Ural]. *Doklady Earth Sciences*, 2008, vol. 423, no. 4, pp. 516–519.
- Maslennikova S.P., Maslennikov V.V. *Sulfidnye trubyy paleozoyskikh «chernykh kurilshchikov» (na primere Urala)* [Paleozoic «black smoker» sulfide chimneys]. Yekaterinburg, Miass, UB RAS Publ., 2007. 312 p.
- Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Lein A.Yu. *Mineralogiya i geokhimiya drevnykh i sovremennykh chernykh kurilshchikov* [Mineralogy and geochemistry of ancient and modern black smokers]. Moscow, RAS Publ., 2019. 832 p.

9. Tseluyko A.S., Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Danyushevsky L.V., Kotlyarov V.A., Blinov I.A. Mineralogical and geochemical features of sulfide chimneys of the Yubileynoe massive sulfide deposit (South Urals). *Mineralogy*, 2019, no. 4, pp. 52–72. In Rus.
10. Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Large R.R., Danyushevsky L.V., Herrington R.J., Ayupova N.R., Zaykov V.V., Lein A.Yu., Tseluyko A.S., Melekestseva I.Yu., Tessalina S.G. Chimneys in Paleozoic massive sulfide mounds of the Urals VMS deposits: Mineral and trace element comparison with modern black, grey, white and clear smokers. *Ore Geology Reviews*, 2017, vol. 85, pp. 64–106.
11. Krasnov S.G., Cherkashev G.A., Ainemer A.I., Grintal E.F., Grichuk D.V., Davydov M.P., Poroshina I.M., Stepanova T.V., Sudarikov S. M., Bochek L.I., Datsenko V.A., Dubinin E.P., El'yanova E.A., Zairi N.A., Kolosov O.V., Mironov Yu.V., Popov V.E., Andreeva I.M., Vaganov P.A., German N.E., Gurevich N.I., Kreiter I.I., Maslov M.N. *Gidrotermalnye sulfidnye rudy i metallonosiye osadki okeana* [Hydrothermal sulfide ores and metalliferous ocean sediments]. St-Petersburg, Nedra Publ., 1992. 278 p.
12. Bogdanov Yu.A., Lisitsyn A.P., Sagalevich A.M., Gurvich E.G. *Gidrotermalny rudogenez okeanskogo dna* [Hydrothermal ore genesis of the ocean floor]. Moscow, Nauka Publ., 2006. 527 p.
13. Bortnikov N.S., Simonov V.A., Amplieva E.E., Stavrova O.O., Fouquet I. The physicochemical conditions of hydrothermal ore-forming systems of "black smokers" associated with mantle ultrabasites in the Central Atlantic region. *Geology and Geophysics*, 2011, vol. 52, no. 11, p. 1790–1801. In Rus.
14. Rona P.A., Widenfalk L., Bostrom K. Serpentinized ultramafics and hydrothermal activity at the Mid-Atlantic Ridge crest near 15° N. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1987, vol. 92, Iss. B2, pp. 1417–1427.
15. Monecke T., Petersen S., Hannington M.D., Grant H., Samson I.M. The minor element endowment of modern sea-floor massive sulfides and comparison with deposits hosted in ancient volcanic successions. *Economic Geology*, 2016, vol. 18, no. 8, pp. 245–306.
16. Falkenberg J.J., Keith M., Haase K.M., Bach W., Klemm R., Strauss H., Yeo I.A., Ruben K.H., Storch B., Anderson M.O. Effects of fluid boiling on Au and volatile element enrichment in submarine arc-related hydrothermal systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2021, vol. 307, pp. 105–132.
17. Tseluyko A.S., Maslennikov V.V., Ayupova N.R., Sadykov S.A. Sulfur isotopic composition of sulfide from the destruction products of paleosmokers from the Yubileynoe VHMS deposit (Southern Urals). *Mineralogy*, 2015, no. 4, p. 103–111. In Rus.
18. Tseluyko A.S., Ankusheva N.N. Usloviya formirovaniya trub «paleokurilshchikov» Yubileynogo mednokolchedannogo mestorozhdeniya (Yuzhnyy Ural) po dannym termobarogekhimii i KR-spektroskopii [Conditions for the formation of sulfide chimneys of «paleosmokers» of the Yubileynoe massive sulfide deposit (South Urals) according to thermobarogeochemistry and Raman spectroscopy]. *Metallogeniya i sovremennykh okeanov-2016* [Metallogeny of ancient and modern oceans-2016]. Miass, Institute of Mineralogy, UB RAS, 2016. pp. 101–106.
19. Ankusheva N.N., Tseluyko A.S., Shtenberg M.V. Usloviya formirovaniya Yubileynogo mestorozhdeniya (Yuzhnyy Ural) po dannym termobarogekhimii i kolebatelnoy spektroskopii [Conditions for the formation of the Yubileynoe massive sulfide deposit (South Urals) according to thermobarogeochemistry and Raman spectroscopy]. *Nauka YUURGU. Materialy 68-y nauchnoy konferentsii Sektzii estestvennykh nauk* [Science of SUSU. Proceedings of the 68th scientific conference of the natural sciences section]. Chelyabinsk, SUSU Publ., 2016. pp. 239–247.
20. Kosarev A.M. O rezultatakh razrabotki modeley rudnomagmatischevskikh sistem devonskikh kolchedanonosnykh vulkanicheskikh kompleksov Magnitorskoy ostrovoduzhnoy megazony, Yuzhnyy Ural [On the results of the development of models of ore-magmatic systems of Devonian pyrite-bearing volcanic complexes of the Magnitorsk island-arc megazone, South Ural]. *Metallogeniya i sovremennykh okeanov-2021* [Metallogeny of ancient and modern oceans-2021]. Miass, Institute of Mineralogy UB RAS Publ., 2021. pp. 10–12.
21. Kosarev A.M., Svetov S.A., Chazhengina S.Yu., Shafigullina G.T. Boninitic variolites of the Buribay volcanic complex the Southern Urals: mineralogy, geochemistry and formation conditions. *Litosfera*, 2018, vol. 18, pp. 246–279. In Rus.
22. Vorobiev V.V., Popov E.V., Saponov A.V., Antoshkin D.M., Popova L.P. *Otchet o detalnoy razvedke Yubileynogo mednokolchedannogo mestorozhdeniya na Yuzhnom Urale v 1969–73 gg.* [Report on detailed exploration of the Yubileynoe massive sulfide deposit in the South Urals in 1969–73]. Buribai, Perevolochansk exploration expedition, 1973. Vol. 1, 351 p.
23. Georgieva M.N., Little C.T.S., Maslennikov V.V., Glover A.G., Ayupova N.R., Herrington R.J. The history of life at hydrothermal vent. *Earth-Science Reviews*, 2021, vol. 217, pp. 1–21.
24. Borisenko A.S. Izuchenie solevogo sostava rastvorov gazovozhidkikh vklucheni v mineralakh metodom kriometrii [Study of the salt composition of solutions of gas-liquid inclusions in minerals by the cryometry method]. *Geology and Geophysics*, 1977, no. 8, pp. 16–28.
25. Davis D.W., Lowenstein T.K., Spenser R.J. Melting behavior of fluid inclusions in laboratory-grown halite crystals in the systems NaCl-H₂O, NaCl-KCl-H₂O, NaCl-MgCl₂-H₂O and CaCl₂-NaCl-H₂O. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1990, vol. 54 (3), pp. 591–601.
26. Spenser R.J., Moller N., Weare J.N. The prediction of mineral solubilities in mineral waters: a chemical equilibrium model for the Na-K-Ca-Mg-Cl-SO₄ system at temperatures below 25°C. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1990, vol. 54 (3), pp. 575–590.
27. Bodnar R.J., Vityk M.O. Interpretation of microthermometric data for H₂O-NaCl fluid inclusions. *Fluid inclusions in minerals: methods and applications*. Pontignana-Siena, 1994, pp. 117–130.
28. Burke E.A.J. Raman microspectrometry of fluid inclusions. *Lithos*, 2001, vol. 55, no. 1, pp. 139–158.
29. Ohmoto H., Rye R.O. Isotopes of sulfur and carbon. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. Ed. by H.L. Barner. New York, Wiley, 1979. pp. 509–567.
30. Znamenskiy S.E., Ankusheva N.N. Bolshekaranskoe i Nikolaevskoe zolotorudnye mestorozhdeniya (Yuzhnyy Ural): flyuidnye vklucheniya, elementy-primesi i stabilnye izotopy S, C i O v mineralakh rudnykh zhil [Bolshekaran and Nikolaevskoe gold deposits (South Urals): fluid inclusions, trace elements and stable isotopes of S, C and O in minerals of ore veins]. *Metallogeniya drevnykh i sovremennykh okeanov-2019* [Metallogeny of ancient and modern oceans-2019]. Miass, Institute of Mineralogy UB RAS, 2019. pp. 160–163.
31. Bowmen J.R. Stable isotope systematic of skarns. *Mineralized intrusion-related Skarn systems*. Ed. by D.R. Lentz. Canada, Mineralogical Association of Canada Short Course Series, 1998. pp. 99–146.
32. Vikentyev I.V. *Usloviya formirovaniya i metamorfizm kolchedannykh rud* [Formation conditions and metamorphism of massive sulfide ores]. Moscow, Nauchny mir Publ., 2004. 322 p.
33. Veizer J., Hoefs J. The nature of O¹⁸/O¹⁶ and C¹³/C¹² secular trends in sedimentary carbonate rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1976, vol. 40, pp. 1387–1395.
34. Kerrich R. Carbon-isotope systematics of Archean Au-Ag vein deposit in the Superior Province. *Canadian Journal Earth Science*, 1990, vol. 27, pp. 40–56.
35. Bogdanov Yu.A., Bortnikov N.S., Vikentyev I.V., Lein A.Yu., Gurvich E.G., Sagalevich A.M., Simonov V.A., Ikorsky S.V., Stavrova O.O., Apollo V.N. Mineralogical and geochemical features of hydrothermal sulfide ores of the Rainbow field associated with serpentinites, MAR (36° 4' N). *Geology of Ore Deposits*, 2002, vol. 44, no. 6, pp. 510–542. In Rus.
36. Amplieva E.E. *Geologicheskoe stroenie, mineralogeochemicheskie osobennosti i usloviya obrazovaniya Talganskogo kolchedannogo mestorozhdeniya, Yuzhnyy Ural*. Avtoreferat Diss. Kand. nauk [Geological structure, mineralogical and geochemical features and conditions of formation of the Talgan deposit, South Urals. Cand. Diss. Abstract]. Moscow, 2008. 38 p.
37. Tornos F., Gonza'lez-Clavijo E., Spiro B. The Filo'n Norte orebody (Tharsis, Iberian Pyrite Belt): a proximal low-temperature shale-hosted massive sulphide in a thin-skinned tectonic belt. *Mineralium Deposita*, 1998, vol. 33, pp. 150–169.
38. Relvas J.M.R.S. *Geology and metallogenesis at the Neves Corvo deposit, Portugal*. PhD Thesis. Portugal, University of Lisbon, 2000. 319 p.
39. Sanchez-Espana J., Velasco F., Boyce A.J., Fallick A.E. Source and evolution of ore-forming hydrothermal fluids in the northern

- Iberian Pyrite Belt massive sulphide deposits (SW Spain): evidence from fluid inclusions and stable isotopes. *Mineralium Deposita*, 2003, vol. 38, pp. 519–537.
40. McCuaig T.C., Kerrich R. P-T-t-deformation-fluid characteristics of lode gold deposits: evidence from alteration systematics. *Ore Geology Reviews*, 1998, vol. 12, pp. 381–453.
 41. Sheppard S.M.H. Characterization and isotopic variations in natural waters. *Stable isotopes in high temperature geological processes*. Eds. J.W. Valley, H.P. Taylor, J.R. O'Neil. Berlin, De Gruyter, 1986. Vol. 16, pp. 165–183.
 42. Valley J.W. Stable isotope geochemistry of metamorphic rocks. *Stable isotopes in high temperature geological processes*. *Review Mineral*. Eds. J.W. Valley, H.P. Taylor, J.R. O'Neil (Ed.). Berlin, De Gruyter, 1986. Vol. 16, pp. 445–489.
 43. Rollinson H.R. *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. London, Longman Scientific and Technical, 1993. 352 p.
 44. Znamensky S.E., Ankusheva N.N., Znamenskaya N.M. Termobarogeokhimicheskie parametry i izotopny sostav rud zoloto-porfirovogo mestorozhdeniya Bolshoy Karan (Yuzhnyy Ural) [Thermobarogeochemical parameters and isotopic composition of ores of the Bolshoi Karan gold-porphyry deposit (South Urals)]. *Geologiya, poleznye iskopayemye i problemy geokologii Bashkortostana, Urala i sopredelnykh territoriy* [Geology, minerals and problems of geochemistry of Bashkortostan, the Urals and adjacent territories]. Ufa, IG UC RAS Publ., 2018. pp. 245–248.
 45. Omoto H., Goldhaber M.B. Sulfur and carbon isotopes. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. N.Y., John Wiley and Sons, 1997. pp. 517–611.
 46. Hoefs J. *Stable isotope geochemistry*. 6th ed. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2009. 285 p.
 47. Tseluyko A.S., Artemyev D.A. Primeneniye Ga-Ge geotermometra dlya rekonstruktsiy usloviy formirovaniya gidrotermalnoy trubyy Yubileynogo medno-kolchedannogo mestorozhdeniya (Yuzhnyy Ural) [Application of Ga-Ge geothermometer for reconstructions of the conditions of formation of the hydrothermal chimney of the Yubileynoe copper massive sulfide deposit (South Urals)]. *Materialy XI Vserossiyskoy molodozhnoy nauchnoy konferentsii. Mineraly: stroyneniye, svoystva, metody issledovaniya* [Materials of the XI All-Russian Youth Scientific Conference. Minerals: structure, properties, research methods]. Yekaterinburg, IGG UB RAS Publ., 2020. pp. 295–296.
 48. Bortnikov N.S., Simonov V.A., Bogdanov Yu.A. Fluid inclusions in minerals from seafloor massive sulfide: physico-chemical conditions of mineral formation and fluid evolution. *Geology of Ore Deposits*, 2004, vol. 46, no. 1, pp. 74–87. In Rus.
 49. Simonov V.A., Kovyazin S.V., Terenya E.O., Maslennikov V.V., Zaykov V.V., Maslennikova S.P. Physico-chemical parameters of magmatic and hydrothermal processes at the Yaman-Kasy massive sulfide deposit, South Urals. *Geology of Ore Deposits*, 2006, vol. 48, no. 5, pp. 423–438. In Rus.
 50. Bailly L., Orgeval J.-J., Tessalina S.G., Zaykov V.V., Maslennikov V.V. Fluid inclusion data of the Alexandrinka massive sulfide deposits, Urals. *Proc. of the Fifth Biennial SGA Meeting and the Tenth Quadrennial IAGOD Symposium*. Ed. by A.A. Balkema. London, United Kingdom, 22–25 August 1999. Vol. 1, pp. 13–16.
 51. Peter J.M., Scott S.D. Mineralogy, composition, and fluid inclusion microthermometry of seafloor hydrothermal deposits in the southern trough of Guaymas Basin, Gulf of California. *Canadian Mineralogist*, 1988, vol. 26, pp. 567–587.
 52. Vanko D.A., Milby B.J., Heinzquith S.W. Massive sulphides with fluid-inclusion-bearing quartz from a young seamount on the East Pacific Rise. *Canadian Mineralogist*, 1991, vol. 29, pp. 453–460.
 53. Rona P.A., Hannington M.D., Raman C.V., Thompson G., Tivey M.K., Humphis S.E., Lalou C., Petersen S. Active and relict sea-floor hydrothermal mineralization at the TAG hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge. *Economic Geology*, 1993, vol. 88, pp. 1989–2017.
 54. Bortnikov N.S., Vikentyev I.V. Modern sulfide polymetallic mineral formation in the world ocean. *Geology of Ore Deposits*, 2005, vol. 47, no. 1, pp. 16–50. In Rus.
 55. Falkenberg J.J., Keith M., Haase K.M., Bach W., Klemm R., Strauss H., Yeo I.A., Rubin K.H., Storch B., Anderson M.O. Effects of fluid boiling on Au and volatile element enrichment in submarine arc-related hydrothermal systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2021, vol. 307, pp. 105–132.
 56. Martin A.J., Keith M., Parvaz D.B., McDonald I., Boyce A. J., McFall K.A., Jenkin G.R.T., Strauss H., MacLeod C.J. Effects of magmatic volatile influx in mafic VMS hydrothermal systems: evidence from the Troodos ophiolite, Cyprus. *Chemical Geology*, 2020, vol. 531, pp. 119–325.
 57. Sudarikov S., Narkensky E., Petrov V. Identification of two new hydrothermal fields and sulfide deposits on the Mid-Atlantic Ridge as a result of the combined use of exploration methods: methane detection, water column chemistry, ore sample analysis, and camera surveys. *Minerals*, 2021, vol. 11, no. 7, pp. 726.
 58. Xu J., Hart C.J., Wang L., Chu H., Lin L., Wei X. Carbonic fluid overprints in volcanogenic massive sulfide deposits: examples from The Kelan volcano-sedimentary basin, Altaides, China. *Economic Geology*, 2011, vol. 106, pp. 145–158.
 59. Borodenkov A.G., Rusinov V.L. Fiziko-khimicheskie usloviya obrazovaniya karbonatov i nekotorykh rudnykh mestorozhdeniy [Physicochemical conditions for the formation of carbonates and some ore deposits]. *Geokhimiya*, 1982, no. 9, pp. 1257–1276.
 60. Grabezhev A.I., Ronkin Yu.L. Isotopes of carbon, oxygen and strontium in carbonates of copper-skarn deposits of the Urals. *Lithosphere*, 2007, no. 4, pp. 102–114. In Rus.
 61. De Ronde C.E.J. Fluid chemistry and isotopic characteristics of seafloor hydrothermal systems and associated VMS deposits: potential for magmatic contributions. *Magma, fluids, and ore deposits*. Ed. by J.F.H. Thompson. Canada, Quebec, Mineralogical Association of Canada Short Course Series, 1995. Vol. 23, pp. 479–509.
 62. Martin A.J., McDonald I., Jamieson J.W., Jenkin G.R., McFall K.A., Piercey G., MacLeod C.J., Layne G.D. Mineral-scale in the metal and sulfur isotope composition of pyrite: implications for metal and sulfur sources in mafic VMS deposits. *Mineralium Deposita*, 2021, vol. 368, pp. 1–23.
 63. Kampschulte A., Strauss H. The sulfur isotopic evolution of Phanerozoic seawater based on the analysis of structurally substituted sulfate in carbonates. *Chemical Geology*, 2004, vol. 204, pp. 255–286.
 64. Meng X., Li X., Chu F., Zhu J., Lei J., Li Z., Wang H., Chen L., Zhu Z. Trace element and sulfur isotope compositions for pyrite across the mineralization zones of a sulfide chimney from the East Pacific Rise (1–2 °S). *Ore Geology Reviews*, 2020, vol. 116, pp. 1–15.

Received: 3 November 2021.

Information about the authors

Alexander S. Tseluyko, junior researcher, Institute of Mineralogy of South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS.

Natalia N. Ankusheva, Cand. Sc., researcher, Institute of Mineralogy of South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS; associate professor, South Urals State University, branch in Miass.

Sergey A. Sadykov, Cand. Sc., researcher, Institute of Mineralogy of South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS.

УДК 665.939.56

ТЕХНОЛОГИЯ УДАЛЕНИЯ СВОБОДНОГО ФОРМАЛЬДЕГИДА ИЗ КАРБАМИДОФОРМАЛЬДЕГИДНЫХ СМОЛ

Липин Константин Владимирович¹,
lipinkost@mail.ru

Федосеев Сергей Владимирович¹,
sergey.fedoseev88@gmail.com

Кизяев Денис Алексеевич²,
denis.kizyaev@yandex.ru

¹ Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова,
Россия, 428015, г. Чебоксары, пр. Московский, 15.

² ПАО «Химпром»,
Россия, 429965, г. Новочебоксарск, ул. Промышленная, 101.

Актуальность исследования обусловлена высокой опасностью техногенной эмиссии формальдегида в окружающую среду. Основным антропогенным источником формальдегида является производство древесностружечных плит, в которых применяются карбамидоформальдегидные смолы. В работе предлагается технология удаления свободного формальдегида из карбамидоформальдегидных смол, что повысит безопасность и экологичность продукции на их основе. Результаты работы позволят безопасно утилизировать и наиболее оптимально использовать имеющиеся георесурсы, тем самым решая одну из основных задач геоэкологии.

Целью данного исследования является разработка способа снижения токсичности карбамидоформальдегидных смол за счет удаления свободного формальдегида.

Объекты: карбамидоформальдегидные смолы, характеризующиеся возможностью эмиссии формальдегида.

Методы: моделирование оптимальных параметров процесса; лабораторные методы удаления формальдегида; лабораторные методы исследования физико-механических свойств модифицированной карбамидоформальдегидной смолы; моделирование необходимого оборудования; моделирование технологической схемы.

Результаты. Была разработана лабораторная установка для удаления формальдегида из карбамидоформальдегидных смол, и подобраны оптимальные условия проведения процесса: рекомендуемый интервал pH составляет 3,5...4,0, температуру рекомендуется поддерживать в интервале 20–40 °С, количество гидросульфита натрия должно составлять 1,5...1,75 от стехиометрического соотношения, процесс рекомендуется проводить при атмосферном давлении. На основе лабораторной установки разработана технологическая схема получения экологически безопасных карбамидоформальдегидных смол, состоящая из двух стадий: приготовление реагента гидросульфита натрия и взаимодействие его с карбамидоформальдегидной смолой. Было подобрано необходимое основное и вспомогательное оборудование. Для проведения процесса необходимо два реактора с рубашкой и мешалкой, три насоса-дозатора и бак для хранения соляной кислоты. В рамках данного исследования было проведено изучение физико-механических свойств модифицированной карбамидоформальдегидной смолы. Полученные результаты несколько отклоняются от показателей исходной карбамидоформальдегидной смолы, но находятся в пределах допустимых норм.

Ключевые слова:

Формальдегид, карбамидоформальдегидные смолы, эмиссия формальдегида, удаление формальдегида, модификация карбамидоформальдегидной смолы.

Введение

Одной из основных задач геоэкологии является изучение проблемы безопасной утилизации георесурсов. В список наиболее опасных антропогенных загрязнителей окружающей среды входит формальдегид, образующийся при производстве и использовании древесностружечных плит. Утилизация свободного формальдегида путем перевода в менее токсичное соединение является актуальной проблемой геоэкологии.

Карбамидоформальдегидные (КФ) смолы являются основным связующим материалом для производства древесностружечных и древесных плит [1]. Их получают поликонденсацией карбамида и формальдегида. Кроме этого, КФ смолы применяют, как эмульсионные краски [2], конденсаторы в электрохимии [3, 4], для получения нанопорошков [5] и сорбента

та для удаления загрязнений из сточных вод [6]. В последние годы КФ смолы часто находят применение в агрохимии [7, 8].

Применение КФ смол ограничивает возможность эмиссии формальдегида во время использования. Формальдегид внесен в список канцерогенных веществ, обладает токсичностью, негативно воздействует на генетический материал, репродуктивные органы, дыхательные пути, глаза, кожный покров. На сегодняшний день разработаны классы токсичности клеевых композиций в зависимости от содержания свободного формальдегида, и разработка новых методов получения экологически безопасных КФ смол является актуальной задачей [9–22].

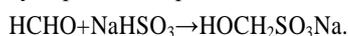
Целью данного исследования является разработка способа снижения токсичности КФ смол за счет удаления свободного формальдегида.

Обсуждение результатов

Наиболее часто для снижения концентрации свободного формальдегида в смоле меняют лишь соотношение карбамида с формальдегидом или порядок, величину и количество загрузок. Данные методы характеризуются изменением технологического процесса, технологических режимов и не позволяют модифицировать уже готовую КФ смолу непосредственно на предприятии, использующем ее для различных целей.

Нами предлагается способ модификации КФ смол с целью снижения концентрации свободного формальдегида в ее составе без изменения физико-механических и химических параметров смолы и изделий на ее основе путем обработки гидросульфитом натрия.

При взаимодействии гидросульфита натрия и формальдегида протекает реакция образования гидроксиметансульфоната натрия:



Таким образом, в ходе реакции вредный и канцерогенный формальдегид (2 класс опасности) переходит в гидроксиметансульфонат натрия (3 класс опасности) и понижается токсичность получаемой КФ смолы.

В ходе предварительных лабораторных экспериментов было обнаружено, что гидросульфит натрия полностью связывает свободный формальдегид КФ смолы. Концентрацию формальдегида определяли прямым потенциометрическим титрованием раствором гидроксимида гидрохлорида.

Для достижения поставленной цели на следующем этапе работы было решено подобрать оптимальные условия для проведения процесса связывания свободного формальдегида из смолы, разработать технологическую схему, подобрать основное и вспомогательное оборудование.

Первоначально была поставлена задача подобрать оптимальные технологические параметры проектируемого процесса.

Стабильность протекания реакции взаимодействия свободного формальдегида и реагента гидросульфита натрия во многом зависит от pH среды, поскольку гидросульфит натрия имеет ограниченный интервал устойчивости. Изменение допустимого pH среды приводит к его разрушению: при снижении $\text{pH} < 3,5$ происходит распад гидросульфита натрия до SO_2 , NaCl и H_2O (при подкислении соляной кислотой); при увеличении $\text{pH} > 4,0$ гидросульфит натрия переходит в форму сульфита натрия. Таким образом, установленный нами интервал pH составляет 3,5...4,0.

На процесс связывания формальдегида также будет оказывать влияние температура реакционной массы. Отверждение смолы происходит при повышении температуры до 100–130 °С. Соответственно, структурные изменения в смоле начинаются при 80–90 °С, поэтому достижение такой температуры нельзя допускать. При температурах ниже +5 °С также происходят нежелательные структурные изменения, так как в состав смолы входят мочевины, формальдегид, поливинилацетат, вода. Таким образом, интервал температур 5–90 °С является наиболее благоприятным

для такого вида взаимодействия. Были проведены исследования влияния на взаимодействие температур 30, 40, 50, 60, 70 и 80 °С. Выявлено, что при значениях температур 60, 70 и 80 °С гидросульфит натрия разлагается с выделением SO_2 . При других исследованных значениях температуры было замечено незначительное увеличение скорости реакции, которое не оправдывается затратами энергоресурсов. Таким образом, рабочую температуру рекомендуется поддерживать в интервале 20–40 °С.

С увеличением концентрации связывающего реагента увеличивается полнота реакции связывания формальдегида. Концентрация свободного формальдегида в смоле постоянна и находится в пределах 0,15...0,9 % мас. (по ГОСТу и ТУ), поэтому увеличенные количества гидросульфита натрия больше чем в 2 раза превышающего стехиометрическое соотношение по реакции не приводит к заметному увеличению скорости процесса. Взаимодействие решили проводить при концентрациях гидросульфита натрия, превышающих стехиометрическое соотношение в 1,5...1,75 раз.

При исследовании влияния УФ-излучения на реакцию взаимодействия свободного формальдегида и гидросульфита натрия нами не было выявлено никаких изменений, ни в скорости реакции, ни в полноте ее протекания.

При снижении давления (менее 0,1 МПа) интенсифицируется процесс эмиссии свободного формальдегида из реакционной массы, благодаря чему связывание его с гидросульфитом не происходит вследствие большой скорости эмиссии. При повышении давления до 0,15 МПа нами не было замечено значительного увеличения скорости реакции, которое оправдывалось бы затратами энергоресурсов. Таким образом, данный процесс рекомендуется проводить при атмосферном давлении (0,1 МПа).

В итоге были выбраны оптимальные условия для проведения реакции связывания свободного формальдегида в КФ смолах гидросульфитом натрия:

- 1) рекомендуемый интервал pH составляет 3,5...4,0;
- 2) рабочую температуру рекомендуется поддерживать в интервале 20–40 °С;
- 3) количество гидросульфита натрия, необходимого для связывания свободного формальдегида, составляет 1,5...1,75 от стехиометрического соотношения;
- 4) рекомендуется проводить связывание свободного формальдегида при давлении 0,1 МПа.

Для проверки оптимальных условий проведения процесса была разработана и собрана лабораторная установка удаления формальдегида из КФ смол, которая представлена на рис. 1.

В емкость для приготовления раствора гидросульфита натрия NaHSO_3 – 2, заливается вода и сульфит натрия в количествах, необходимых для получения 25 %-го раствора. Также из расходной емкости – 4 в емкость приготовления подается точное количество соляной кислоты HCl , необходимое для протекания реакции, при этом ведется постоянное измерение pH

при помощи рН-метра – 1. При помощи магнитной мешалки – 3 поддерживается скорость перемешивания раствора 200 об/мин и температура реакционной массы 20–40 °С. Приготовленный раствор гидросульфита натрия при помощи крана-дозатора – 5 загружается в реактор удаления формальдегида – 6, куда заранее была загружена карбаминоформальдегид-

ная смола и включен электродвигатель с мешалкой – 8. В случае необходимости подкисления реакционной массы в ходе процесса из расходной емкости – 7 подается соляная кислота. Скорость перемешивания раствора соблюдаются и контролируются. Готовая модифицированная смола при помощи крана – 9 выгружается из реактора.

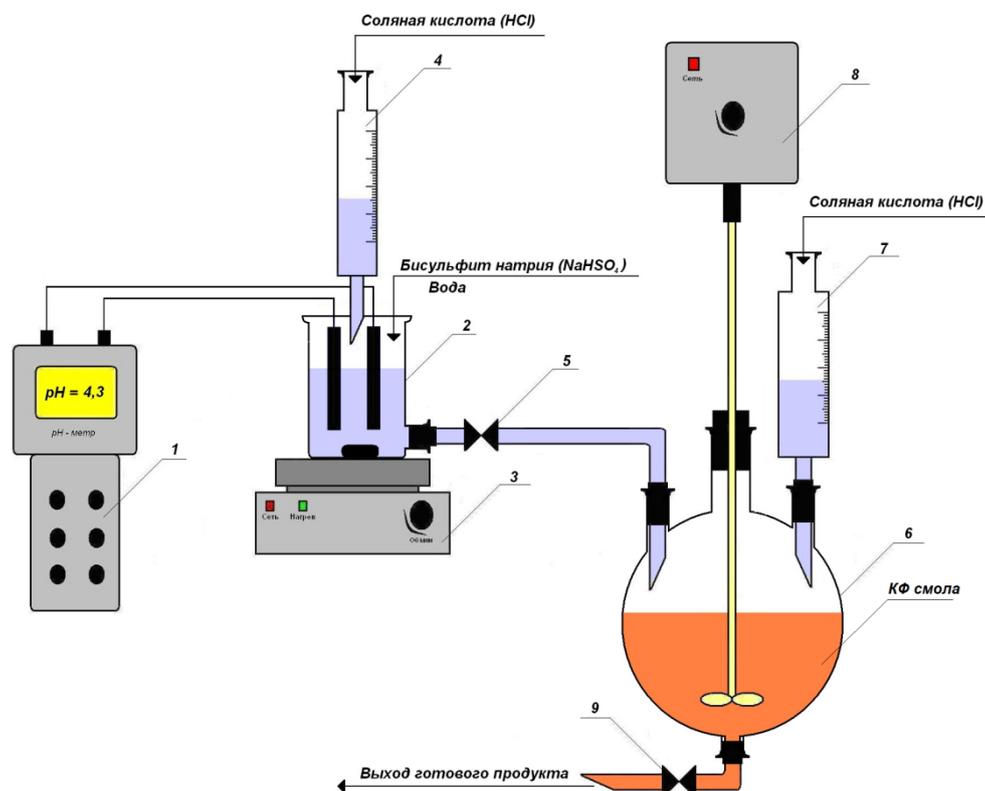


Рис. 1. Лабораторная установка удаления формальдегида из КФ смол: 1 – рН метр (рН-150 МИ); 2 – емкость для приготовления раствора гидросульфита натрия (NaHSO_3); 3 – магнитная мешалка; 4 – расходная емкость соляной кислоты (HCl); 5 – кран-дозатор подачи реактива в реактор; 6 – реактор для удаления формальдегида; 7 – расходная емкость соляной кислоты (HCl); 8 – электродвигатель с мешалкой; 9 – кран выхода готового продукта

Fig. 1. Laboratory installation for the removal of formaldehyde from UF resins: 1 – pH meter (pH-150 MI); 2 – container for preparing a solution of sodium hydrosulfite (NaHSO_3); 3 – magnetic stirrer; 4 – consumable capacity of hydrochloric acid (HCl); 5 – metering valve for supplying the reagent to the reactor; 6 – reactor for formaldehyde removal; 7 – consumable capacity of hydrochloric acid (HCl); 8 – electric motor with a stirrer; 9 – product outlet tap

При проведении лабораторных экспериментов была подтверждена работоспособность разработанной методики.

Было проведено исследование физико-механических свойств модифицированной КФ смолы. Полученные результаты несколько отклоняются от результатов исследования исходной КФ смолы, но находятся в пределах допустимых норм. Результаты исследования свойств КФ смолы до и после связывания свободного формальдегида представлены в таблице.

На основе лабораторного метода было решено разработать технологическую схему удаления формальдегида из КФ смол.

Технологический процесс разделен на 2 стадии (рис. 2): 1 – приготовление реагента гидросульфита натрия; 2 – взаимодействие гидросульфита натрия с карбаминоформальдегидной смолой.

1 стадия. Приготовление концентрированного раствора гидросульфита натрия путем взаимодействия водного раствора сульфита натрия с соляной кислотой при строгом контроле за изменением рН реакционной смеси, осуществляется в реакторе – 1 с рубашкой для поддержания постоянной температуры и мешалкой для перемешивания.

Насыщенный водный раствор гидросульфита натрия, приготовленный непосредственно в реакторе – 1 путем дозирования воды и сухого реагента, вводят в контакт при помощи насоса-дозатора – 2 концентрированной соляной кислотой из емкости хранения соляной кислоты – 3. Дозировка соляной кислоты останавливается до достижения суммарной концентрации восстановителей в конечном растворе в диапазоне 1,9...2,5 моль/кг, или 2,5...3,1 моль/л, таким образом, чтобы рН реакционной смеси по ходу

процесса не оказывался менее 6, а в момент завершения был 3,5...4,5, после чего процесс прекращают, полученный раствор подают при помощи насоса – 5 на вторую стадию взаимодействия раствора гидросульфита натрия с КФ смолой.

2 стадия. В реактор – 6, снабженный рубашкой для поддержания постоянной температуры реакционной смеси и мешалкой, загружается КФ смола и включается перемешивание. В реактор при помощи насоса – 5 дозируется реагент – гидросульфит натрия, в количестве, необходимом для реакции. Внутри реактора постоянно контролируется температура и pH среды, при необходимости pH среды в реакторе подкисляется соляной кислотой из емкости – 3 при помощи насоса – 4.

По истечении времени реакции отбирается проба на анализ содержания свободного формальдегида в смеси, а также физико-механических свойств. При положительных результатах анализа перемешивание останавливается и с нижнего штуцера реактора выгружается готовый продукт – модифицированная КФ смола.

Таблица. Показатели физико-механических свойств КФ смолы до и после связывания свободного формальдегида

Table. Indicators of the physico-mechanical properties of UF resin before and after binding of free formaldehyde

Свойства/Properties	Значение/Value		
	До Before	После After	Норма Norm
Условная вязкость при (20,0±0,5) °С, с Conditional viscosity at (20,0±0,5) °C, s	43	38	35–50
Время желатинизации при 100 °С, с Gelation time at 100 °C, s	57	45	40–65
Предел прочности при скалывании по клеевому слою фанеры после вымачивания образцов в воде в течение 24 ч, МПа Ultimate shear strength over the glue layer of plywood after soaking the samples in water for 24 h, MPa	1,5	1,5	1,5
Плотность при 20 °С, г/см ³ Density at 20 °C, g/cm ³	1,27	1,25	1,25...1,28

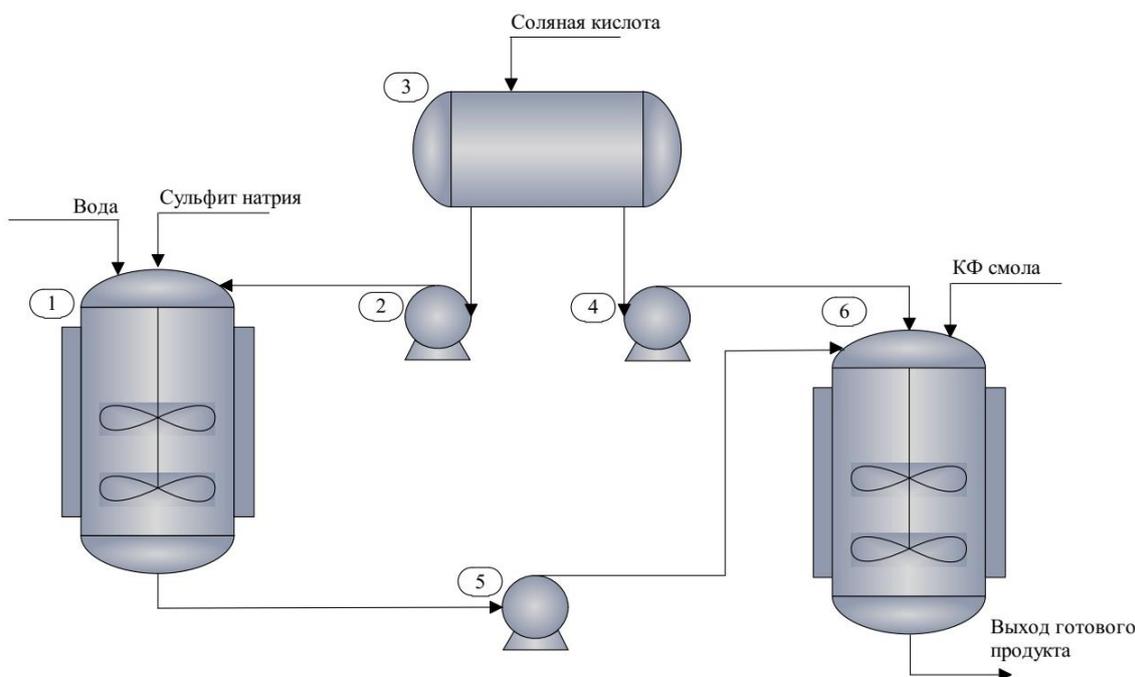


Рис. 2. Технологическая схема удаления формальдегида из КФ смол: 1 – аппарат для приготовления раствора гидросульфита натрия; 2, 4, 5 – насос дозатор; 3 – бак-хранилище соляной кислоты; 6 – реактор

Fig. 2. Technological scheme for formaldehyde removal from UF resins: 1 – apparatus for preparation of a solution of sodium hydrosulfite; 2, 4, 5 – pump dispenser; 3 – storage tank for hydrochloric acid; 6 – reactor

Подбор основного и вспомогательного оборудования производили на основании химических и физико-химических особенностей реагентов, технологических режимов и особенностей проведения процесса.

Реактор – 1 представляет собой аппарат с рубашкой, изготовленный из эмалированной стали, объем реактора – 1 м³, диаметр – 1 м, высота 1,45 м. В верхней части имеет 3 фланца для загрузки реагентов. Реактор снабжен электродвигателем для перемешивания реакционной массы. Перемешивающее устройство представляет собой якорную мешалку, соединенную жесткой муфтой с электродвигателем.

Насосы дозаторы – 2, 4, 5 выполнены из стали марки 12Х18Н9ТЛ, производительностью 0,25, 0,2 и 1 м³/ч соответственно.

Бак для хранения соляной кислоты – 3 выполнен из легированной стали, объем – 0,5 м³, диаметр – 0,85 м, высота – 0,9 м.

Реактор – 6 представляет собой аппарат с рубашкой, изготовленный из эмалированной стали, объемом 4 м³, диаметром 2,4 м, высотой 3,02 м. В верхней части имеет 3 фланца для загрузки реактивов и муфту для соединения с электродвигателем мешалки.

Стоит отметить безотходность разработанной методики: продукт связывания формальдегида – метил-

сульфат натрия – остается в КФ смоле и не ухудшает свойства. Твердых отходов и отходящих газов в ходе процесса не образуется.

Методика эксперимента

Удаление формальдегида из КФ смолы. В емкость для приготовления раствора гидросульфита натрия NaHSO_3 заливается вода и сульфит натрия в количествах, необходимых для получения 25%-го раствора. Из расходной емкости в емкость приготовления подается точное количество соляной кислоты, необходимое для протекания реакции, при этом ведется постоянное измерение pH при помощи pH-метра. Приготовленный раствор гидросульфита натрия при помощи крана-дозатора загружается в реактор приготовления экологически безопасной КФ смолы, куда заранее была загружена карбамидоформальдегидная смола и включен электродвигатель с мешалкой. Готовая модифицированная смола выгружается из реактора.

Определение свободного формальдегида в КФ смоле. 2 г КФ смолы растворяют в 55 см^3 дистиллированной воды и добавляют 5 см^3 раствора гидроксида натрия или гидроксида калия с массовой долей 30 %. Определение свободного формальдегида проводят на pH-метре – милливольтметре рН-340 с платиновым и проточным хлорсеребряным электродами, при этом переключатель «размах» устанавливают в положение «1500 mV», а переключатель «род работы» – в положение «-mV». В стакан с раствором смолы или лака погружают электроды pH-метра и при перемешивании титруют раствором гидроксиламина гидрохлорида концентрации 0,1 моль/л (0,1 н.) до скачка потенциала (когда стрелка не вернется в крайнее левое положение). В конце титрования раствор гидроксиламина гидрохлорида приливают по каплям. Массовую долю свободного формальдегида в смоле или лаке X в процентах вычисляют по формуле: $X=0,15V$, где V – объем раствора гидроксиламина гидрохлорида концентрации 0,1 моль/л (0,1 н.), израсходованный на титрование см^3 . За результат испытания принимают среднеарифметическое результатов двух параллельных определений.

Определение условной вязкости при $(20,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ по вискозиметру ВЗ-246 с соплом диаметром 6 мм. Вискозиметр помещаем в штатив и с помощью уровня устанавливаем в горизонтальном положении. Под сопло вискозиметра ставим сосуд. Отверстие сопла закрываем пальцем, испытуемый материал наливаем в вискозиметр с избытком, чтобы образовался выпуклый мениск над верхним краем вискозиметра. Наполняем вискозиметр медленно, чтобы предотвратить образование пузырьков воздуха. Избыток материала и образовавшиеся пузырьки воздуха удаляем при помощи стеклянной пластинки или алюминиевого диска, сдвигаемых по верхнему краю воронки в горизонтальном направлении таким образом, чтобы не образовалось воздушной прослойки. Открываем отверстие сопла и одновременно с появлением испытуемого материала из сопла включаем секундомер. В момент первого прерывания струи испытуемого материала секундомер останавливаем и отсчитываем время ис-

течения. За результат испытания принимаем среднее арифметическое результатов не менее трех измерений времени истечения в секундах.

Определение времени желатинизации при 100°C . В стакане взвешивают 50,0 г смолы. Смола должна иметь температуру $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$. Затем в стакан пипеткой добавляют $2,5 \text{ см}^3$ водного раствора хлористого аммония концентрации 20 % (1,0 % от массы смолы в пересчете на сухой хлористый аммоний) и после тщательного перемешивания палочкой в течение 5 мин получают клеевой раствор. В пробирке взвешивают около 2,00 г приготовленного клеевого раствора и опускают ее в кипящую водяную баню так, чтобы уровень клеевого раствора в пробирке был на 10–20 мм ниже уровня воды в водяной бане. Включают секундомер. Клеевой раствор непрерывно энергично перемешивают палочкой до начала его желатинизации. За время желатинизации принимают время в секундах с момента погружения пробирки в кипящую воду до момента потери текучести клеевого раствора. За результат испытания принимают среднее арифметическое результатов двух параллельных определений, допускаемое расхождение между которыми не должно превышать 2 с.

Определение смешиваемости КФ смолы с водой. В цилиндр наливают 50 см^3 смолы и, постепенно перемешивая, добавляют 100 см^3 дистиллированной воды температурой $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$. Смесь встряхивают, при этом в ней не должен образовываться хлопьевидный осадок, не должна происходить коагуляция смолы и в течение 5 мин не должно наблюдаться расслоение.

Определение предела прочности при скалывании по клеевому слою фанеры после вымачивания образцов в воде в течение 24 ч. В стеклянный или фарфоровый стакан помещают 500–600 г смолы, добавляют 5–6 г (1 %) тонко измельченного хлористого аммония и тщательно перемешивают. В смолу добавляют древесную муку в количестве 1–3 % от массы смолы.

Из шпона вырезают двенадцать листов размером не менее 240×240 мм и собирают четыре трехслойных пакета. Для этого на лист шпона, предназначенный для внутреннего слоя пакета, равномерным слоем наносят $90\text{--}100 \text{ г/м}^2$ клея и на него с двух сторон накладывают по одному листу сухого шпона при взаимно перпендикулярном расположении волокон. Из четырех трехслойных пакетов комплектуют общий пакет, помещают его в пресс, температура плит которого $125\text{--}130^\circ\text{C}$, и выдерживают под давлением $1,8\text{--}2,0 \text{ МПа}$ ($180\text{--}200 \text{ Н/см}^2$) в течение 5,5 мин. Через 24 ч из каждого трехслойного пакета вырезают по шесть образцов и на 24 ч помещают для вымачивания в ванну с водой при $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$. После вымачивания образцы выкладывают на фильтровальную бумагу и через 10 минут испытывают.

Приспособление для испытания образцов укрепляют в захватах испытательной машины так, чтобы вертикальная ось приспособления совпала с осями захватов машины. Образец устанавливают в приспособлении так, чтобы его лицевая сторона плотно прилегала к упорной планке приспособления с одинаковой силой прижима для каждого образца. Оси образца должны совпадать с осями приспособления. Изготовленные образцы закреп-

ляют так, чтобы зажимные губки захватили их не далее чем на 5 мм от пропилов. Образец нагружают равномерно с постоянной скоростью нагружения или с постоянной скоростью перемещения нагружающей.

За результат испытания принимают наименьшее значение показателя при разрушении по клеевому слою. Результат испытания не учитывают, если разрушение произошло по древесине и показатель ниже нормы, предусмотренной настоящим стандартом.

Заключение

В результате лабораторных экспериментов была разработана лабораторная установка для удаления формальдегида из КФ смол и подобраны оптимальные условия проведения процесса: рекомендуемый интервал pH составляет 3,5...4,0, температуру реко-

мендуется поддерживать в интервале 20–40 °С, количество гидросульфита натрия должно составлять 1,5...1,75 от стехиометрического соотношения, процесс рекомендуется проводить при атмосферном давлении. На основании лабораторных экспериментов разработан способ удаления свободного формальдегида из КФ смолы, составлена технологическая схема процесса и подобрано необходимое оборудование. Разработанная технологическая схема позволяет получить КФ смолу с низким содержанием формальдегида без ухудшения эксплуатационных свойств. В разработанной технологии не применяются катализаторы и дорогостоящие реагенты, отсутствуют отходы, а процесс проводится на доступном технологическом оборудовании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Roffael E., Behn C., Schneider T., Krug D. Bonding of recycled fibres with urea-formaldehyde resins. *International Wood Products Journal*, 2016, vol. 7, no. 1, pp. 36–45.
2. Osemeahon S.A., Barminas J.T., Aliyu B.A., Maina H.M. Development of amino resins for emulsion paint formulation: effect of aldehydic group and degree of substitution. *African Journal of Biotechnology*, 2007, vol. 6, no. 22, pp. 2532–2540.
3. Tsubota T., Takenaka K., Murakami N., Ohno T. Performance of nitrogen- and sulfurcontaining carbon material derived from thiourea and formaldehyde as electrochemical capacitor. *Journal of Power Sources*, 2011, vol. 196, no. 23, pp. 10455–10460.
4. Sun G., Ma L., Ran J., Li B., Shen X., Tong H. Templated synthesis and activation of highly nitrogen-doped worm-like carbon composites based on melamine-urea-formaldehyde resins for high performance supercapacitors. *Electrochimica Acta*, 2016, vol. 194, pp. 168–178.
5. Ibrahim D.M., Abu-Ayana Y.M. Preparation of nano alumina via resin synthesis. *Materials Chemistry and Physics*, 2009, vol. 113, no. 2–3, pp. 579–586.
6. Senkal B.F., Yavuz E. Ureasulfonamide polymeric sorbent for selective mercury extraction. *Monatshfte für Chemie*, 2006, vol. 137, no. 7, pp. 929–934.
7. Nektarios P.A., Nikolopoulou A.-E., Chronopoulos I. Sod establishment and turfgrass growth as affected by urea-formaldehyde resin foam soil amendment. *Scientia Horticulturae*, 2004, vol. 100, no. 1–4, pp. 203–213.
8. Zhang D.-X., Li B.-X., Zhang X.-P., Zhang Z.-Q., Wang W.-C., Liu F. Phoxim microcapsules prepared with polyurea and ureaformaldehyde resins differ in photostability and insecticidal activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2016, vol. 64, no. 14, pp. 2841–2846.
9. Ghani A., Ashaari Z., Bawon P., Lee S.H. Reducing formaldehyde emission of urea formaldehyde-bonded particleboard by addition of amines as formaldehyde scavenger. *Building and Environment*, 2018, vol. 142, pp. 188–194.
10. Wang S.M., Shi J.Y. Study on curing characteristics of low-toxicity urea-formaldehyde resin. *Advanced Materials Research*, 2011, vol. 393–395, pp. 1447–1450.
11. Pang J.Y., Sun C., Zhang S.C., Cui H.X. Study on modification of urea formaldehyde resin with keratin. *Advanced Materials Research*, 2010, vol. 113–116, pp. 1787–1791.
12. Dazmiri M.K., Kiamahalleh M.VOL., Dorieh A., Pizzi A. Effect of the initial F/U molar ratio in urea-formaldehyde resins synthesis and its influence on the performance of medium density fiberboard bonded with them. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2019, vol. 95, pp. 102440.
13. Akinyemi B.A., Olamide O., Oluwasogo D. Formaldehyde free particleboards from wood chip wastes using glutaraldehyde modified cassava starch as binder. *Case Studies in Construction Materials*, 2019, vol. 11, p. e00236.
14. Yu Y., Xu P., Chen C., Chang J., Li L. Formaldehyde emission behavior of plywood with phenol-formaldehyde resin modified by bio-oil under radiant floor heating condition. *Building and Environment*, 2018, vol. 144, pp. 565–572.
15. Cheng Y., Tian Q.K., Li R. The Utilization of Phenol Components in Bio-Oil for Modifying Urea-Formaldehyde Resin Adhesive. *Advanced Materials Research*, 2015, vol. 1096, pp. 209–213.
16. Valarelli I.D., Batistelle R.A.G., Branco L.A.M.N., Chahud E., Christoforo A.L., Rocco Lahr F.A., Bezerra B.S. Evaluation of bamboo particleboards produced with urea-formaldehyde resin. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 1025–1026, pp. 432–435.
17. Chen G.H., Han J., Zhang X.H. Study on synthetic process of low toxic urea-formaldehyde resin. *Advanced Materials Research*, 2012, vol. 621, pp. 79–82.
18. Despres A., Pizzi A., Vu C., Delmotte L. Colourless formaldehyde-free urea resin adhesives for wood panels. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2010, vol. 68, pp. 13–20.
19. Wen M., Zhu L., Zhang Y., Tan H., Gu J. Activator of urea-formaldehyde resin adhesive with expediting setting and low-formaldehyde-emission. *Linye Kexue/Scientia Silvae Sinicae*, 2016, vol. 52, pp. 99–105.
20. Pereira F., Pereira J., Paiva N., Ferra J., Martins J.M., Magalhães F.D., Carvalho L. Natural Additive for Reducing Formaldehyde Emissions in Urea-Formaldehyde Resins. *Journal of Renewable Materials*, 2016, vol. 4, no. 1, pp. 41–46.
21. Wang B., Zhang Y., Tan H., Gu J. Melamine-urea-formaldehyde resins with low formaldehyde emission and resistance to boiling water. *Pigment & Resin Technology*, 2019, vol. 48, pp. 229–236.
22. Gangi M., Tabarsa T., Sepahvand S., Asghari J. Reduction of formaldehyde emission from plywood. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2013, vol. 27, pp. 1407–1417.

Поступила: 03.11.2021 г.

Информация об авторах

Липин К.В., кандидат химических наук, доцент кафедры химической технологии и защиты окружающей среды Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова.

Федосеев С.В., кандидат химических наук, доцент кафедры органической и фармацевтической химии Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова.

Кизяев Д.А., главный технолог ПАО «Химпром».

UDC 665.939.56

TECHNOLOGY FOR REMOVING FREE FORMALDEHYDE FROM UREA-FORMALDEHYDE RESINS

Konstantin V. Lipin¹,
lipinkost@mail.ru

Sergey V. Fedoseev¹,
sergey.fedoseev88@gmail.com

Denis A. Kizyaev²,
denis.kizyaev@yandex.ru

¹ Chuvash State University,
15, Moskovskiy avenue, Cheboksary, 428015, Russia.

² PJSC «Khimprom»,
101, Promyshlennaya street, Novocheboksarsk, 429965, Russia.

The relevance of the study is caused by high danger of technogenic emission of formaldehyde into the environment. The main anthropogenic source of formaldehyde is the production of particle board, which uses urea-formaldehyde resins. The paper proposes a technology for removing free formaldehyde from urea-formaldehyde resins, which will increase the safety and environmental friendliness of products based on them. The results of the work will make it possible to safely utilize and make the most optimal use of the available geo-resources, thereby solving one of the main tasks of geoecology.

The aim of this work is to develop a method for reducing the toxicity of urea-formaldehyde resins by removing free formaldehyde.

Objects: urea-formaldehyde resins characterized by the possibility of formaldehyde emission.

Methods: modeling of the optimal process parameters; laboratory methods for formaldehyde removal; laboratory methods for studying the physical and mechanical properties of the modified urea-formaldehyde resin; modeling the required equipment and technological scheme.

Results. The authors have developed the laboratory installation to remove formaldehyde from urea-formaldehyde resins and selected the optimal conditions for the process: the recommended pH range is 3,5...4,0, the temperature is recommended to be maintained in the range of 20–40 °C, the amount of sodium hydrosulfite should be 1,5...1,75 of the stoichiometric ratio, the process is recommended to be carried out at atmospheric pressure. On the basis of a laboratory setup, a technological scheme for production of environmentally friendly urea-formaldehyde resins, consisting of two stages: the preparation of the sodium hydrosulfite reagent and its interaction with urea-formaldehyde resin, was developed. The necessary main and auxiliary equipment was selected for the technological scheme. The process requires two jacketed reactors with a stirrer, three dosing pumps and a hydrochloric acid storage tank. Within the framework of this study, the investigation of the physical and mechanical properties of the modified urea-formaldehyde resin was carried out. The results obtained deviate somewhat from the results of the study of the original urea-formaldehyde resin, but are within the permissible limits.

Key words:

Formaldehyde, urea-formaldehyde resins, formaldehyde emission, formaldehyde removal, modification of urea-formaldehyde resin.

Information about the authors

Konstantin V. Lipin, Cand Sc., associate professor, Chuvash State University.

Sergey V. Fedoseev, Cand Sc., associate professor, Chuvash State University.

Denis A. Kizyaev, chief engineer, PJSC «Khimprom».

Received: 3 November 2021.

УДК 339.13:546.86

ОБЗОР СОСТОЯНИЯ СУРЬМЯНОЙ ОТРАСЛИ РОССИИ

Хатьков Виталий Юрьевич^{1,2},
V.Khatkov@adm.gazprom.ru

Боярко Григорий Юрьевич¹,
gub@tpu.ru

Болсуновская Людмила Михайловна¹,
bolsunovskl@tpu.ru

Дибров Артём Михайлович³,
dibrov5@yandex.ru

Ткачева Евгения Владимировна¹,
belayaev@tpu.ru

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

² ПАО «Газпром»,
Россия, 196143, г. Санкт-Петербург, пл. Победы, 2.

³ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.

Актуальность работы обусловлена наличием противоречия экспортного товарного потока добываемого сурьмяного сырья и тотальной импортозависимости России по товарным сурьмяным продуктам.

Цель: изучение динамики товарных потоков (производства, импорта, экспорта, потребления) сурьмяного сырья в России, его цен (мировых и российских), сырьевой базы сурьмы России и перспектив ее национальной добычи и переработки.

Методы: статистический, графический, логический.

Результаты. Являясь одним из мировых лидеров добычи сурьмяного сырья (до 26 тыс. т/год), Россия практически не ведет его переработку и импортирует до 1 тыс. т/год металлической сурьмы и до 2 тыс. т/год оксидов сурьмы. Вывоз сурьмяного сырья превышает ввоз товарных сурьмяных продуктов в 1,9...8,4 раза. Сурьма в России является стратегическим видом минеральных продуктов с достаточной минерально-сырьевой базой и одновременно критическим продуктом ввиду тотальной импортозависимости при потреблении. Необходимо создание национального перерабатывающего сурьмяного производства с выпуском сурьмяных продуктов с большей прибавочной стоимостью. Текущая добыча сурьмяного сырья (месторождения Сарылах, Олимпиадинское) многократно перекрывает внутреннюю потребность в сурьмяных товарных продуктах. Возможно расширение добычи сурьмы путем вовлечения в эксплуатацию законсервированных (Сентачан, Жипкоша) и новых месторождений (Солонеченское), а также увеличение минерально-сырьевой базы за счет поисковых и геологоразведочных работ, в первую очередь, в пределах Восточно-Забайкальской и Сарылах-Сентачанской сурьмяноносных провинций. Возможно улучшение технологий переработки сурьмяного сырья (энергосбережения, гидрометаллургии, биоокисления) с целью снижения операционных издержек и повышения экологической безопасности производства сурьмяных продуктов.

Ключевые слова:

Сурьмяное сырье, экспорт сырья, импортозависимость, критический товарный продукт, минерально-сырьевая база, проекты.

Сурьма используется преимущественно для упрочнения свинцовых сплавов (в производстве аккумуляторов, оболочек кабелей и других изделий), а также при производстве антипиренов (огнестойких материалов), входящих в состав пластмасс и пропитку тканей [1]. В настоящее время увеличивается востребованность сурьмяных продуктов и в других направлениях использования с растущим спросом – в производстве солнечных батарей перовскитового типа [2] и фотокатализаторов [3], термоэлектрических элементов [4, 5], ионно-калиевых батарей [6] и электрокатализаторов окисления при утилизации органических отходов [7, 8].

В мировом предложении сурьмяного сырья (до 195 тыс. т 100 % Sb/год) лидируют Китай (55...79 % рынка), Россия (10...18 %) и Таджикистан (10...17 %) [9]. Добыча небольших объемов сурьмяного сырья

осуществляется также в Австралии, Боливии, Турции и Мьянме. Переработка на металлическую сурьму и ее триоксид осуществляется на основе собственного сырья в Китае и Боливии, а на импортном – в Киргизии, США, Франции и Бельгии [10]. Сурьмяные продукты как критические импортозависимые материалы заявлены в США [11] и Европейском Союзе [12].

В период плановой экономики СССР производилось до 20 тыс. т/год сурьмяной продукции [13]. Единым центром переработки сурьмяных руд и концентратов являлся Кадамжайский сурьмяный комбинат, построенный на сырьевой базе месторождений сурьмы Киргизии и Таджикистана. Даже богатые золото-сурьмяные руды и концентраты весьма отдаленных месторождений в Якутии для переработки вывозились в Киргизию. Переработка сурьмяного сырья осуществлялась преимуще-

ственно пирометаллургическим способом по энергозатратной технологии процесса Нидершлага [1, 14].

Промышленные типы *месторождений сурьмы* представлены двумя геологическими и технологическими типами: собственно сурьмяными (стибнитовыми или антимонитовыми) и золото-сурьмяными рудами [1, 10].

На территории России до 1990-х гг. в разработке находились только два собственно сурьмяных месторождения – Сарылахское (с 1972 г.) и Сентачанское (с 1989 г.) в Республике Саха (Якутия) (рис. 1). В 1980-е–90-е гг. на них производилось 16...22 тыс. т/год сурьмяного концентрата, содержащего 9...12 тыс. т сурьмы [15].



Рис. 1. Месторождения сурьмы, добывающие предприятия и предприятия, перерабатывающие и потребляющие сурьмяное сырье: 1 – сурьмяные провинции (I – Северо-Енисейская, II – Восточно-Забайкальская, III – Сентачан-Сарылахская); 2 – месторождения сурьмы (a – запасы свыше 15 тыс. т Sb, b – запасы и ресурсы менее 15 тыс. т Sb); 3 – горнодобывающие предприятия (a – действующие, b – остановившие производство); 4 – предприятия по переработке сурьмяного минерального сырья; 5 – предприятия по переработке вторичной сурьмы; 6 – предприятия по производству антипиренов; 7 – предприятия по выпуску сурьмяно-свинцовых аккумуляторов

Fig. 1. Antimony deposits, extractive and processing plants and plants producing and consuming antimony raw materials: 1 – antimony provinces (I – North Yenisei, II – East Transbaikal, III – Sentachan-Sarylakh); 2 – antimony deposits (a – stocks over 15 thousand tons of Sb, b – stocks and resources less than 15 thousand tons of Sb); 3 – mining plants (a – operational, b – halted production); 4 – plants processing antimony mineral raw materials; 5 – plants processing secondary antimony; 6 – plants producing fire retardants; 7 – plants producing antimony-lead batteries

Разработку Сарылахского месторождения осуществляет АО «Сарылах-Сурьма». В 2007 г. по экономическим причинам была остановлена добыча на Сентачанском месторождении [16]. В 2006 г. компанией ООО «Хара-Шибирский сурьмяной комбинат» начата добыча сурьмяных руд на Жипкошинском месторождении в Забайкальском крае с выпуском концентрата до 1,5 тыс. т/год [17]. В 2020 г. на Олимпиадинском ГОКе (ПАО «Полус») в Красноярском крае началась попутная добыча сурьмяной продукции из неокисленных первичных руд одноименного золото-рудного месторождения с реализацией свыше 1,0 тыс. т/год сурьмяного сырья [17].

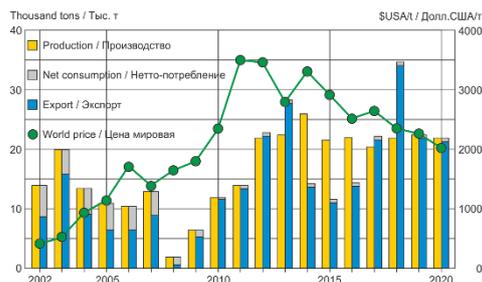
Национальные объемы добычи сурьмяного концентрата в 2002–2007 гг. составляли 11...20 тыс. т/год, но в кризисный 2008 г. они просели до 2 тыс. т, после на фоне роста экспортных цен объемы реализации возросли до 22 тыс. т в 2012 г. и остаются на этом уровне (22...26 тыс. т/год) в дальнейшем (рис. 2). Качество выпускаемого сурьмяного концентрата коле-

балось в широких пределах – от 60 до 30 % Sb_2O_3 . Импорт сурьмяного концентрата практически отсутствует.

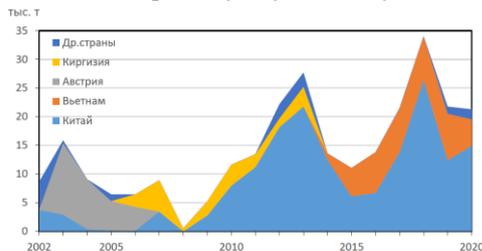
Национальное потребление в период низких цен на сурьмяный концентрат 2002–2007 гг. составляло 4,0...5,3 тыс. т/год, но после увеличения его экспортных цен оно упало до 0,4 тыс. т в 2010 г. и находится на уровне 0,6...0,7 тыс. т/год в последующие годы.

Предприятия по переработке сурьмяных концентратов в России до 1990-х гг. отсутствовали, но в дальнейшем небольшие объемы производства металлической сурьмы были созданы на базе Бурктинского никелевого завода в Оренбургской области (ООО «Саха-Уральский сурьмяный завод», работал до 2003 г.), а в НПЦ «Электрум» (Новосибирская обл.) – трехокси сурьмы и металлической сурьмы. В 2020 г. АО «Уралэлектромедь» (предприятие металлургического комплекса УГМК) подготовило к эксплуатации опытный участок по производству металлической сурьмы (до 200 т/год).

Балансы/Balances



Объемы экспорта по странам-покупателям
Exports by buyer country



В динамике цен на сурьмяный концентрат следует отметить, что в период 2004–2007 гг. цены экспорта (353...744 \$США/т) были значительно ниже (–40...–80 %) среднемировых цен. Поэтому оставался выгодным частичный передел сурьмяного концентрата на необходимые национальные потребности. В дальнейшем экспортные цены выросли к 2011 г. до 3878 \$США/т, а к 2020 г. снизились до 2038 \$США/т, при этом разница с мировыми ценами снизилась (–6...–33 %), и это с учетом включения в его стоимость золота и серебра, содержащегося в сырье.

Если в 2002–2007 гг. на экспорт отправлялось 59...67 % произведенного сурьмяного концентрата, то в дальнейшем его доля увеличилась до 90...100 %. В 2003–2006 гг. основные поставки шли в Австрию (63...96 %), а затем лидерство покупок возглавил Китай (52...92 %) и Вьетнам (22...52 %). В 2006–2011 гг. имели место экспортные поставки в Киргизию (7...62 %).

Стоимость экспорта сурьмяного концентрата в 2002–2007 гг. была относительно небольшой (3,1...6,1 млн \$США/год), но рост цен привел к ее увеличению до максимума 65,6 млн \$США в 2012 г. и сохранению высокого уровня стоимости в последующем периоде (23...48 млн \$США/год).

Национальное потребление оксидов сурьмы невелико и составляет 1...2 тыс. т/год (рис. 3). Производство же этого продукта составляло в 2002–2007 гг. 0,5...0,8 тыс. т/год, в последующие годы – до 0,2 тыс. т/год. Большая часть потребностей в оксидах сурьмы обеспечивалась по импорту: 0,2...0,9 тыс. т/год в 2002–2007 гг. (4...56 % от потребления), в последующие годы – 1,0...2,0 тыс. т/год (100 % от потребления). Импорт осуществляется в основном из Китая (40...100 %), Боливии (22...49 %) и Бельгии (до 27 %). Экспорт оксидов сурьмы был довольно значимым в 2002–2007 гг. (0,2...0,7 тыс. т/год, или 28...100 % от производства) и исчезающе малым в последующие годы.

Цены/Prices

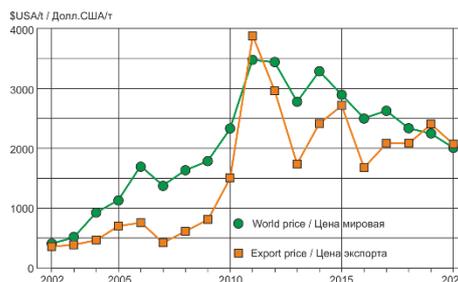


Рис. 2. Динамика показателей товарных потоков сурьмяных руд и концентратов за 2002–2020 гг. Составлено по данным Росстата [18], Федеральной таможенной службы РФ [19] и TrendEconomy [20]

Fig. 2. Dynamics of indicators of antimony ore commodity flow and its concentrates for 2002–2020. Compiled from Federal State Statistics Service RU [18], the Federal Customs Service RU [19] and TrendEconomy [20]

В динамике мировых цен на оксиды сурьмы повторяются тренды цен на сурьмяный концентрат – рост с 1550 \$США/т в 2002 г. до 11325 \$США/т в 2011 г. и последующее снижение до 5300 \$США/т в 2020 г. Если в 2002–2007 гг. цены российского импорта оксидов сурьмы были преимущественно ниже мировых (–10...–55 %), то в дальнейшем – на уровне мировых (–4...+8 %).

Стоимость импорта оксидов сурьмы в 2002–2008 гг. была относительно небольшой (0,1...2,1 млн \$США/год), но рост цен привел к ее увеличению до максимума 7,9 млн \$США в 2011 г., после чего наметился тренд снижения до 0,9 млн \$США в 2020 г.

Потребители оксидов сурьмы – предприятия по производству антипиренов огнезащиты – ООО «НПО «Антипирен», г. Москва, ООО «Группа «ВитаХим», г. Москва, г. Дзержинск, Нижегородская обл., г. Ростов-на-Дону, г. Краснодар, г. Пермь, г. Новосибирск, ООО «ТД «НовоХим», г. Томск.

Потребление металлической сурьмы оценивается на уровне 1,5...2,0 тыс. т/год, при этом предложение первичной металлической сурьмы находится на уровне 0,2...0,5 тыс. т/год (рис. 4). Как и для оксидов сурьмы производство этого металла медленно сокращалось с 0,7 тыс. т в 2002 г. до 0,1 тыс. т в 2007 г. Этот уровень производства сохраняется до настоящего времени.

В России достаточно эффективно осуществляется утилизация свинцовых сплавов, в т. ч. содержащих сурьму [21]. Производством вторичных сплавов с сурьмой занимается множество предприятий, из которых наиболее значимые – АО «РязЦветМет», г. Рязань, АО «Метком Групп», г. Зарайск, Московская обл., АО «ПО «Цветметсервис», г. Озерск, Челябинская обл., АО «Вторсплав», г. Ульяновск, АО «Вологодский аккумуляторный завод», г. Вологда, ООО «Мост-Цветмет», г. Батайск, Ростовская обл., ООО «ТД «Эко-сплав», г. Новосибирск. Оценочно они выпускают 1,0...1,5 тыс. т/год вторичных сурьмяных сплавов.

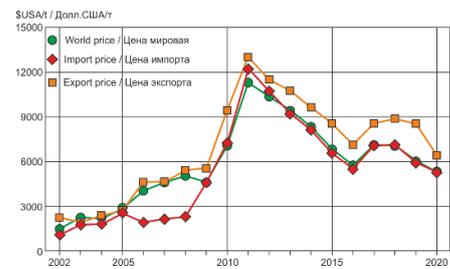
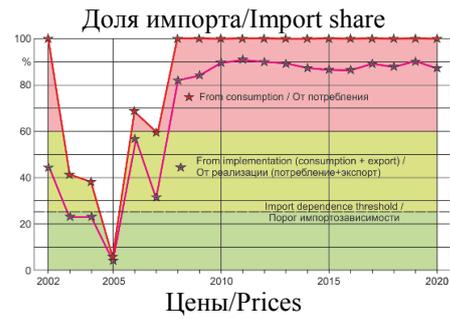
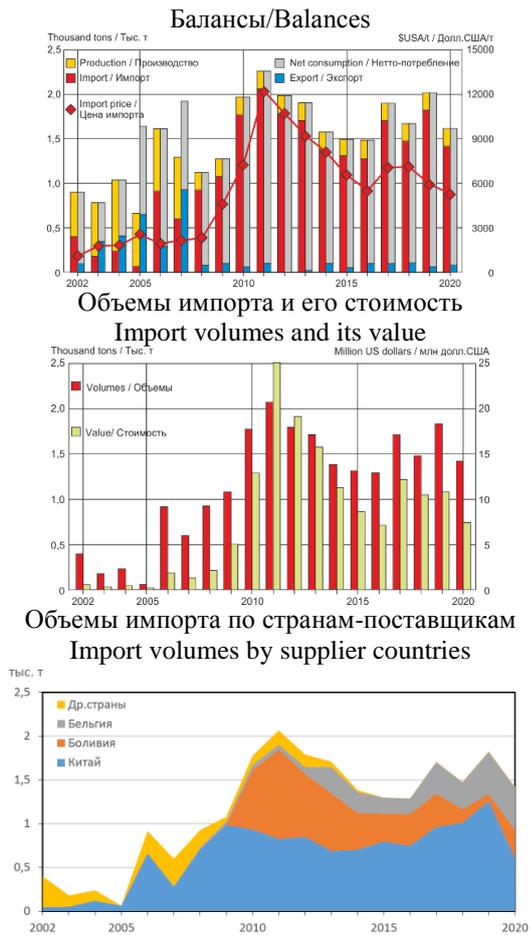


Рис. 3. Динамика показателей товарных потоков оксидов сурьмы за 2002–2020 гг. Составлено по данным Росстата [18], Федеральной таможенной службы РФ [19] и TrendEconomy [20]

Fig. 3. Dynamics of antimony oxide commodity flows for 2002–2020. Compiled from Federal State Statistics Service RU [18], the Federal Customs Service RU [19], and TrendEconomy [20]

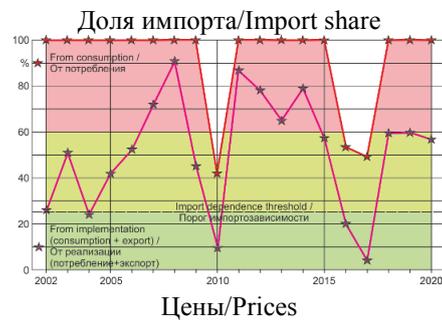
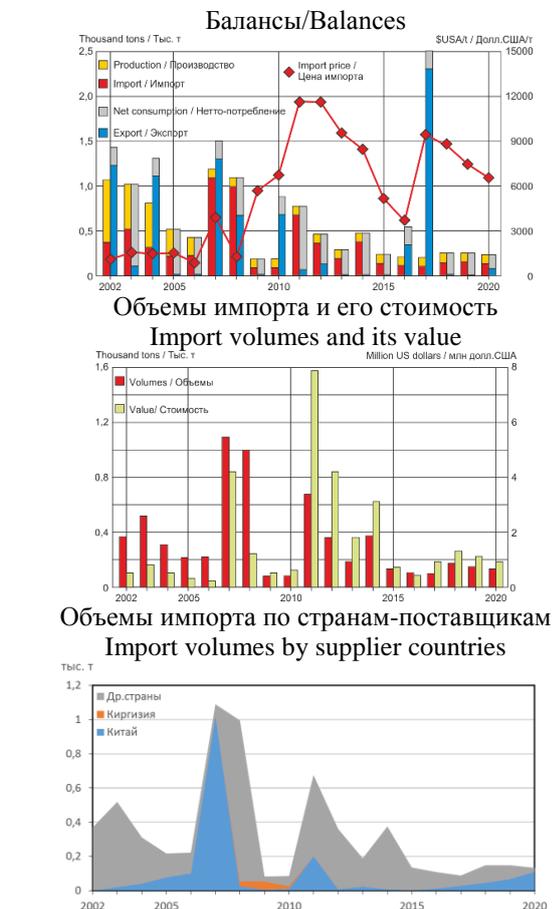


Рис. 4. Динамика показателей товарных потоков металлической сурьмы за 2002–2020 гг. Составлено по данным Росстата [18], Федеральной таможенной службы РФ [19] и TrendEconomy [20]

Fig. 4. Dynamics of indicators of metallic antimony commodity flow for 2002–2020. Compiled from Federal State Statistics Service RU [18], the Federal Customs Service RU [19], and TrendEconomy [20]

По импорту в Россию поступления металлической сурьмы неравномерны, изменяясь от 0,08 до 1,1 тыс. т/год. Объемы импорта этого металла практически весь период превышают его первичное потребление, лишь в отдельные годы составляя менее 100 %. Импорт осуществляется из разных стран, а наибольшие поставки – из Китая и Киргизии. Экспорт металлической сурьмы (преимущественно вторичного металла) составляет 0,1...2,5 тыс. т/год.

В динамике мировых цен на металлическую сурьму повторяются тренды цен на оксиды сурьмы и сурьмяный концентрат – рост с 1480 \$США/т в 2002 г. до 9200 \$США/т в 2012 г., и последующего снижения до 6700 \$США/т в 2020 г. Если в 2002–2007 гг. цены российского импорта металлической сурьмы были преимущественно ниже мировых (–20...–78 %), то в дальнейшем – преимущественно выше мировых (+10...+46 %). Величины стоимости импорта оксидов сурьмы за анализируемый период были крайне неупорядочены, как следствие переменной объемов торговли и цен на товарные продукты – от 0,2 до 7,9 млн \$США/год.

Потребители металлической сурьмы – предприятия по производству аккумуляторов – АО «Курский аккумуляторный завод», г. Курск, ООО «Рязанский аккумуляторный завод «Тангстоун», г. Рязань, АО «Тюменский аккумуляторный завод», г. Тюмень, АО «Алькор», г. Тюмень, АО «Электроисточник», г. Саратов, ООО «Аккумуляторный завод «Резерв», г. Аксай, Ростовская обл., ООО «Тубор», г. Дзержинск, Нижегородская обл., ООО «Аккумуляторные технологии», г. Свирск, Иркутская обл., АО «Электротяга», г. Санкт-Петербург.

Минерально-сырьевая база сурьмяного сырья России весьма значительна: подготовленные запасы категорий А+В+С₁ – 173 тыс. т, а и прогнозные ресурсы Р₁+Р₂+Р₃ – 737 тыс. т [22–24]. Здесь и богатые по сурьме и золоту месторождения Сентачан-Сарылахской провинции, и многочисленные средние по качеству месторождения Восточно-Забайкальской провинции, и малоизученные месторождения Северо-Енисейской провинции. В принципе, возможна до-разведка известных месторождений и проявлений сурьмы в пределах сурьмяноносных провинций, но ввиду отсутствия достаточных мощностей национальных перерабатывающих предприятий и неопределенности на мировом рынке сурьмяного концентрата новые разведочные и добывающие проекты сурьмяного сырья не очень привлекательны.

Тем не менее следует отметить проекты разработки Солонеченского сурьмяного месторождения в Восточном Забайкалье (ООО «ГРК «Солонеченское»), а также геолого-разведочные проекты на сурьмяное сырье на площадях Кимовского, Киняского и Тарынского рудных полей (Сентачан-Сарылахской провинция), а также в пределах Тьргетуй-Жипкошинской, Итака-Дарасунской и Газимуро-Приаргунской рудных зон (Восточно-Забайкальская провинция) [22, 23].

Добыча сурьмяного сырья именно как попутного полезного компонента возможна, что и осуществлено

на Олимпиадинском золоторудном месторождении (Северо-Енисейская провинция), из руд которого, несмотря на низкое среднее содержание ценного компонента (всего 0,16 % Sb), начиная с 2020 г. организовано извлечение сурьмяного материала [17]. Схожая процедура формирования цепочки извлечения попутного сурьмяного концентрата может быть организована на Холоднинском полиметаллическом месторождении в Республике Бурятия (нераспределенный фонд).

Серьезным препятствием для проектов развития национальных перерабатывающих производств сурьмяного сырья является относительно невысокая прибавочная стоимость при переработке сурьмяного концентрата на металлическую сурьму [до +72 %] и оксид сурьмы [+104...+211 %] (рис. 5), а также технологические затруднения его переработки (особенно при извлечении золота и серебра).

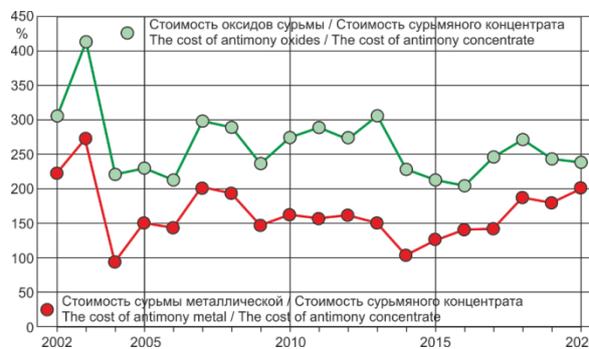


Рис. 5. Отношение стоимости конечных сурьмяных продуктов и стоимости потребного для их производства сурьмяного сырья

Fig. 5. Ratio of the cost of the final antimony products and the cost of antimony raw materials required for their production

Технологии переработки сурьмяного сырья. Сурьмяные руды традиционно называются упорными ввиду сложности их передела, в первую очередь ввиду необходимости разделения всех полезных компонентов, находящихся в составе этих руд (сурьмы, золота, свинца, меди, цинка, серебра и др.), и их рафинирования (включая собственно сурьму).

Собственно, обогащение сурьмяных руд гравитационным и флотационным способами с получением стибнитового (антимонитового) концентрата не вызывает серьезных осложнений [1, 17, 27]. Здесь возможно и улучшение показателей обогащения за счет использования методов радиометрической рудоподготовки [26, 28, 29]. Некоторая сложность возникает при обогащении окисленных сурьмяных руд за счет снижения степени раскрытия полезных минералов, но она решается с использованием специальных реагентов-собирателей [17].

Проблема переработки сурьмяного сырья на металл остается открытой. Пирометаллургический метод, несмотря на неизбежность высоких энергетических затрат, остается основным для передела сурьмяного концентрата [1, 14]. Исследования по улучшению пирометаллургических технологий направлены в

основном на снижение затрат энергии [23, 30–33] и снижение загрязнения окружающей среды [34].

Ведутся исследования по переработке сурьмяного сырья гидрометаллургией путем выщелачивания сурьмы как в агитационном варианте [35, 36], так и при кучном и подземном выщелачивании [28, 29].

Новым направлением в исследованиях по переработке сурьмяного сырья является использование биотехнологий. Это технологии и непосредственного химического выщелачивания сурьмы [37], и биоокисления сульфидов сурьмы до безвредных оксидов [38]. Последний способ нашел промышленное применение на Олимпиадинском ГОКе в Красноярском крае [39].

Экологический фактор в сурьмяной отрасли. Сурьма и ее соединения воспринимаются как высокотоксичные продукты. Пыль сурьмяного концентрата и триоксида сурьмы, а также аэрозоль металлической сурьмы относятся ко второму классу опасности. Несомненно, наличие морально и физически устаревших технологий переработки сурьмяного сырья на действующем производстве является потенциальным источником опасных загрязнений. Именно по этой причине в 2010 г. была прекращена переработка российского сурьмяного концентрата на заводе ООО «Рязцветмет».

В Китае, мировом лидере добычи сурьмяного сырья, его передела и потребления сурьмяных продуктов, в части охраны окружающей среды предложены программы стратегии управления рисками загрязнения сурьмяными продуктами [40], включающие модернизацию действующих сурьмяных производств, ужесточающие природоохранные мероприятия, а также программы ликвидации имеющихся очагов загрязнений.

Несмотря на возможность организации защищенных технологических цепочек производства и полной утилизации отходов при довольно небольших объемах потребного выпуска сурьмяных продуктов, протестная общественность все же крайне негативно реагирует на проекты строительства подобных производств. В частности, не состоялся проект строительства сурьмяного завода ООО «Национальная сурьмяная компания», г. Дегтярск, Свердловская обл., после общественных протестов в городах Асбест и Дегтярск в марте 2017 г. В то же время в России известны предприятия, которые перерабатывают вторичные содержащие сурьму материалы, и претензий по их опасности (в т. ч. потенциальной) не имеется.

На стадии проектирования добывающих и перерабатывающих производств имеются все условия по выбору наиболее «чистых» технологий добычи, обогащения и передела сурьмяного сырья (в частности – биогидрометаллургии), проектов строительства хранилищ отходов повышенной защищенности, а также систем мониторинга качества окружающей среды и защитных мероприятий при риске опасных ситуаций. Проекты геологоразведочных работ на сурьму, строительство добывающих и перерабатывающих сурьмяных предприятий реализуются и в странах с весьма высокими требованиями к охране окружающей среды – в Европейском Союзе [41] и США [9, 11]. И в России, обла-

дающей крупной минерально-сырьевой базой по сурьме, возможно организовать самостоятельное национальное производство сурьмяных товарных продуктов с более высокой прибавочной стоимостью и с соблюдением всех природоохранных требований.

Заключение

Ситуация в сурьмяной отрасли в России весьма сложная: добывающий сурьмяное сырье дивизион является *полностью экспортноориентированным*, а предприятия, потребляющие оксид сурьмы, – *только импортозависимыми*. В отношении металлической сурьмы имеется демпфер значительных объемов использования вторичной сурьмы (при утилизации свинцовых аккумуляторов) до 1,5 тыс. т/год, но имеется также импортный поток первичной металлической сурьмы до 1 тыс. т/год. Таким образом, и по металлической сурьме имеется *значительная импортозависимость*.

Налицо перекос избыточного экспорта сурьмяного сырья из России при наличии внутреннего потребления промежуточных сурьмяных продуктов (оксидов сурьмы и металлической сурьмы), причем вывоз сырья превышает ввоз промпродуктов в 1,9...8,4 раза (в пересчете на 100 % Sb) (рис. 6).

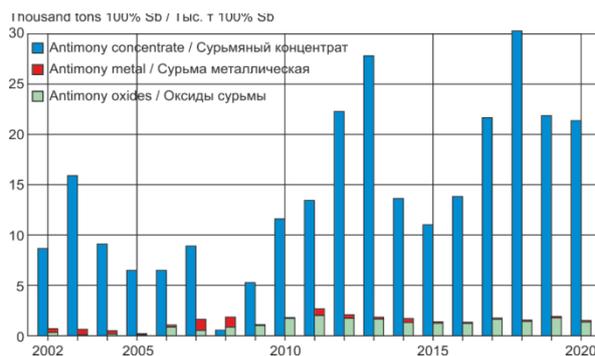


Рис. 6. Объемы экспорта сурьмяного сырья и импорта сурьмяных продуктов в пересчете на 100 % Sb. Составлено по данным Федеральной таможенной службы РФ [18]

Fig. 6. Export volume of antimony raw materials and import volume of antimony products in terms of 100 % Sb. Compiled according to the data of the Russian Federal Custom Service [18]

Необходимо создание новых достаточных объемов производства оксидов сурьмы и металлической сурьмы в рамках интеграции или кооперации компаний, ныне осуществляющих только добычу сурьмяного сырья. Передельное производство оксидов сурьмы и металлической сурьмы может быть организовано вблизи добывающих рудников (при наличии достаточности энергетических ресурсов и обеспеченности квалифицированного персонала) или, учитывая небольшие объемы достаточно ценного добываемого сурьмяного сырья, в любом удобном месте урбанизированной промышленной инфраструктуры России.

Возможно и улучшение технологий переработки сурьмяного сырья (особенно это актуально для золотосодержащих концентратов) с целью снижения опе-

рациональных издержек и повышения экологической безопасности производства сурьмяных продуктов.

В части воспроизводства минерально-сырьевой базы сурьмы России возможна доразведка известных месторождений и проявлений сурьмы в пределах сурьяноносных провинций: в первую очередь в пределах Сентачан-Сарылахской и Восточно-Забайкальской провинций. Поисковые работы на сурьму возможны не только в пределах известных сурьяноносных провинций, но и на других территориях, где известны

проявления сурьмы (Приморский и Хабаровский край, Хакассия, Северный Кавказ).

Возможна расконсервация ранее работавших рудников на месторождениях сурьмы Сентачан и Жипкоша, а также реализация новых проектов разработки месторождений Солонеченское (Восточно-Забайкальская провинция) и Ким (Сентачан-Сарылахская провинция).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-28-01742).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федорчук В.П. Минеральное сырье. Сурьма. Справочник. – М.: Геоинформмарк, 1998. – 34 с.
2. Bismuth-antimony mixed double perovskites Cs₂AgBi_{1-x}Sb_xBr₆ in solar cells / M. Pantaler, S. Olthof, K. Meerholz, D.C. Lupascu // *MRS Advances*. – 2019. – Т. 4. – В. 64. – P. 3545–3552. DOI: 10.1557/adv.2019.404.
3. Ertl M., Wöß E., Knör G. Antimony porphyrins as red-light powered photocatalysts for solar fuel production from halide solutions in the presence of air // *Photochemical and Photobiological Sciences*. – 2015. – V. 14. – № 10. – P. 1826–1830. DOI: 10.1039/c5pp00238a.
4. Realizing high-efficiency power generation in low-cost PbS-based thermoelectric materials / B. Jiang, X. Liu, Q. Wang, J. Cui, B. Jia, Y. Zhu, J. Feng, Y. Qiu, M. Gu, Z. Ge, J. He // *Energy and Environmental Science*. – 2020. – V. 13. – № 2. – P. 579–591. DOI: 10.1039/c9ee03410b.
5. Kumari M., Sharma Y.C. Effect of alternate layers of Bi₂Te₃-Sb₂Te₃ thin films on structural, optical and thermoelectric properties // *Chalcogenide Letters*. – 2020. – V. 17. – № 2. – P. 59–67.
6. Cheng G.-Z., Liu S., Wang H.-L. Potential high-performance anode material for potassium ion batteries: Antimony // *Chinese Journal of Applied Chemistry*. – 2021. – V. 38. – № 2. – P. 170–180. DOI: 10.19894/j.issn.1000-0518.200243.
7. Influence of the Sb content in Ti/SnO₂-Sb electrodes on the electrocatalytic behaviour for the degradation of organic matter / D. Lim, Y. Kim, D. Nam, S. Hwang, S.E. Shim, S.-H. Baek // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – V. 197. – P. 1268–1274. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.06.301.
8. Subba Rao A.N., Venkatarangaiah V.T. Preparation, characterization, and application of Ti/TiO₂-NTs/Sb-SnO₂ electrode in photo-electrochemical treatment of industrial effluents under mild conditions // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2018. – V. 25. – № 12. – P. 11480–11492. DOI: 10.1007/s11356-017-1179-4.
9. Klochko K. Antimony [advance release] 2017 Minerals Yearbook. – Reston, Virginia: U.S. Geological Survey. – 2021. – 11 p. URL: antimony 2017 (amazonaws.com) (дата обращения: 10.01.2022).
10. Комин М.Ф., Ключарев Д.С., Волкова Н.М. Минерально-сырьевая база сурьмы в России: проблемы и решения // *Разведка и охрана недр*. – 2006. – № 9–10. – С. 26–29.
11. Critical mineral resources of the United States – economic and environmental geology and prospects for future supply / K.J. Schulz, J.H. de Young, R.R. Seal, D.C. Bradley. – Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2017. – 862 p. URL: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/pp1802> (дата обращения: 10.01.2022).
12. Martins F.F., Castro H. Raw material depletion and scenario assessment in European Union – a circular economy approach // *Energy Reports*. – 2020. – V. 6. – P. 417–422. DOI: 10.1016/j.egyr.2019.08.082.
13. Усова Т.Ю., Бугтов В.А., Иванов В.С. Состояние и перспективы развития минерально-сырьевой базы России // *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. – 1998. – № 1. – С. 4–12.
14. Basag S.P., Turan A., Yucel O. An investigation on antimony production by using Niederschlag process // *TMS Annual Meeting. 7th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing*. Code 121635. – 2016. – P. 117–121. DOI: 10.1002/9781119274643.ch15.
15. Тенденции добычи и производства сурьмы в Республике Саха (Якутия) / Г.Ф. Безносков, Р.Р. Ноговицин, В.А. Шерстов, Е.П. Жирков // *Горная промышленность*. – 2005. – № 6 (64). – С. 59–62.
16. Батугина Н.С., Катюжан Л.Л. Минерально-сырьевые ресурсы в экономике Республики Саха (Якутия) // *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. – 2009. – № 5. – С. 51–58.
17. Михеев Г.В., Богйдаев С.А. Линия обогащения оксидных форм сурьмы на примере месторождения «Жипкоша» // *Вестник Забайкальского государственного университета*. – 2021. – Т. 27. – № 5. – С. 36–43.
18. Федеральная служба государственной статистики России. URL: <https://gks.ru/emiss> (дата обращения: 10.01.2022).
19. Федеральная таможенная служба России. URL: <http://stat.customs.gov.ru/analysis> (дата обращения: 10.01.2022).
20. TrendEconomy. URL: [dataexplorer \(trendeconomy.ru\)](http://dataexplorer.trendeconomy.ru) (дата обращения: 10.01.2022).
21. Шустров А.Ю., Денисов В.В. Комплексная технология производства свинца и сурьмы // *Цветные металлы*. – 2004. – № 10. – С. 37–40.
22. Минерально-сырьевая база сурьмы – проблемы и пути развития / М.Ф. Комин, Т.А. Блинова, Н.М. Волкова, Д.С. Ключарев // *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. – 2011. – № 6. – С. 19–29.
23. Спорыхина Л.В., Орлова Н.И., Быховский Л.З. Минерально-сырьевая база цветных металлов: перспективы развития и освоения // *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. – 2013. – № 5. – С. 99–118.
24. Состояние минерально-сырьевой базы цветных металлов (олово, вольфрам, молибден, сурьма и алюминиевое сырье) / Л.В. Спорыхина, А.В. Акимова, М.В. Данилин, Л.И. Ремизова // *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. – 2017. – № 4. – С. 19–27.
25. Павленко Ю.В., Поляков О.А. Восточно-Забайкальская сурьяная провинция // *Вестник Читинского государственного университета*. – 2010. – № 9 (66). – С. 77–84.
26. Павленко Ю.В. Геолого-технологический прогноз: Кочковское золото-сурьянное месторождение // *Вестник Забайкальского государственного университета*. – 2012. – № 12 (91). – С. 129–139.
27. Евдокимов С.И., Дациев М.С., Подковыров И.Ю. Разработка новой схемы и способа флотации руд Олимпиадинского месторождения // *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*. – 2014. – № 1. – С. 3–11.
28. Поляков О.А., Павленко Ю.В. Совершенствование процессов рудоподготовки основных типов сурьяных месторождений Восточного Забайкалья // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2012. – № S1-1. – С. 243–257.
29. Поляков О.А. Перспективы освоения сурьяных руд Восточного Забайкалья с использованием методов радиометрической рудоподготовки и кучного выщелачивания ценного компонента из хвостов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2014. – № S. – С. 137–143.
30. Myzenkov F.A., Tarasov A.V. Development and creation of modern metallurgical technology for antimony production with gold recovery from domestic gold-antimony concentrates in Russia // *TMS Fall Extraction and Processing Division: Sohn International Symposium*. – San Diego, California, 2006. – V. 4. – P. 121–128. – Code 68886.

31. Padilla R., Chambi L.C., Ruiz M.C. Antimony production by carbothermic reduction of stibnite in the presence of lime // *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*. – 2014. – V. 50. – № 1. – P. 5–13. DOI: 10.2298/JMMB130604003P.
32. Galevsky G.V., Rudneva V.V., Galevsky S.G. Melting of crude antimony in the low-tonnage production // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Novokuznetsk: 20th International Scientific and Research Conference – Metallurgy: Technologies, Innovation, Quality, Metallurgy. Code 141585*. – 2018. – V. 411. – № 119. – Article number 012021. DOI: 10.1088/1757-899X/411/1/012021.
33. Способ переработки золотосодержащего сурьмяного концентрата и линия для его осуществления: пат. Рос. Федерация, № 2692135 С1, заявл. 03.09.2018; опубл. 21.06.2019 Бюл. № 18. – 13 с.
34. Separation of antimony from a stibnite concentrate through a low-temperature smelting process to eliminate SO₂ emission / J.-G. Yang, C.-B. Tang, Y.-M. Chen, M.-T. Tang // *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*. – 2011. – V. 42. – № 1. – P. 30–36. DOI: 10.1007/s11663-010-9453-6.
35. Zekavat M., Yoozbashizadeh H., Khodaei A. Leaching of antimony from stibnite ore in KOH solution for sodium pyroantimonate production: systematic optimization and kinetic study // *JOM*. – 2021. – V. 73. – № 3. – P. 903–912. DOI: 10.1007/s11837-020-04531-8.
36. Исследование и оценка возможности применения различных гидрометаллургических технологий по извлечению сурьмы из флотационных концентратов ПАО «Полус» / Д.И. Головкин, Р.Э. Русалев, Д.А. Рогожников, С.С. Набойченко // *Металлургия цветных металлов: Материалы IV международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения С.И. Кузнецова*. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет, 2018. – С. 151–155.
37. Efficient reduction of antimony by sulfate-reducer enriched biocathode with hydrogen production in a microbial electrolysis cell / S.R.B. Arulmani, J. Dai, H. Li, Z. Chen, H. Zhang, J. Yan, T. Xiao, W. Sun // *Science of the Total Environment*. – 2021. – V. 77420. – Article number 145733. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.10.17580/tsm.2016.10.04.
38. Булаев А.Г., Першина Е.В., Украинцев И.В. Состояние развития современных биогидрометаллургических технологий и перспективы их использования в России // *Цветные металлы*. – 2016. – № 10 (886). – С. 29–35. DOI: 145733.10.17580/tsm.2016.10.04.
39. Переработка золотоносных руд с применением бактериального окисления в условиях Крайнего Севера / В.К. Совмен, В.Н. Гуськов, А.В. Белый, З.П. Кузина, С.В. Дроздов, С.И. Савушкина, А.М. Майоров, М.П. Закревский. – Новосибирск: Наука, 2007. – 144 с.
40. Health and ecological risk assessment of heavy metals pollution in an antimony mining region: a case study from South China / J.-C. Fei, X.-B. Min, Z.-X. Wang, Z.-H. Pang, Y.-J. Liang, Y. Ke // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2017. – V. 24. – № 35. – P. 27573–275861. DOI: 10.1007/s11356-017-0310-x.
41. GEMAS: Geochemical background and mineral potential of emerging tech-critical elements in Europe revealed from low-sampling density geochemical mapping / P. Négrel, A. Ladenberger, C. Reimann, M. Birke, A. Demetriades, M. Sadeghi, S. Albanese, M. Andersson, R. Baritz, M.J. Batista, B. Flem, A. Bellan // *Applied Geochemistry*. – 2019. – V. 111. – Article number 104425. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2019.104425.

Поступила 02.02.2022 г.

Информация об авторах

Хатьков В.Ю., начальник департамента, ПАО Газпром; соискатель нефтегазового отделения Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Боярко Г.Ю., доктор экономических наук, кандидат геолого-минералогических наук, профессор, отделение нефтегазового дела, Инженерная школа природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Болсуновская Л.М., кандидат филологических наук, доцент, отделение иностранных языков, Школа инженерной базовой подготовки, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Дибров А.М., старший преподаватель, кафедра экономики, Экономический факультет, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники.

Ткачева Е.В., инженер, Инженерная школа природных ресурсов Администрация Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

UDK 339.13:546.86

REVIEW OF CURRENT ANTIMONY INDUSTRY POSITION IN RUSSIA

Vitaly Yu. Khatkov^{1,2},
V.Khatkov@adm.gazprom.ru

Grigory Yu. Boyarko¹,
gub@tpu.ru

Liudmila M. Bolsunovskaya¹,
bolsunovskl@tpu.ru

Artem M. Dibrov³,
dibrov5@yandex.ru

Evgeniya V. Tkacheva¹,
belayaev@tpu.ru

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

² PJSC «Gazprom»,
2, Pobedy square, St. Petersburg, 196143, Russia.

³ Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
40, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the research is conditioned by the existence of contradiction between the export commodity flow of the extracted antimony raw materials and the total import dependence of Russia on commodity antimony products.

Purpose: to study the dynamics of commodity flows (production, import, export, consumption) of antimony raw materials in Russia, their prices (world and Russian), the resource base of antimony in Russia, and the national economic prospects of its extraction and processing.

Methods: statistical, graphical, and logical.

Results. As one of the world leaders in the extraction of antimony raw materials (up to 26 thousand tons/year), Russia practically does not process them and imports up to 1 thousand tons/year of metallic antimony and up to 2 thousand tons/year of antimony oxides. The export of antimony raw materials exceeds the import of marketable antimony products by 1,9 ... 8,4 times. Antimony in Russia is a strategic type of mineral product with a sufficient mineral resource base and at the same time a critical product due to the total dependence of imports on consumption. There is a need to create a national antimony processing industry producing antimony products with an extra surplus value. The current production of antimony raw materials (Sarylakh and Olimpiada deposits) many times overshadow the internal demand for antimony marketable products. It is possible to expand the production of antimony by bringing into operation the suspended (Sentachan, Zhipkoshka) and new deposits (Solonechenskoy), as well as increasing the mineral resource base through prospecting and exploration, primarily within the East Transbaikal and Sarylakh-Sentachan antimony provinces. It is possible to improve the technologies for processing antimony raw materials (energy saving, hydrometallurgy, biooxidation) in order to reduce operating costs and increase the environmental safety of the production of antimony products.

Key words:

Antimony raw materials, export of raw materials, import dependence, critical commodity product, raw-materials base, projects.

This work is supported by the Russian Science Foundation under grant no. 22-28-01742.

REFERENCES

1. Fedorchuk V.P. *Mineralnoe syre. Surma. Spravochnik* [Mineral raw materials. Antimony. Directory]. Moscow, Geoinformmark Publ., 1998. 34 p.
2. Pantaler M., Olthof S., Meerholz K., Lupascu D.C. Bismuth-antimony mixed double perovskites Cs₂AgBi_{1-x}Sb_xBr₆ in solar cells. *MRS Advances*, 2019, vol. 4, no. 64, pp. 3545–3552. DOI: 10.1557/adv.2019.404.
3. Ertl M., Wöb E., Knör G. Antimony porphyrins as red-light powered photocatalysts for solar fuel production from halide solutions in the presence of air. *Photochemical and Photobiological Sciences*, 2015, vol. 14, no. 10, pp. 1826–1830. DOI: 10.1039/c5pp00238a.
4. Jiang B., Liu X., Wang Q., Cui J., Jia B., Zhu Y., Feng J., Qiu Y., Gu M., Ge Z., He J. Realizing high-efficiency power generation in low-cost PbS-based thermoelectric materials. *Energy and Environmental Science*, 2020, vol. 13, no. 2, pp. 579–591. DOI: 10.1039/c9ee03410b.
5. Kumari M., Sharma Y.C. Effect of alternate layers of Bi₂Te₃-Sb₂Te₃ thin films on structural, optical and thermoelectric properties. *Chalcogenide Letters*, 2020, vol. 17, no. 2, pp. 59–67.
6. Cheng G.-Z., Liu S., Wang H.-L. Potential high-performance anode material for potassium ion batteries: Antimony. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2021, vol. 38, no. 2, pp. 170–180. DOI: 10.19894/j.issn.1000-0518.200243.
7. Lim D., Kim Y., Nam D., Hwang S., Shim S.E., Baeck S.-H. Influence of the Sb content in Ti/SnO₂-Sb electrodes on the electrocatalytic behaviour for the degradation of organic matter. *Journal of Cleaner Production*, 2018, vol. 197, pp. 1268–12741. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.06.301.
8. Subba Rao A.N., Venkatarangaiah V.T. Preparation, characterization, and application of Ti/TiO₂-NTs/Sb-SnO₂ electrode in photoelectrochemical treatment of industrial effluents under mild conditions. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, vol. 25, no. 12, pp. 11480–114921. DOI: 10.1007/s11356-017-1179-4.

9. Klochko K. *Antimony [advance release] 2017. Minerals Yearbook*. Reston, Virginia, U.S. Geological Survey, 2021. 11 p. Available at: [antimony2017 \(amazonaws.com\)](https://antimony2017.amazonaws.com) (accessed 10 January 2022).
10. Komin M.F., Klyucharev D.S., Volkova N.M. Antimony mineral resource base in Russia: problems and solutions. *Prospect and protection of mineral resources*, 2006, no. 9–10, pp. 26–29. In Rus.
11. Schulz K.J., DeYoung J.H., Seal R.R., Bradley D.C. *Critical mineral resources of the United States – economic and environmental geology and prospects for future supply*. Reston, Virginia, U.S. Geological Survey, 2017. 862 p. Available at: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/pp1802> (accessed 10 January 2022).
12. Martins F.F., Castro H. Raw material depletion and scenario assessment in European Union – a circular economy approach. *Energy Reports*, 2020, no. 6, pp. 417–422. DOI: 10.1016/j.egy.2019.08.082.
13. Usova T.Yu., Butov V.A., Ivanov V.S. The state and prospects of development of the antimony mineral resource base. *Mineral resources of Russia. Economics and Management*, 1998, no. 1, pp. 4–12. In Rus.
14. Basag S.P., Turan A., Yucel O. An investigation on antimony production by using Niederschlag process. *TMS Annual Meeting. 7th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing*, 2016, pp. 117–121. DOI: 10.1002/9781119274643.ch15.
15. Beznosov G.F., Nogovicin P.P., Sherstov V.A., Zhirkov E.P. Tendentsii dobychi i proizvodstva surmy v Respublike Sakha (Yakutiya) [Trends in antimony mining and production in the Republic of Sakha (Yakutia)]. *Gornaya promyshlennost*, 2005, no. 6 (64), pp. 59–62.
16. Batugina N.S., Katyuzhan L.L. Mineral resources in the economy of the Republic of Sakha (Yakutia). *Mineral resources of Russia. Economics and Management*, 2009, no 5, pp. 51–58. In Rus.
17. Miheev G.V., Bogidaev S.A. The line of enrichment of oxide forms of antimony on the example of the «Zhiphosh» deposit. *Transbaikalian State University Journal*, 2021, vol. 27, no. 5, pp. 36–43. In Rus.
18. *Federalnaya sluzhba gosudarstvennoy statistiki Rossii* [Federal state statistics service of Russia]. Available at: <https://gks.ru/emiss> (accessed 10 January 2022).
19. *Federalnaya tamozhennaya sluzhba Rossii* [Federal customs service of Russia]. Available at: <http://stat.customs.gov.ru/analysis> (accessed 10 January 2022).
20. *TrendEconomy*. Available at: [dataexplorer \(trendconomy.ru\)](https://dataexplorer.trendeconomy.ru) (accessed 10 January 2022).
21. Shustrov A.Yu., Denisov V.V. Complex technology of lead and antimony production. *Tsvetnye metally*, 2004, no. 10, pp. 37–40. In Rus.
22. Komin M.F., Blinova T.A., Volkova N.M., Klyucharev D.S. Antimony mineral resource base – problems and ways of development. *Mineral resources of Russia. Economics and Management*, 2011, no. 6, pp. 19–29. In Rus.
23. Sporyhina L.V., Orlova N.I., Bykhovskiy L.Z. Mineral resource base of non-ferrous metals: prospects for development and development. *Mineral resources of Russia. Economics and Management*, 2013, no. 5, pp. 99–118. In Rus.
24. Sporyhina L.V., Akimova A.V., Danilin M.V., Remizova L.I. The state of the mineral resource base of non-ferrous metals (tin, tungsten, molybdenum, antimony and aluminum raw materials). *Mineral resources of Russia. Economics and Management*, 2017, no. 4, pp. 19–27. In Rus.
25. Pavlenko Yu.V., Polyakov O.A. East Trans-Baikalian antimony province. *Bulletin of the Chita State University*, 2010, no. 9 (66), pp. 7–84. In Rus.
26. Pavlenko Yu.V. Geological and technological forecast: Kochkovskoe gold-antimony deposit. *Transbaikalian State University Journal*, 2012, no. 12 (91), pp. 129–139. In Rus.
27. Evdokimov S.I., Daciev M.S., Podkovyrov I.Yu. Development of a new scheme and method of ore flotation of the Olympiadinsky deposit. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tsvetnaya metallurgiya*, 2014, no. 1, pp. 3–11. In Rus.
28. Polyakov O.A., Pavlenko Yu.V. Improvement of ore preparation processes of the main types of antimony deposits in Eastern Transbaikalia. *Mining informational and analytical bulletin*, 2012, no. S1-1, pp. 243–257. In Rus.
29. Polyakov O.A. Prospects for the development of antimony ores of Eastern Transbaikalia using methods of radiometric ore preparation and heap leaching of a valuable component from tailings. *Mining informational and analytical bulletin*, 2014, no. S, pp. 137–143.
30. Myzenkov F.A., Tarasov A.V. Development and creation of modern metallurgical technology for antimony production with gold recovery from domestic gold-antimony concentrates in Russia. *TMS Fall Extraction and Processing Division: Sohn International Symposium*. San Diego, California, 2006. No. 4, pp. 121–128, code 68886.
31. Padilla R., Chambi L.C., Ruiz M.C. Antimony production by carbothermic reduction of stibnite in the presence of lime. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*, 2014, vol. 50, no. 1, pp. 5–13. DOI: 10.2298/JMMB130604003P.
32. Galevsky G.V., Rudneva V.V., Galevsky S.G. Melting of crude antimony in the low-tonnage production. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Novokuznetsk: 20th International Scientific and Research Conference – Metallurgy: Technologies, Innovation, Quality, Metallurgy*, 2018, vol. 411, no. 119, article no. 012021. DOI: 10.1088/1757-899X/411/1/012021.
33. Solozhenkin P.M., Rynnikova M.V., Kushakov Sh.T., Kovalev V.N., Solozhenkin O.I. *Sposob pererabotki zolotosoderzhashchego surmyanogo kontsentrata i liniya dlya ego osushchestvleniya* [A method for processing gold-containing antimony concentrate and a line for its implementation]. Patent RF no. 2692135 C1, 2019.
34. Yang J.-G., Tang C.-B., Chen Y.-M., Tang M.-T. Separation of antimony from a stibnite concentrate through a low-temperature smelting process to eliminate SO₂ emission. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 2011, vol. 42, no. 1, pp. 30–36. DOI: 10.1007/s11663-010-9453-6.
35. Zekavat M., Yoozbashizadeh H., Khodaei A. Leaching of antimony from stibnite ore in KOH solution for sodium pyroantimonate production: systematic optimization and kinetic study. *JOM*, 2021, vol. 73, no. 3, pp. 903–912. DOI: 10.1007/s11837-020-04531-8.
36. Golovkin D.I., Rusalev R.E., Rogozhnikov D.A., Naboychenko S.S. Issledovanie i otsenka vozmozhnosti primeneniya razlichnykh gidrometallurgicheskikh tekhnologiy po izvlecheniyu surmy iz flotatsionnykh kontsentratorov PAO «Polyus» [Research and evaluation of the possibility of using various hydrometallurgical technologies for the extraction of antimony from flotation concentrates of PJSC Polyus]. *Metallurgiya tsvetnykh metalloiv. Materialy IV mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Metallurgy of non-ferrous metals. Materials of the IV International Scientific and Technical Conference]. Ekaterinburg, Ural Federal University, 2018, pp. 151–155.
37. Arulmani S.R.B., Dai J., Li H., Chen Z., Zhang H., Yan J., Xiao T., Sun W. Efficient reduction of antimony by sulfate-reducer enriched bio-cathode with hydrogen production in a microbial electrolysis cell. *Science of the Total Environment*, 2021, vol. 77420, article no. 145733. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.
38. Bulaev A.G., Pershina E.V., Ukrainsev I.V. The state of development of modern biohydrometallurgical technologies and prospects for their use in Russia. *Tsvetnye metally*, 2016, no. 10 (886), pp. 29–35. In Rus. DOI: 145733. 10.17580/tsm.2016.10.04.
39. Sovmen V.K., Guskov V.N., Bely A.V., Kuzina Z.P., Drozdov S.V., Savushkina S.I., Mayorov A.M., Zakrevskiy M.P. *Pererabotka zolotonosnykh rud s primeneniem bakterialnogo okisleniya v usloviyakh Kravnego Severa* [Processing of gold-bearing ores using bacterial oxidation in the conditions of the Far North]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2007. 144 p.
40. Fei J.-C., Min X.-B., Wang Z.-X., Pang Z.-H., Liang Y.-J., Ke Y. Health and ecological risk assessment of heavy metals pollution in an antimony mining region: a case study from South China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, vol. 24, no. 35, pp. 27573–27586. DOI: 10.1007/s11356-017-0310-x.
41. Négrel P., Ladenberger A., Reimann C., Birke M., Demetriades A., Sadeghi M., Albanese S., Andersson M., Baritz R., Batista M.J., Flem B., Bellan A. GEMAS: Geochemical background and mineral potential of emerging tech-critical elements in Europe revealed from low-sampling density geochemical mapping. *Applied Geochemistry*, 2019, vol. 111, article no. 104425. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2019.104425.

Received: 2 February 2022.

Information about the authors

Vitaly Yu. Khatkov, department head, Gazprom PJSC; post graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Grigory Yu. Boyarko, Dr. Sc., Cand. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Liudmila M. Bolsunovskaya, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Artem M. Dibrov, senior lecturer, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.

Evgeniya V. Tkacheva, engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 620.92

ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕТРАДИЦИОННЫХ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В БЛИЖАЙШИЕ ДВАДЦАТЬ ЛЕТ

Бульба Елена Евгеньевна¹,
bulba@tpu.ru

Кузнецов Гений Владимирович¹,
kuznetsovgv@tpu.ru

Швайбович Марина Ивановна¹,
marisha@tpu.ru

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

Актуальность. Проблемы в энергоснабжении большой группы стран Европы и рост стоимости газа осенью и зимой 2021 г. показали трудности перехода от традиционной энергетики к нетрадиционным возобновляемым источникам энергии. Актуальной стала задача оценки максимально возможной степени замещения электроэнергии, вырабатываемой атомными и тепловыми электростанциями, электроэнергией, вырабатываемой нетрадиционными возобновляемыми источниками энергии (ветер, солнце).

Цель: сравнение на примере Германии объемов вырабатываемой нетрадиционными возобновляемыми источниками энергии (НВИЭ), которая реально используется, и общих объемов потребления электрической энергии во всех секторах экономики этой страны.

Методы: анализ статистических данных по нетрадиционной возобновляемой энергетике на примере Германии за 1990–2018 гг. и Евросоюза в целом за последние 7 лет.

Результаты. Анализ энергетической статистики Евросоюза и Германии за достаточно длительный период времени показал, что максимальная доля электрической энергии развитого государства, полученная в результате работы нетрадиционных возобновляемых источников энергии, не может быть выше 15–18 % от общего объема потребляемой электроэнергии без использования крупных накопителей энергии. Отсутствие в настоящее время информации по использованию накопителей электрической энергии, вырабатываемой нетрадиционными возобновляемыми источниками электроэнергии, дает основания для вывода, что предприятия промышленности, железнодорожный транспорт, предприятия коммунального хозяйства пока не могут использовать вырабатываемую нетрадиционными возобновляемыми источниками электроэнергию. Публикуемая в средствах массовой информации и в интернет-источниках информация об объемах вырабатываемой нетрадиционными возобновляемыми источниками электроэнергии не отражает реальные объемы используемой электроэнергии, вырабатываемой нетрадиционными возобновляемыми источниками.

Ключевые слова:

Традиционные и нетрадиционные возобновляемые источники энергии, электроснабжение, ресурсоэффективность, накопители энергии, ветрогенераторы, солнечные батареи.

Введение

Первые два десятилетия двадцать первого века ознаменовались активным введением в эксплуатацию нетрадиционных возобновляемых источников энергии – ветроустановок и солнечных электростанций [1, 2] (гидроэнергетика и биомасса являются, можно сказать, традиционными возобновляемыми источниками энергии). Но в 2021 г. стали проявляться все более отчетливо определенные проблемы в работе нетрадиционных возобновляемых источников энергии (например, масштабные аварии ветроустановок на юге США зимой 2021 г.). Кроме этого, осенью 2021 г. возникли проблемы энергоснабжения в ряде стран Европы, которые ряд обозревателей назвал энергетическим кризисом [3, 4]. К вышеизложенному следует добавить тенденцию роста цен на электроэнергию в странах Европы, интенсивно вводящих в эксплуатацию нетрадиционные ВИЭ [5, 6].

Энергетический кризис 2021 г. в Европе является следствием целого ряда объективных причин. Но, скорее всего, основная – преждевременный вывод из эксплуатации ряда тепловых и атомных электростан-

ций (или отдельных блоков таких станций). Потери в производстве электроэнергии, вырабатываемой такими станциями, не удалось компенсировать вводом в эксплуатацию ветрогенераторов и солнечных электростанций. Пока трудно сказать о том, как Европа будет выходить из энергетического кризиса в краткосрочной перспективе (2022–2023 гг.). Но целесообразно, по крайней мере, проанализировать основные аспекты непростых (можно даже сказать, очень непростых) процессов замены традиционной генерации (ТЭС и АЭС) на нетрадиционную (ветрогенераторы и солнечные электростанции) в период ближайших 20 лет [7, 8]. Логичной является постановка вопроса о том, в какой степени нетрадиционные ВИЭ могут заменить традиционную электроэнергетику. Или, другими словами, какова максимально-возможная доля электроэнергии, поступающей от нетрадиционных ВИЭ, в общем балансе электрогенерации развитого государства. Ответ на такой вопрос может быть получен только в результате анализа статистических данных за два–три последних десятилетия по вкладу каждого вида электрогенерации в общий энергоба-

ланс развитого государства. Наиболее высокие цифры (в рамках мирового сообщества) характерны для ветрогенерации и солнечных электростанций Германии [9–11]. Поэтому энергетику этой страны целесообразно выбрать для оценки ресурсоэффективности нетрадиционных ВИЭ в среднесрочной перспективе. Необходимость такой оценки обусловлена также и тем, что осенью 2021 г. в энергоснабжении значительной части государств Европы возникли проблемы не только недостатка электроэнергии, но и существенного повышения ее стоимости.

Следует отметить, что в литературе по проблеме возобновляемых (в начале двадцать первого века был популярен термин альтернативных) источников энергии происходит достаточно устойчивая смена смысла основных терминов. Если двадцать лет назад гидроэнергетика, существующая уже более ста лет, квалифицировалась как отдельная отрасль энергетики, а к возобновляемым источникам энергии относили ветер, солнце и биомассу, то в последние годы смысл основного термина (ВИЭ) изменился. Теперь в отчеты по вырабатываемой ВИЭ электроэнергии включают, как правило, и выработку гидроэлектростанций. Зачем это делается однозначно квалифицировать трудно, но самая простая гипотеза – ветер и солнце не оправдывают возлагавшихся на них в конце прошлого века надежд.

Второе замечание – биомассу (чаще всего древесину) человечество использует для выработки энергии (в основном тепловой, но также в последние сто лет и электрической) уже много веков. Но вследствие ее более низкой теплотворной способности по сравнению с газом и углем она до последних лет используется в относительно малых объемах. В то же время биомасса, так же как гидроресурс, обладает одним, как в последнее время становится очевидным, глобальным достоинством [12]. И гидроэнергетика (крупные электростанции) и, можно сказать, биоэнергетика не зависят от времени года, скорости ветра, времени суток, места расположения электростанции. Поэтому их присутствие в одном ряду с ветрогенераторами и солнечными панелями нелогично. Последние в любых условиях и на любых территориях не являются гарантированными источниками электрической энергии. Соответственно, вода и биомасса могут квалифицироваться как традиционные возобновляемые источники энергии, а ветер и солнце – как нетрадиционные.

Проводя анализ перспектив использования ВИЭ, также необходимо отметить, что в литературе по этой проблеме практически нет достоверной информации об использовании (не о выработке, а именно об использовании) электроэнергии, вырабатываемой ветрогенераторами и солнечными панелями для обеспечения стабильного во времени электроснабжения. Складывается впечатление, что многих авторов не интересует проблема использования вырабатываемой, например, солнечной панелью, электроэнергии для обеспечения работы, например, насосов для перекачки воды в системах водоснабжения. Во всех доступных источниках речь почему-то идет только о выра-

ботке электроэнергии в каком-то конкретном варианте условий и технологий (например, [13]).

Материалы и методики исследования

Анализ перспектив НВИЭ возможен с использованием разных подходов и методов. Например, первый – сравнение общих объемов электроэнергии, вырабатываемой нетрадиционными ВИЭ конкретного государства, и объемов потребления электроэнергии на территории этого государства. Второй подход – сравнение поступившей к потребителям электроэнергии, вырабатываемой нетрадиционными ВИЭ, и общего объема потребления электроэнергии. Такие подходы были бы обоснованы, а результаты их использования объективными, если бы не фактор неопределенности в работе НВИЭ, обусловленный нестационарностью процесса выработки электроэнергии ветрогенераторами и солнечными электростанциями. Но многие потребители энергии (в первую очередь промышленные предприятия и железнодорожный транспорт) не могут работать в режиме нестационарного электроснабжения. Накопителей же электроэнергии, обеспечивающих возможность работы, например, электрического железнодорожного транспорта, пока нет. Поэтому возникает объективная необходимость оценки объемов электроэнергии, вырабатываемой НВИЭ, которые могут быть использованы в развитом государстве, по отношению к общему объему потребления электроэнергии во всех сферах жизнедеятельности таких государств.

Цель работы – сравнение на примере Германии объемов вырабатываемой НВИЭ этой страны электроэнергии, которая реально используется, и общих объемов потребления электрической энергии во всех секторах экономики этой страны.

Германия является лидером ЕС не только по объему капиталовложений в НВИЭ. Это государство, безусловно, – локомотив Евросоюза в экономике. Поэтому Германия является наиболее представительным объектом для анализа, цель которого сформулирована выше [14].

Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены тренды выработки электроэнергии Германии за достаточно длительный период – 1990–2018 гг. – по отраслям энергетики (ТЭС, АЭС и др.) [15]. Следует отметить, что при всей условности любой статистики и возможных погрешностях в оценках и интерпретациях тех или иных показателей немецкая статистика, скорее всего, является по известным причинам самой надежной в мире. Этот фактор также учитывался при выборе Германии как объекта анализа.

Хорошо видно (рис. 1), что за двадцать восемь лет почасовая выработка электроэнергии ветроустановками практически не изменилась. При этом необходимо учитывать ежегодный прирост числа ветрогенераторов на территории Германии [15]. Их общее число выросло от 10000 (1999 г.) до 28000 (2021 г.). Рис. 1 показывает, что от общего максимально возможного в год числа часов работы ветроустановок (8760 ча-

сов) реальный показатель составляет менее 25 %, т. е. ветрогенераторы работают с передачей в сеть электроэнергии не более четверти общего времени суток. Такой коэффициент «полезного использования» ветрогенерации можно интерпретировать по-разному, но один вывод очевиден – такого рода генерацию использовать в промышленности и на транспорте нереально. Сомнительной является ее роль и в обеспече-

нии электроснабжения крупных и средних (по численности населения) городов, в которых энергоснабжение также должно быть стабильным (городской транспорт, водоснабжение, водоотведение, лифтовое хозяйство, работа медицинских учреждений). Максимально возможный вклад нетрадиционных ВИЭ в энергобаланс страны можно оценить по данным рис. 2 [14].

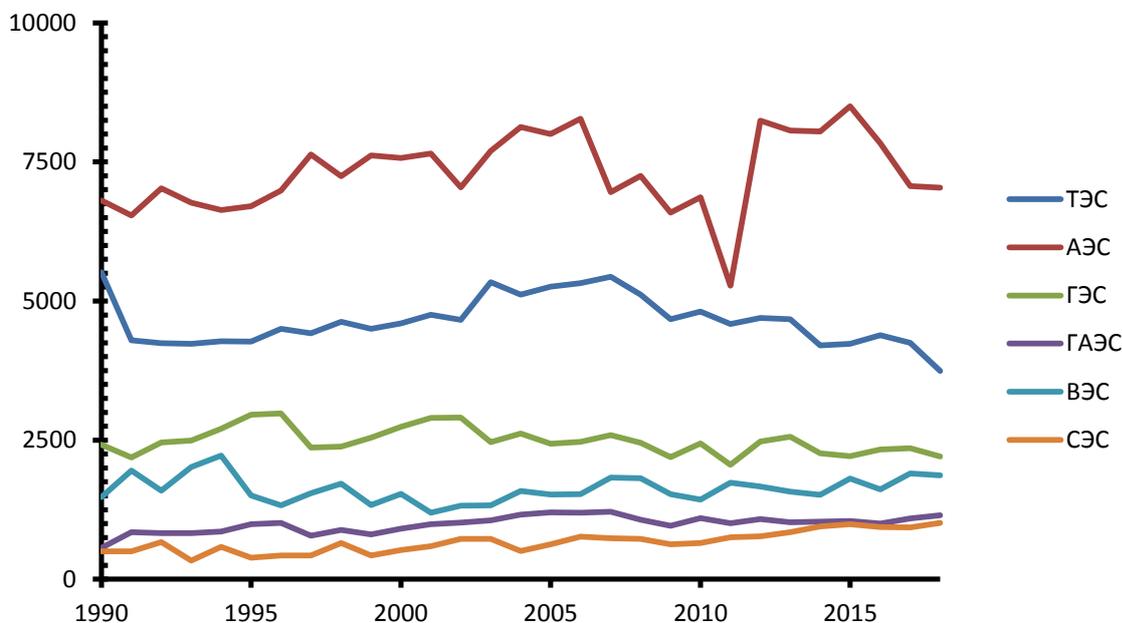


Рис. 1. Динамика числа часов использования-брутто по типам электростанций, 1990–2018, часы [15]

Fig. 1. Dynamics of the number of hours of use-gross by type of power plants, 1990–2018, hours [15]

Рис. 2 иллюстрирует распределение энергопотребления Германии по отраслям. Хорошо видно, что промышленность, транспорт, торговля, бытовое обслуживание составляют не менее 70 % от общего объема потребления электроэнергии. На домохозяйства приходится не более 30 % от общего объема.

При этом целесообразно уточнение. Домохозяйства Германии можно разделить на две основные группы: городские и сельские. На рис. 3 приведен рост численности населения в городах по состоянию на 2020 г. Можно сделать вывод, что не более трети домохозяйств расположены за пределами больших и средних агломераций, энергоснабжение которых осуществляется централизованно.

Оценка доли хозяйств, которые могут использовать электроэнергию из возобновляемых источников, может быть уточнена по данным [16] о распределении населения Германии по видам муниципалитетов (города с населением более 100000 человек; города с населением от 2000 до 100000 человек; поселения численностью до 2000 человек). Статистика [16] показывает, что в крупных и средних городах проживает более 70 % населения Германии (рис. 3). Поэтому сделанная выше оценка доли домохозяйств, которые могут (с определенными, конечно ограничениями) использовать вырабатываемую нетрадиционными ВИЭ электроэнергию, является, безусловно, завы-

шенной и гарантирует надежность сформулированных на ее основе выводов.

Приведенная на рис. 1–3 официальная статистика является базой для нескольких важных выводов. Первый – нетрадиционные возобновляемые источники энергии, исходя из оценки современного состояния энергетических систем, могут обеспечить электроэнергией не более 15 % потребителей на территории Германии (промышленные предприятия, так же как и электрический железнодорожный транспорт, не могут работать в условиях нестационарной подачи электроэнергии). Аналогично, население более или менее крупных городов не готово пользоваться электроэнергией только в солнечную или ветреную погоду. Второй вывод – нетрадиционные возобновляемые источники энергии не могут обеспечить более 85 % традиционных потребителей электроэнергии без ее накопителей большой емкости. Последних пока нет.

В этой связи необходимо отметить, что в последние годы неоднократно в общедоступном информационном пространстве появлялись сведения о работе по созданию таких накопителей энергии и о строительстве (и даже эксплуатации) на территориях США и Австралии таких мощных накопителей [17]. Но отсутствие в выступлениях на международных форумах лидеров государств с развитой сетью НВИЭ (Германия, Дания, США, Нидерланды) утверждений об экс-

плуатации мощных накопителей электрической энергии, вырабатываемой НВИЭ, дает основания для вывода, что пока таких накопителей нет [18]. Более того, вполне вероятно, что нет даже опытных образцов та-

ких накопителей (или систем накопителей). Возможно, что нет и теоретических основ создания таких накопителей. Поэтому есть основания и для третьего вывода, о котором следует сказать более подробно.

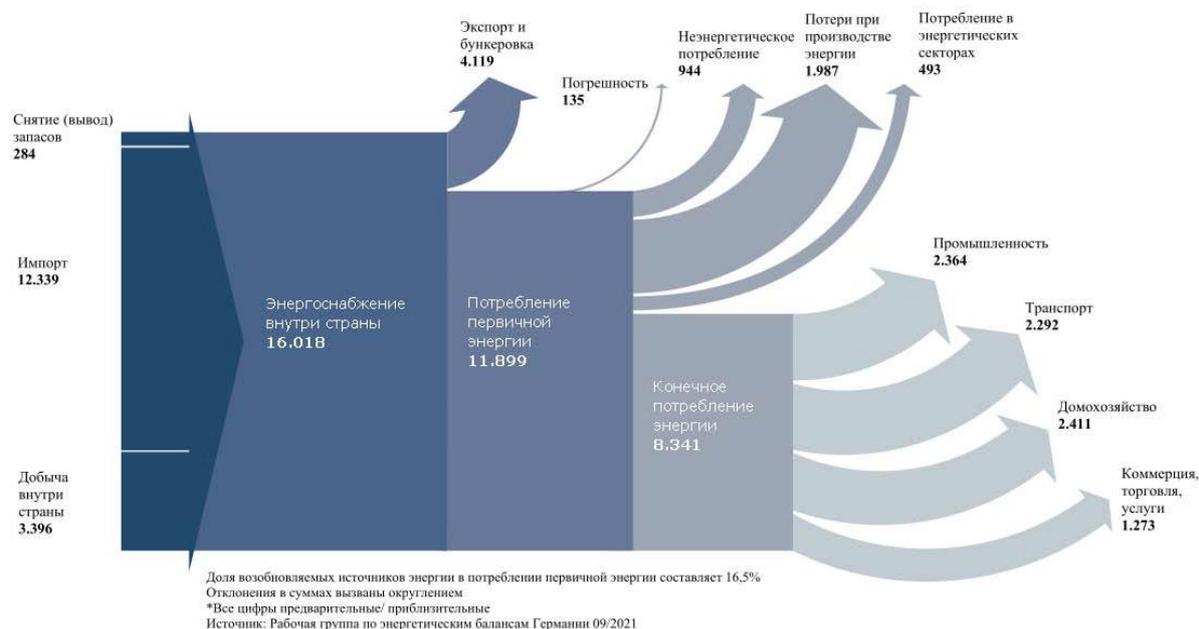


Рис. 2. Диаграмма потока энергии 2020 для Германии, в петаджоулях [14]

Fig. 2. Energy flow chart 2020 for Germany, in petajoules [14]

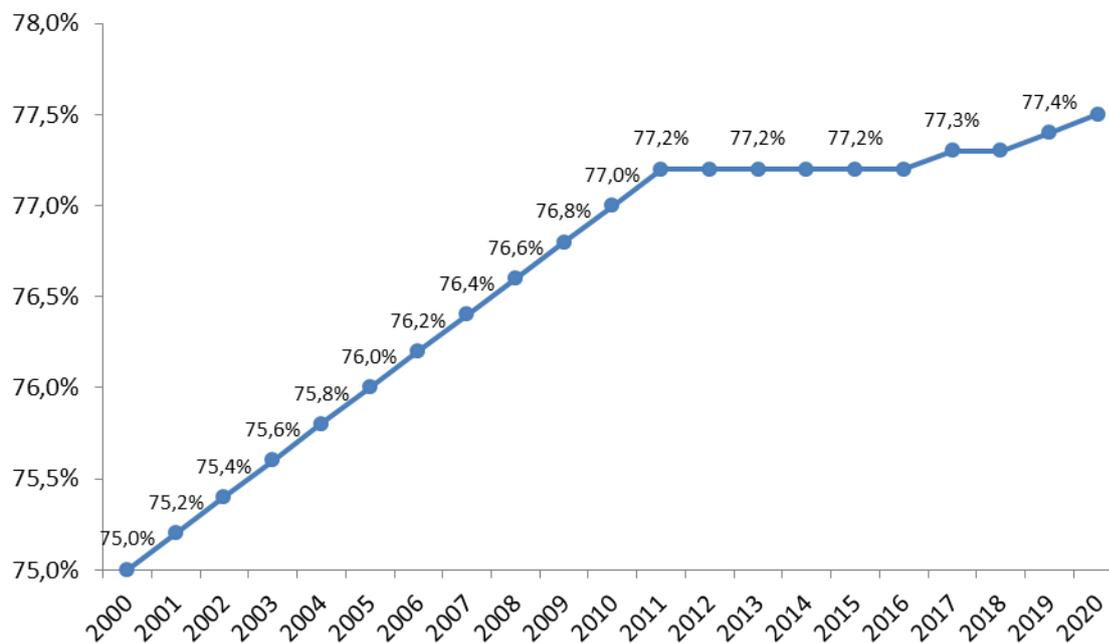


Рис. 3. Доля городских жителей в общей численности населения Германии в период с 2000 по 2020 гг. [16]

Fig. 3. Proportion of urban dwellers in the total population in Germany from 2000 to 2020 [16]

В интернет-пространстве регулярно появляются информационные сообщения о новых рубежах, достигнутых НВИЭ (особенно ветроустановками). Так, например, по сообщениям [19] Science Alert «Германия в воскресенье... В 13 часов по местному времени закрыла потребность электроэнергии, поступающей из ВИЭ, на 95 %». Если учесть, что даже теоретически этот показатель не может быть выше 15 % (как

показано выше), можно сделать вывод об использовании в этой информации данных не об используемой электроэнергии (полученной ВИЭ), а, возможно (если авторы этой информации системно не заблуждаются), вырабатываемой в какие-то отдельные моменты времени суток (яркое солнце и сильный ветер). Остается открытым вопрос о том, куда сбрасывается эта избыточная энергия (если она действительно вырабатыва-

ется). Скорее всего, она реально не используется. Можно отметить, что сделанный вывод подтверждает информация Eurostat (данные на апрель 2020 г.), приведенная на рис. 1. Хорошо видно, что если проводить оценку использования электроэнергии, вырабатываемой нетрадиционными ВИЭ, то становится очевидным, что за 28 лет непрерывного увеличения числа ветрогенераторов и их мощности доля используемой вырабатываемой ветроустановками электроэнергии практически не увеличилась – как составляла в 1990 г. 28 % от выработки АЭС, так и осталась практически на этом уровне в 2018 г. [1].

При этом необходимо отметить, что по планам Правительства Германии все атомные электростанции должны были быть остановлены в 2021 г. Поэтому новые атомные станции не строились. Но даже если не пытаться объяснить неправдоподобную информацию [19], есть все основания утверждать, что основное государственное агентство, целью работы которого является развитие нетрадиционных ВИЭ, использует не имеющую практического смысла в настоящее время информацию. Скорее всего, данные по выработке электроэнергии нетрадиционными ВИЭ не будут нести никакой смысловой нагрузки еще не одно десятилетие.

С целью обоснования последнего вывода целесообразно дополнительно привести общедоступную информацию по динамике изменения вырабатываемой нетрадиционными ВИЭ электроэнергии в Европейском союзе [20].

На рис. 4, 5 приведены данные по объемам электроэнергии, вырабатываемой НВИЭ в 2014 и в 2020 гг. [20]. Хорошо видно, что во всех развитых странах

Европы (с крупными промышленными производствами) прирост электроэнергии, вырабатываемой НВИЭ, составляет за 15 лет в общем энергетическом балансе в период с 2004 по 2019 гг. 9,6–19,7 % [21], т. е. фактически промышленно развитые страны за 2004–2019 гг. по существу не смогли сколько-нибудь значительно изменить свой энергобаланс (при этом надо учитывать, как отмечено выше, и «условность» статистики по вырабатываемой НВИЭ электроэнергии).

Сравнение рис. 4 и 5 дает основания для нескольких выводов.

Первый – все страны ЕС можно разделить на несколько групп. По большей группе государств (наиболее представительны Австрия, Словения, Словакия, Хорватия, Италия, Швеция, Чехия) можно сказать, что при представлении информации о выработке электроэнергии ВИЭ в 2014 г. использовались данные не только по ветроустановкам и солнечным электростанциям, а также выработки гидроэлектростанциями и, скорее всего, каким-то другим источникам (возможно, биомасса). Иначе объяснить такие объемы выработки электроэнергии ВИЭ в 2014 г. невозможно. Этот вывод дает основание для сравнения и заключения о том, что, скорее всего, во многих статистических данных двадцать первого века гидроэнергетика переведена в категорию источников, в которой находятся ветрогенераторы и солнечные электростанции. Такой подход очевидно неправомерен, т. к. он искажает реальную картину. Современные гидроэлектростанции по существу не зависят от погоды (в отличие от ветрогенераторов и солнечных панелей) и вырабатывают электроэнергию в любое время суток и при любом ветре.

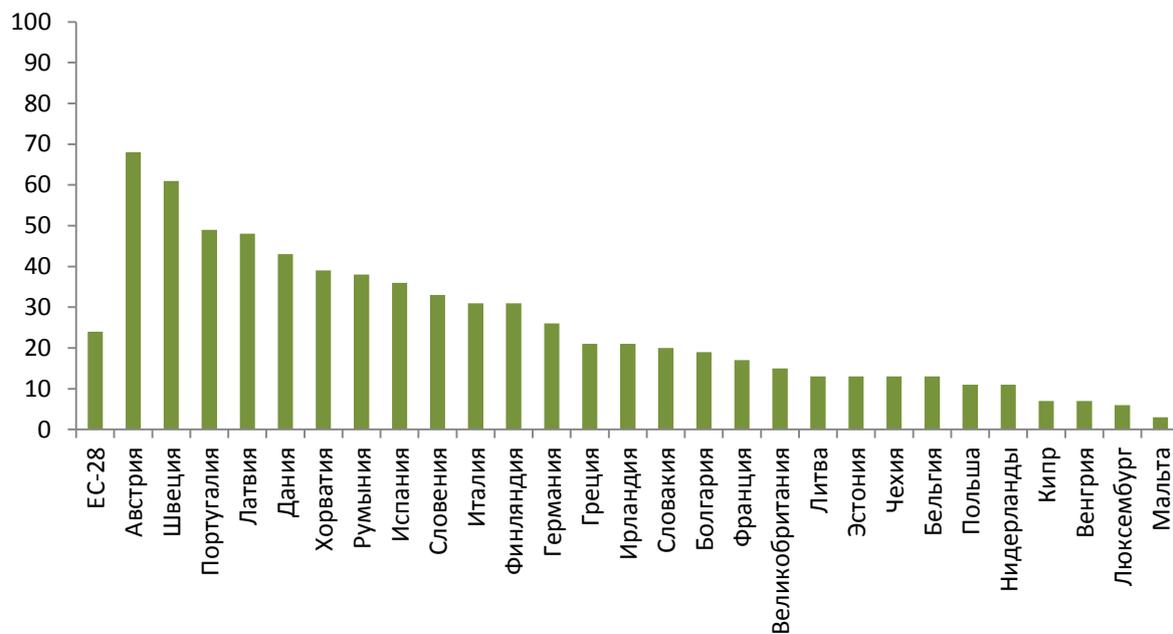


Рис. 4. Доля электроэнергии, произведенной из возобновляемых источников энергии, по странам Евросоюза (%), 2014 г. [18]

Fig. 4. Share of electricity produced from renewable energy sources by EU countries (%), 2014 [18]

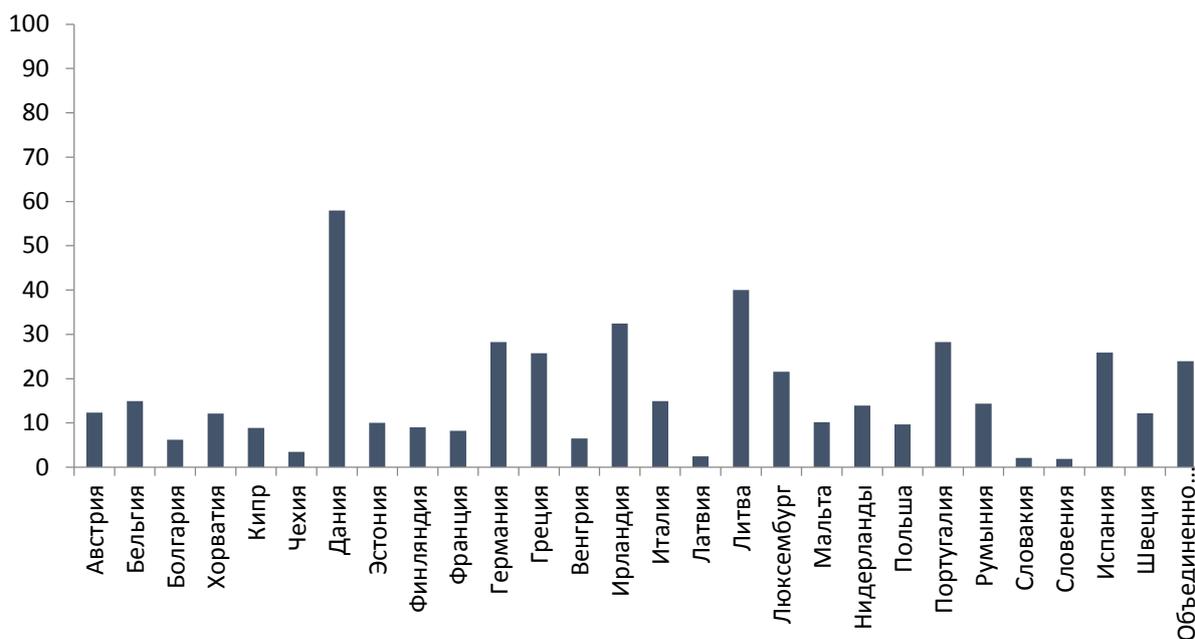


Рис. 5. Доля электроэнергии, произведенной из нетрадиционных возобновляемых источников энергии (ветроустановки и СЭС), по странам Евросоюза (%), 2020 г. [15]

Fig. 5. Share of electricity produced from unconventional renewable energy sources (wind turbines and SES), by country (%), 2020 [15]

Второй вывод – есть группа стран (Мальта, Люксембург, Кипр, Венгрия), в которых достигнут за шесть лет относительно небольшой прирост доли электроэнергии, вырабатываемой нетрадиционными ВИЭ. Но этот прирост далек от декларируемых Евросоюзом показателей.

Третий – есть группа промышленно развитых стран (Германия, Бельгия, Нидерланды, Греция), в которых этот показатель за шесть лет по существу не изменился (или изменился на единицы процентов).

Особое положение в этой статистике занимают три прибалтийских государства Латвия, Литва и Эстония. Последняя иллюстрирует в своих показателях сохранение (с небольшим снижением) уровня выработки ВИЭ в 2020 г., соответствующего 2014 г. Показатели Латвии 2014 и 2020 гг. показывают, скорее всего, недостоверность данных 2014 г. Очень большой подъем (почти в четыре раза) вырабатываемой нетрадиционными ВИЭ электроэнергии обусловлен, вполне вероятно, недостоверностью представляемой этими государствами информацией. Аналогичный вывод можно сделать и по статистике Дании. Промышленность этого государства не могла бы существовать, если бы почти 60 % электроэнергии вырабатывалось только в ветреную и солнечную погоду.

В целом же при всей условности приводимых на рис. 4, 5 официальных статистических данных и большим разбросам в их достоверности можно сделать обоснованный вывод, что через двадцать лет борьбы с атомной и теплоэнергетикой большая половина государств ЕС не смогла довести долю вырабатываемой нетрадиционными ВИЭ электроэнергии даже до 15 % от общего объема потребления. Скорее всего, этот уровень является предельным, и это необ-

ходимо учитывать при анализе реальных перспектив нетрадиционных ВИЭ, пока не будут созданы надежные накопители электроэнергии.

Но проблема загрязнения окружающей среды объективно существует, и какие-то реальные действия мировое сообщество должно осуществлять с целью снижения антропогенной нагрузки, оказываемой пока тепловыми электростанциями. Проведенный анализ показывает, что ни ветрогенераторы, ни солнечные панели в обозримом будущем (скорее всего, лет 20–25), пока не будут разработаны реальные накопители больших объемов электрической энергии, не смогут внести сколько-нибудь значимый вклад в электроснабжение промышленности, транспорта и больших городов. Единственным реальным перспективным вариантом является биомасса, использование которой в энергетике в больших объемах может решить проблемы энергетической и экологической безопасности нашей планеты. Так, например, большие по площади плантации быстрорастущих деревьев лиственных пород (например, тополя в России) могут обеспечить решение нескольких актуальнейших задач: поглощение углекислого газа, производство кислорода и выработка электрической энергии с многократно более низким выбросом антропогенных оксидов в атмосферу по сравнению, например, не только с угольными, но и с работающими на мазуте электростанциями.

Заключение

1. В настоящее время в литературе нет ни одного источника, в котором приводились бы данные о прямом использовании вырабатываемой нетрадиционными возобновляемыми источниками электроэнергии в промышленности, на транспорте, в

торговле и бытовом обслуживании, а также при электроснабжении крупных (с населением более 2000 человек) поселений.

2. Отсутствие в настоящее время информации по использованию накопителей электрической энергии, вырабатываемой нетрадиционными возобновляемыми источниками электроэнергии, дает основания для вывода, что предприятия промышленности, железнодорожный транспорт, предприятия коммунального хозяйства пока не могут использовать вырабатываемую нетрадиционными возобновляемыми источниками электроэнергию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Renewable energy in numbers. National and international development in 2018. –Berlin: Federal Ministry of Economics and Energy (BMWi), 2018. – 80 p.
2. On the use of thermal energy storage in solar – aided power generation systems / Chang Huang, Rafal Madonski, Qi Zhang, Yixian Yan, Nan Zhang, Yongping Yang // Applied Energy. – 2022. – V. 310. – 118532.
3. Strunz S., Lehmann P., Havel E. Analysis of renewable energy policy ambitions in the EU and its member states // Energy Policy. – 2021. – V. 156. – 112447.
4. Ruiz P., Nijss W., Thrane D. ENSPRESO – an open, EU-28 wide, transparent and coherent database of wind, solar and biomass energy potentials// Energy Strategy Reviews. – 2019. – V. 26. – 100379.
5. Electricity prices in Europe. Electricity report // Eurostat. URL: <https://strom-report.de/strompreise-europa/> (дата обращения 15.01.2022).
6. Energy cost-benefit analysis and accounting of renewable and non-renewable electricity generation: an overview / T.G. Walmsley, M.R.W. Walmsley, P.S. Varbanov, J.J. Klemeš // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2018. – V. 98. – № 11. – P. 328–345.
7. Recent policies and trends in renewable energy for sustainability – an overview / C.M. Vivek, P. Ramkumar, P.K. Srividhya, M. Sivasubramanian // Proceedings to date: Proceedings. – 2021. – V. 46. – P. 17. – P. 8204 8208.
8. Is renewable electricity supply in line with energy demand? Spatio-temporal analysis for the German case / Ch. Kockel, L. Nolting, J. Prismaann, A. Praktik // Applied Energy. – 2022. – V. 308. – 118226.
9. Relationship of renewable energy consumption to economic, environmental and institutional factors in Europe / I.V. Filimonova, V.Y. Nemov, V.D. Kozhevnikov et al. // Energy Reports. – 2021. – V. 7. – Supplement 5. – P. 358–365.
10. Adedoyin F.F., Bekun F.V., Alola A.A. The impact of the transition from non-renewable to renewable energy on economic growth in the EU: the role of research and development spending // Renewable Energy. – 2020. – V. 159. – P. 1139–1145.

Информация об авторах

Бульба Е.Е., кандидат технических наук, доцент Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Кузнецов Г.В., доктор физико-математических наук, профессор Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Швайбович М.И., инженер Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

3. Публикуемая в средствах массовой информации и в интернет-источниках информация об объемах вырабатываемой нетрадиционными возобновляемыми источниками электроэнергии не отражает реальные объемы используемой электроэнергии, вырабатываемой нетрадиционными возобновляемыми источниками.
4. Доля используемой нетрадиционными возобновляемыми источниками электроэнергии может составлять не более 16 % от общего потребления развитого государства без использования крупных накопителей энергии.

11. Energy Transition Report 2020 of the Lower Saxony Ministry of the Environment, Energy, Building and Climate Protection. – Berlin: Federal Ministry of Economics and Energy (BMWi), 2020. – 102 p.
12. Thermal enrichment of different types of biomass by low-temperature pyrolysis / R. Tabakaev, K. Ibraeva, A. Astafiev, Yu. Dubinin, N. Yazikov, A. Zavorin, V. Yakovlev // Fuel. – 2019. – V. 245. – P. 29–38.
13. Reichenberg L., Hedenus F., Johnsson F. Adapting large-scale power generation from variable renewables to provide baseload generation in Europe // Renewable Energy. – 2018. – V. 129. – P. A. – P. 334–346.
14. Selected performance indicators for the German energy mix. Data from 1990 to 2020 // Federal Environment Agency (AGEB). URL: <https://ag-energiebilanzen.de/> (дата обращения 15.01.2022).
15. EES EAEC. Global energy. URL: <https://www.eeseaec.org/> (дата обращения 15.01.2022).
16. World Population Prospects 2019. V. II: Demographic Profiles. – New York: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2019. – 1238 p.
17. Abbott M., Cohen B. Issues related to the possible contribution of battery energy storage to the provision of a stable electricity system // Journal of Electricity. – 2020. – V. 33. – Iss. 6. – 106771.
18. Golombek R., Lind A. The role of decarbonisation energy transmission and storage in Europe by 2050 // Energy. – 2022. – V. 239. – P. C. – 122159.
19. EU Renewable Energy Adoption Factors: analysis of past trends and projections / A. Shivakumar, A. Dobbins, U. Phal, A. Singh // Energy Strategy Reviews. – 2019. – V. 25. – 100402.
20. Справочник по возобновляемой энергетике Европейского союза / Г.В. Ермоленко, И.С. Толмачева, И.Ю. Ряпин и др. – М.: Институт энергетики НИУ ВШЭ, 2016. – 96 с.
21. Lowe R.J., Drummond P. Solar, wind and logistic substitution in global energy supply to 2050 – barriers and implications // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2022. – V. 153. – 111720.

Поступила: 19.01.2022 г.

UDC 620.92

ASSESSMENT OF THE PROSPECTS FOR USING UNCONVENTIONAL RENEWABLE ENERGY SOURCES IN THE NEXT TWENTY YEARS

Elena E. Bulba¹,
bulba@tpu.ru

Geniy V. Kuznetsov¹,
kuznetsovgv@tpu.ru

Marina I. Shvaybovich¹,
marisha@tpu.ru

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

The relevance of the research. The energy supply problems in a large group of European countries and the rising cost of gas in autumn and winter 2021 showed the difficulties of switching from conventional energy to non-conventional renewables. The task of assessing the maximum possible degree of substitution of electricity generated by nuclear and thermal power plants with electricity generated by non-conventional renewable energy sources (wind, solar) has become relevant.

The aim of the research is to compare, using Germany as an example, the amount of electricity generated by the country's renewables that is actually used and the total amount of electricity consumption in all sectors of the country's economy.

Methods: analysis of statistical data on unconventional renewable energy using the example of Germany from 1990 to 2018 and the EU as a whole for the last 7 years.

Results. Analysis of EU and German energy statistics over a sufficiently long period of time has shown that the maximum share of developed country electricity generated from unconventional renewables cannot be higher than 15–18 % of total electricity consumption without the use of large energy storage facilities. The current lack of information on the use of electrical energy storage devices generated by non-traditional renewable energy sources gives grounds for the conclusion that industrial enterprises, railway transport, public utilities cannot yet use the electricity generated by non-traditional renewable energy sources. The information published in the media and in Internet sources on the volumes of electricity generated by non-traditional renewable sources does not reflect the actual volumes of electricity used, generated by non-traditional renewable sources.

Key words:

Conventional and non-conventional renewable energy sources, electricity supply, resource efficiency, energy storage, wind turbines, solar panels.

REFERENCES

1. *Renewable energy in numbers. National and international development in 2018.* Berlin, Federal Ministry of Economics and Energy (BMWi), 2018. 80 p.
2. Chang Huang, Rafal Madonski, Qi Zhang, Yixian Yan, Nan Zhang, Yongping Yang. On the use of thermal energy storage in solar – aided power generation systems. *Applied Energy*, 2022, vol. 310, 118532.
3. Strunz S., Lehmann P., Havel E. Analysis of renewable energy policy ambitions in the EU and its member states. *Energy Policy*, 2021, vol. 156, 112447.
4. Ruiz P., Nijs W., Thran D. ENSPRESO – an open, EU-28 wide, transparent and coherent database of wind, solar and biomass energy potentials. *Energy Strategy Reviews*, 2019, vol. 26, 100379.
5. Electricity prices in Europe. *Electricity report. Eurostat*. Available at: <https://strom-report.de/strompreise-europa/> (accessed 15 January 2022).
6. Walmsley T.G., Walmsley M.R.W., Varbanov P.S., Klemeš J.J. Energy cost-benefit analysis and accounting of renewable and non-renewable electricity generation: an overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 98, no. 11, pp. 328–345.
7. Vivek C.M., Ramkumar P., Srividhya P.K., Sivasubramanian M. Recent policies and trends in renewable energy for sustainability – an overview. *Proceedings to date: Proceedings*, 2021, vol. 46, P. 17, pp. 8204–8208.
8. Kockel Ch., Nolting L., Prisman J., Praktik A. Is renewable electricity supply in line with energy demand? Spatio-temporal analysis for the German case. *Applied Energy*, 2022, vol. 308, 118226.
9. Filimonova I.F., Nemov V.Y., Kozhevin V.D. Interrelation of renewable energy consumption with economic, environmental and institutional factors in Europe. *Energy Reports*, 2021, vol. 7, Supplement 5, pp. 358–365.
10. Adedoyin F.F., Bekun F.V., Alola A.A. The impact of the transition from non-renewable to renewable energy on economic growth in the EU: the role of research and development spending. *Renewable Energy*, 2020, vol. 159, pp. 1139–1145.
11. *Energy Transition Report 2020 of the Lower Saxony Ministry of the Environment, Energy, Building and Climate Protection.* Berlin: Federal Ministry of Economics and Energy (BMWi), 2020. 102 p.
12. Tabakaev R., Ibraeva K., Astafiev A., Dubinin Yu., Yazikov N., Zavorin A., Yakovlev V. Thermal enrichment of different types of biomass by low-temperature pyrolysis. *Fuel*, 2019, vol. 245, pp. 29–38.
13. Reichenberg L., Hedenus F., Johnsson F. Adapting large-scale power generation from variable renewables to provide baseload generation in Europe. *Renewable Energy*, 2018, vol. 129, P. A, pp. 334–346.
14. Selected performance indicators for the German energy mix. Data from 1990 to 2020. *Federal Environment Agency (AGEB)*. Available at: <https://ag-energiebilanzen.de/> (accessed 15 January 2022).
15. *EES EAEC. Global energy.* Available at: <https://www.eeseaec.org/> (accessed 15 January 2022).
16. *World Population Prospects 2019. Vol. II: Demographic Profiles.* New York, United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2019. 1238 p.
17. Abbott M., Cohen B. Issues related to the possible contribution of battery energy storage to the provision of a stable electricity system. *Journal of Electricity*, 2020, vol. 33, Iss. 6, 106771.
18. Golombek R., Lind A. The role of decarbonisation energy transmission and storage in Europe by 2050. *Energy*, 2022, vol. 239, P. C, 122159.
19. Shivakumar A., Dobbins A., Phal U., Singh A. EU Renewable energy adoption factors: analysis of past trends and projections. *Energy Strategy Reviews*, 2019, vol. 25, 100402.

20. Ermolenko G.V., Tolmacheva I.S., Ryapin I.Y. Handbook on Renewable Energy in the European Union. *Moscow: Institute of Energy, National Research University Higher School of Economics*, 2016, 96 p.
21. Lowe R.J., Drummond P. Solar, wind and logistic substitution in global energy supply to 2050 – Barriers and implications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, vol. 153, 111720.

Received: 19 January 2022.

Information about the authors

Elena E. Bulba, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Geniy V. Kuznetsov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Marina I. Shvaybovich, engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 631.41:631.453

АККУМУЛЯЦИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПОЧВАХ СВЕРДЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Харина Галина Валерьяновна¹,
gvkharina32@yandex.ru

Алешина Людмила Викторовна²,
alv@usue.ru

¹ Российский государственный профессионально-педагогический университет,
Россия, 620012, г. Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11.

² Уральский государственный экономический университет,
Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8-е Марта, 62.

Актуальность исследования продиктована необходимостью проведения постоянного экологического мониторинга объектов окружающей среды в Свердловской области, в частности, почв в связи с высоким уровнем антропогенной нагрузки на территорию.

Цель работы заключается в оценке степени загрязнения селитебных ландшафтов и сельскохозяйственных угодий в Свердловской области тяжелыми металлами путем определения концентрации валовых форм тяжелых металлов и вычисления количественных критериев загрязнения тяжелыми металлами.

Объекты: пробы почв из нескольких пунктов Свердловской области, представляющих урбанизированные территории и сельскохозяйственные угодья.

Методы: механическая и химическая пробоподготовка почв; потенциометрический метод для определения характера среды почв; метод инверсионной вольтамперометрии для определения концентрации валовых форм тяжелых металлов.

Результаты. Установлено соответствие точек отбора проб почвенным провинциям, приведена краткая характеристика гранулометрического и геохимического состава исследуемых почв. Обнаружено, что анализируемые почвы загрязнены никелем, цинком, свинцом и медью; имеет место многократное превышение ориентировочно-допустимых концентраций никеля в почвах Екатеринбурга и Первоуральска. Перечислены основные источники техногенного загрязнения почв Свердловской области тяжелыми металлами. Рассмотрены природные факторы, способствующие аккумуляции металлов; описаны возможные механизмы закрепления тяжелых металлов в почвах области. Проведено ранжирование металлов-загрязнителей по их содержанию в исследуемых почвах. Рассчитаны количественные критерии степени загрязнения почв: суммарный показатель загрязнения и индекс геоаккумуляции. На основании полученных значений указанных параметров показано, что почвы селитебных ландшафтов характеризуются умеренно опасным уровнем загрязнения, почвы сельскохозяйственного назначения – допустимым уровнем загрязнения. Установлено, что наибольший вклад в суммарный показатель загрязнения вносит кадмий.

Ключевые слова:

Тяжелые металлы, техногенное загрязнение, селитебный ландшафт, аккумуляция, геохимический состав.

Введение

Почва выполняет важнейшие функции в биосфере, среди которых и поддержание постоянного химического состава всех геологических оболочек, и обеспечение взаимодействия геологического и биотического круговоротов, и накопление необходимых для плодородия органических веществ, и т. д. Однако именно почва является едва ли не самой уязвимой геосферой с точки зрения техногенного воздействия. Наиболее сильные негативные изменения в результате интенсивной хозяйственной деятельности испытывают почвы промышленных регионов, к которым относится Свердловская область, расположенная в пределах Среднего и Северного Урала и на равнинах Западной Сибири. Большие площади хвойных лесов, относительно плодородные почвы (особенно на юго-востоке области), богатые месторождения полезных ископаемых обуславливают развитие различных видов промышленности, включающих горнодобывающие, металлургические, машиностроительные, химические и другие предприятия [1]. В этой связи Свердловская область отличается чрезвычайно высоким уровнем загрязнения атмосферного воздуха, воды и почв. Значительный ущерб окружающей природной среде

наносит предприятия горнодобывающей промышленности, черной и цветной металлургии, топливно-энергетического комплекса, в результате деятельности которых фактически полностью уничтожается плодородный слой земли за счет аккумуляции токсичных веществ, в том числе тяжелых металлов. Не случайно некоторые города Свердловской области (Ревда, Кировград) по степени загрязнения почв отнесены к группе с чрезвычайно опасной экологической ситуацией [2]. Полиэлементные геохимические аномалии, формирующиеся в результате техногенного воздействия промышленных предприятий на окружающую среду, вызывают загрязнение подземных и поверхностных вод [3], оказывают негативное влияние на различные биохимические процессы в почвах. Повышенное содержание тяжелых металлов в окружающей среде способствует развитию патологий практически всех систем организма человека: репродуктивной, пищеварительной, выделительной и т. д. [4–6]. Более того, избыточные концентрации тяжелых металлов в почвах являются фактором развития эндемических заболеваний. В этой связи экологический мониторинг почв с учетом региональных природных и техногенных геохимических особенностей, позволяю-

щий выявить приоритетные металлы-загрязнители и определить уровень санитарно-гигиенического неблагополучия урбанизированных территорий, становится особенно актуальным.

Учитывая вышеизложенное, цель данной работы заключалась в оценке степени загрязнения селитебных ландшафтов и сельскохозяйственных угодий в Свердловской области тяжелыми металлами. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: определение концентрации валовых форм тяжелых металлов в точках отбора проб; определение количественных критериев загрязнения тяжелыми металлами; изучение зависимости загрязнения тяжелыми металлами от структуры ландшафта; установление источников загрязнения.

Методы и материалы

Для анализа были отобраны пробы почв из нескольких пунктов Свердловской области, представленных в табл. 1. Пробы были отобраны согласно требованиям ГОСТа 17.4.3.01-83 «Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб» с глубины 0–10 и 30–40 см [7].

Пробы почв были высушены в сушильном шкафу при температуре 40 °С, измельчены в агатовой ступке до порошкообразного состояния и просеяны через сито с диаметром отверстий 1 мм. Для получения водных вытяжек навески образцов почв массой 25 г были залиты дистиллированной водой объемом 250 мл, выдержаны в течение суток и отфильтрованы; для получения кислых вытяжек навески образцов почв массой 5 г были залиты раствором азотной кислоты (1:1) объемом 100 мл, выдержаны в течение суток и отфильтрованы.

Таблица 1. Точки отбора проб почв

Table 1. Soil sampling sites

№ пробы Sample number	Место отбора пробы Sampling place
1	Екатеринбург, Кировский р-н, центр Ekaterinburg, Kirovsky district, center
2	Екатеринбург, Кировский р-н, мкр-н Комсомольский Ekaterinburg, Kirovsky district, Komsomolsky microdistrict
3	Екатеринбург, Орджоникидзевский р-н, мкр-н Уралмаш Ekaterinburg, Ordzhonikidzevsky district, Uralmash microdistrict
4	Екатеринбург, Орджоникидзевский р-н, мкр-н Эльмаш Ekaterinburg, Ordzhonikidzevsky district, Elmash microdistrict
5	Екатеринбург, Ленинский р-н Ekaterinburg, Leninsky district
6	СНТ «Восток», в 30 км к югу от Екатеринбурга SNT «Vostok», 30 km south of Ekaterinburg
7	Коллективный сад в 66 км к юго-западу от Екатеринбурга Collective garden, 66 km southwest of Ekaterinburg
8	д. Мурзинка, в 30 км к северу от Екатеринбурга Murzinka village, 30 km north of Ekaterinburg
9	Коллективный сад в 14 км к западу от Екатеринбурга Collective garden, 14 km west of Ekaterinburg
10	Первоуральск, р-н трубного завода Pervouralsk, the area of pipe plant

В водных вытяжках почв были определены значения рН потенциометрическим методом с использованием стеклянного электрода. Кислые вытяжки почв были проанализированы на содержание в них тяжелых металлов: меди, свинца, кадмия, цинка, никеля методом инверсионной вольтамперометрии (ИВА) с использованием анализатора инверсионного вольтамперометрического по ТУ 4215-001-05828695-95 (НПВП «ИВА», г. Екатеринбург).

Измерения массовой концентрации ионов меди, свинца, кадмия, цинка основаны на концентрировании определяемого металла в виде амальгамы на поверхности рабочего электрода в результате предварительного электролиза анализируемого раствора при потенциале предельного диффузионного тока с последующей регистрацией величины максимального анодного тока электрорастворения осадка [8]. Величина аналитического сигнала, регистрируемого при электрорастворении осажденного металла, прямо пропорционально зависит от концентрации ионов определяемого металла.

Измерения массовой концентрации никеля основаны на адсорбционном концентрировании на поверхности электрода комплексного соединения никеля (II) с диметилглиоксимом. Максимальный катодный ток восстановления комплексного соединения, локализованного на поверхности рабочего электрода, прямо пропорционально зависит от содержания ионов Ni (II) в растворе. Расчет массовой концентрации элементов в растворе производят с помощью метода стандартной добавки.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1 указаны точки отбора проб почв, которые входят в состав как селитебных ландшафтов, так и сельскохозяйственных угодий, то есть места отбора проб дифференцированы по степени антропогенной нагрузки на окружающую среду: либо на урбанизированных территориях с действующими промышленными предприятиями, либо неподалеку от автомагистралей. Из табл. 1 следует, что пункты отбора проб находись как в промышленных, так и в рекреационных зонах.

Согласно карте почвенно-географического районирования [9] места отбора проб почв соответствуют четырем почвенным районам (П – Полевской, Т – Таватуйский, Б – Березовский, С – Сысертский). Полевской и Таватуйский почвенные районы входят в состав Среднеуральской южнотаежной, а Березовский и Сысертский – в состав Зауральской южнотаежной почвенных провинций. В составе почвенного покрова Среднеуральской южнотаежной провинции доминируют автоморфные и полугидроморфные горные дерново-подзолистые почвы (более 50 %), хотя встречаются и горные дерново-подзолистые, и горные лесные бурые, и горные примитивные почвы. В гранулометрическом составе большинства указанных почв присутствуют частицы крупной пыли, ила и суглинистые фракции. Специфика химического состава почв данной провинции заключается в преобладании магния над кальцием и железа над алюминием за счет особенностей почвообразующих горных пород [9]. Все почвы характеризуются невысоким содержанием фосфора и кислой реакцией среды.



Рис. 1. Карта южной части Свердловской области с местами отбора проб почв. П, Т, Б, С – почвенные районы, соответствующие местам отбора проб; пунктиром обозначены примерные границы почвенных районов

Fig. 1. Map of the southern part of the Sverdlovsk region with soil sampling sites. П, Т, Б, С – soil areas corresponding to sampling sites; the dotted line indicates the approximate boundaries of soil areas

Почвенный покров Зауральской южнотаежной почвенной провинции представлен горными лесными бурями и горными дерново-подзолистыми почвами с преобладанием почв равнинного облика – дерново-подзолистых. Химический состав характеризуется постоянством содержания диоксида кремния SiO_2 , низким содержанием фосфора и преобладанием фульвокислот над гуминовыми в составе гумуса. По морфологическому строению, гранулометрическому и химическому составу почвы данной провинции близки к почвам Среднеуральской южнотаежной провинции; характер среды почв кислый. Дополнительное закисление таких почв в результате, например, выпадения кислотных осадков или попадания сточных вод с кислой реакцией среды приводит, во-первых, к гибели полезных почвенных микроорганизмов (например, азотфиксирующих бактерий), во-вторых, к растворению соединений алюминия и марганца, представляющих опасность для растений и всех других живых организмов. Кроме того, при высвобождении связанных форм алюминия происходит его взаимодействие с соединениями фосфора с образованием труднорастворимых фосфатов.

Потенциометрическое определение характера среды водных растворов почв позволило выявить их слабокислую реакцию с pH от 5,6 до 6,8 (табл. 2).

Для определения тяжелых металлов нами был выбран метод инверсионной вольтамперометрии благодаря таким его характеристикам, как высокая точность, воспроизводимость, низкий предел обнаружения.

На рис. 2, 3 представлены примеры анодных вольтамперограмм свинца, кадмия, цинка и никеля, обнаруженных в пробах № 1, 6, 7. Как видно из рис. 2, введение аликвоты пробы в раствор фонового электролита (ВА 1) приводит к росту аналитического сиг-

нала при потенциале $(-0,4) \pm (0,1)$ В (ВА 2). В присутствии добавки стандартного раствора ионов свинца отмечается дальнейший прирост аналитического сигнала (ВА 3), что позволяет определить концентрацию ионов свинца.

Аналитический сигнал меди (ВА 2, рис. 3) регистрируется при потенциале $(-0,2) \pm (0,1)$ В и растет при введении добавки стандартного раствора соли меди (ВА 3).

Результаты определения характера среды и концентрации тяжелых металлов в пробах почв исследуемых металлов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Значения pH и валовое содержание тяжелых металлов в исследуемых пробах почв

Table 2. pH values and the total content of heavy metals in the studied soil samples

Номер пробы Sample number	pH	Содержание валовых форм тяжелых металлов, мг/кг Content of gross forms of heavy metals, mg/kg				
		Pb ²⁺	Ni ²⁺	Zn ²⁺	Cu ²⁺	Cd ²⁺
1	5,8	21,5	167,4	21,8	24,3	0,9
2	6,8	34,5	269,4	26,2	21,6	0,9
3	6,1	82,3	103,0	134,0	167,0	1,2
4	6,4	85,0	39,0	458,0	106,0	0,8
5	6,7	55,2	268,0	211,0	122,0	1,0
6	6,6	15,6	28,4	54,6	16,1	0,5
7	6,0	182,3	6,0	4,8	4,7	0,3
8	6,8	10,8	10,0	10,2	7,7	0,8
9	6,5	179,8	57,2	123,0	64,1	0,7
10	5,9	98,8	112,3	382,6	158,7	1,3

Жирным выделены концентрации тяжелых металлов, превышающие их допустимые значения (ОДК).

The concentrations of heavy metals exceeding their permissible values (APC) are highlighted in bold.

Одним из критериев оценки загрязнения почв тяжелыми металлами являются ориентировочно допу-

стимые концентрации (ОДК) [10], значения которых находятся в прямой зависимости от характера среды почв и их гранулометрического состава. Поскольку исследуемые почвы, согласно полученным результатам, характеризуются слабокислой реакцией среды,

близкой к нейтральной, нами были взяты соответствующие значения ОДК тяжелых металлов (табл. 3) с учетом преобладающих суглинистых и глинистых фракций в структуре почв.

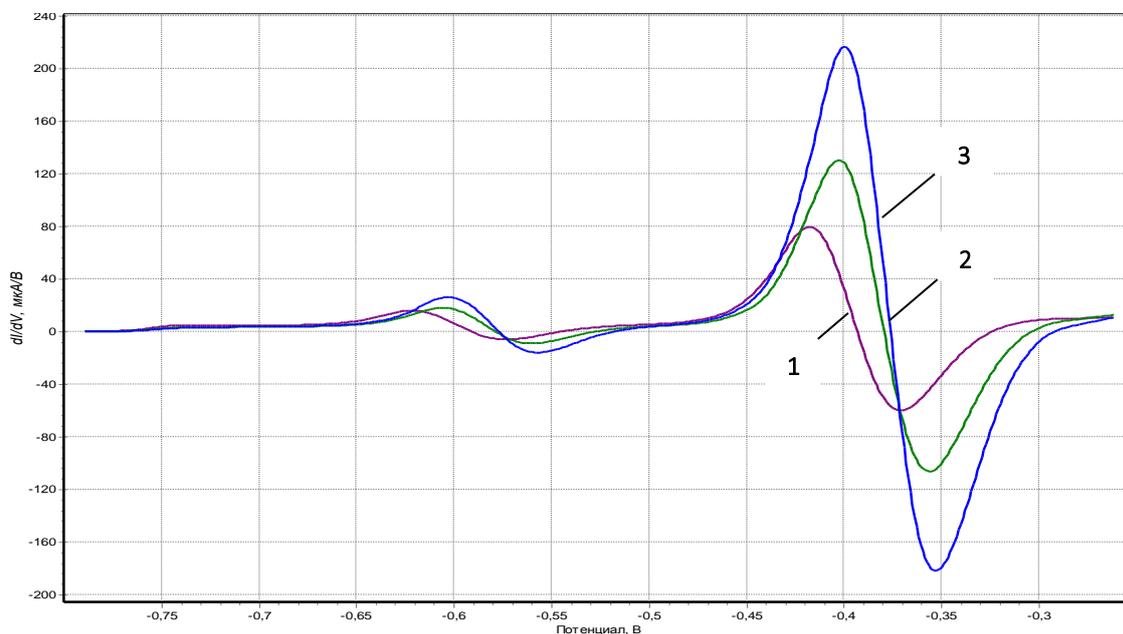


Рис. 2. Дифференциальные анодные вольтамперограммы свинца: 1 – фон (HCl $0,1$ моль/ дм^3), 2 – исследуемая проба № 7 ($4,0$ см^3); 3 – стандартная добавка ионов Pb^{2+} (200 $\text{мкг}/\text{дм}^3$); стандартная добавка ионов Cd^{2+} (20 $\text{мкг}/\text{дм}^3$)

Fig. 2. Differential anode voltammograms of lead: 1 – background (HCl $0,1$ mol/ дм^3), 2 – test sample no. 7 ($4,0$ см^3); 3 – standard addition of Pb^{2+} ions (200 $\text{mcg}/\text{дм}^3$); standard addition of Cd^{2+} ions (20 $\text{mcg}/\text{дм}^3$)

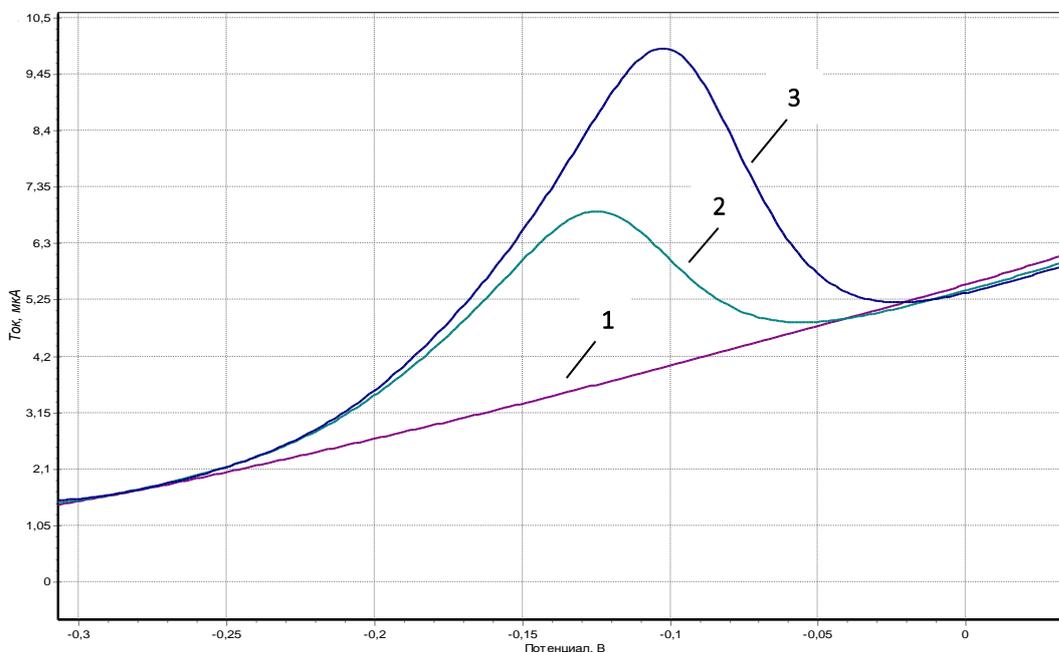


Рис. 3. Интегральные анодные вольтамперограммы меди: 1 – фон (HCl $0,1$ моль/ дм^3), 2 – исследуемая проба № 6 ($2,0$ см^3); 3 – стандартная добавка ионов Cu^{2+} (200 $\text{мкг}/\text{дм}^3$)

Fig. 3. Integral anode voltammograms of copper: 1 – background (HCl $0,1$ mol/ дм^3), 2 – test sample no. 6 ($2,0$ см^3); 3 – standard addition of Cu^{2+} ions (200 $\text{mcg}/\text{дм}^3$)

Таблица 3. ОДК тяжелых металлов в почвах и классы их опасности

Table 3. Approximate permissible concentrations (APC) of heavy metals in soils and their hazard classes

Металл Metal	ОДК, мг/кг с учетом кларка APC, mg/kg with clark in mind	Лимитирующий показатель Limiting indicator	Класс опасности Hazard category	Коэффициент токсичности, K_T Toxicity coefficient, K_T
Pb	130	Общесанитарный General sanitary	1	1,5
Ni	80		2	1
Zn	220		1	1,5
Cu	132		2	1
Cd	2,0		1	1,5

Как следует из табл. 2, 3, анализируемые почвы в большей степени загрязнены никелем, цинком, свинцом и медью, которые, согласно классификации опасности [11], относятся к высокоопасным (свинец, цинк) и умеренно опасным (медь, никель). Обнаружено многократное превышение ОДК никеля в почвах Екатеринбурга и Первоуральска; найдены большие концентрации свинца в почвах сельскохозяйственного назначения (почвы № 7 и 9).

При антропогенном поступлении тяжелых металлов в сеletебные и промышленные ландшафты значимыми являются следующие факторы: загрязнение атмосферного воздуха продуктами сгорания топлива; геохимические особенности и загрязнение грунтовых вод; непосредственное попадание в почвы соединений тяжелых металлов при работе предприятий горнодобывающей, металлургической, машиностроительной промышленности [12]. В крупных населенных пунктах с функционирующими промышленными предприятиями и высокой концентрацией автотранспорта доля антропогенного загрязнения почв особенно велика. Например, в работе [13] отмечается тесная корреляция содержания тяжелых металлов в атмосферном воздухе и поверхностном слое почвы. В результате поступления антропогенных загрязнителей из различных источников в почвах урбанизированных территорий формируются техногенные геохимические аномалии с очень неравномерным распределением в них элементов.

Содержание любых элементов, в том числе тяжелых металлов, в почве определяется их концентрацией в материнских породах, структурой и химическим составом почв, характером почвообразующих процессов, значением pH и уровнем техногенного загрязнения [14]. Для почв Свердловской области характерно сложное геологическое строение и наличие участков с высокой природной концентрацией тяжелых металлов. К таким участкам относятся ультраосновные подстилающие горные породы, обуславливающие аккумуляцию ряда тяжелых металлов: медь, никель, хром, цинк [15].

Накопление тяжелых металлов в почве происходит также вследствие их включения в состав глинистых минералов и поглощенных оснований, взаимодействия с гумусовыми веществами с образованием

прочных комплексов [16]. В результате образования труднорастворимых соединений, комплексов или физической адсорбции твердой фазой происходит закрепление тяжелых металлов в почвах. Особенно значимыми являются процессы адсорбции тяжелых металлов частицами оксидов и гидроксидов железа [17] в почве.

Свинец характеризуется высокой способностью накапливаться в почве (как в гумусовых, так и в иллювиальных горизонтах) даже в кислых средах вследствие низкой подвижности его ионов. В почвах с pH, близким к 7, свинец образует труднорастворимые соединения, главным образом фосфаты и прочные комплексы с гуминовыми кислотами. Следствием такого связывания является устранение негативного влияния свинца на биоту почвенных экосистем. Техногенное поступление свинца в почву обусловлено главным образом работой автотранспорта, предприятий цветной металлургии, мусоросжигательных установок [18]. Авторами [19] отмечено, что при поступлении свинца от автотранспорта загрязняется полоса земли шириной 50–100 м и концентрируется в слое толщиной до 10 см. Не случайно самые высокие концентрации свинца обнаруживаются в почвах вблизи автомагистралей; последнее подтверждается результатами наших исследований: пункты отбора проб № 7 и 9 находятся вблизи оживленной автотрассы, с которой выхлопные газы, содержащие соединения свинца, оседают на поверхности земли, адсорбируются и поглощаются почвенными минералами. Почвенный покров Сысертского почвенного района, к которому относятся пробы № 7 и 9, представлен суглинисто-глинистыми фракциями, на которых возможно закрепление минеральных и органических соединений свинца. Кроме того, в составе почв района обнаружено до 30 % оксида железа Fe_2O_3 , способного избирательно адсорбировать комплексные соединения свинца. Учитывая слабокислую реакцию среды проб № 7 и 9 (pH=6–6,5), можно предположить, что свинец в этих почвах присутствует именно в сорбированной форме.

Никель в большей степени аккумулируется ультраосновными горными породами, гранулометрический состав которых представлен тяжелыми глинами и суглинками [20]. Высокие концентрации никеля в верхнем слое почвы обусловлены техногенным загрязнением в результате сжигания органического топлива (нефти, бензина) и работы предприятий металлообрабатывающей промышленности и цветной металлургии [21]. Нами были обнаружены высокие концентрации никеля в пробах почв № 1–3, 5, 10, точки отбора которых находятся неподалеку от таких предприятий, как Уральский литейно-металлургический завод (№ 3), завод железобетонных изделий (№ 1, 2), Свердловский инструментальный завод (№ 5), Первоуральский трубный завод (№ 10). В почвах Зауральской южнотаежной почвенной провинции (пробы № 1–6, 8) содержание оксида железа значительно меньше, чем в Среднеуральской, – до 4,5 %, однако, учитывая близость химических свойств железа и никеля, а также глинистые и суглинистые фракции в составе этих почв, можно предположить адсорбционный механизм аккумуляции никеля.

Цинк в почвах присутствует в виде труднорастворимых сульфидов и фосфатов, а также комплексных соединений с серосодержащими органическими соединениями гумуса [22]. Накопление цинка, склонного к образованию легкоподвижных форм особенно в нейтральных почвах, происходит в глинистых и суглинистых отложениях. Аккумуляции цинка в виде сорбированных соединений способствуют суглинистые отложения и оксиды (гидроксиды) железа в составе почв [23–25]. Основными источниками техногенного загрязнения почв цинком являются цветная металлургия и горнодобывающая промышленность. Найденная в пробе № 4 концентрация цинка выше допустимой в два раза, что обусловлено близостью Екатеринбургской ТЭЦ и Уральского дизель-моторного завода; большое содержание цинка в пробе № 10 связано с работой многочисленных промышленных предприятий в Первоуральске.

Наибольшее количество меди (как правило, в малоподвижной форме) накапливается в основных и ультраосновных породах. Подвижность форм меди в почвах зависит не только от химического состава материнских пород, но и от уровня pH (в кислых средах подвижность возрастает), и от концентрации органических веществ в почве [26, 27]. Главными источниками техногенного загрязнения почв медью являются предприятия цветной металлургии и осадки канализационных сточных вод. Кроме того, поступление и накопление меди в селитебных ландшафтах (равно как и цинка) происходит из атмосферного воздуха при сжигании топлива, непосредственно – в результате истирания шин, тормозных колодок и легированных поверхностей.

Кадмий, близкий по своим свойствам к цинку, также накапливается в глинистых и суглинистых отложениях в виде сульфидов, карбонатов, фосфатов, однако в отличие от цинка обладает большей подвижностью, особенно в кислых средах [28]. Основу растворимого, т. е. подвижного, кадмия в почвенных растворах составляют его органические соединения [29]. Подвижные формы любых тяжелых металлов являются наиболее реакционно способными и представляют большую опасность для живых организмов. В исследуемых почвах содержание кадмия не превышает допустимых норм.

Данные табл. 2 свидетельствуют о загрязнении исследуемых почв тяжелыми металлами (кроме проб № 6, 8); превышение допустимых концентраций указанных экотоксикантов варьируется в диапазоне 1,2–3,4 (рис. 4).

Проба почвы № 10 загрязнена тремя металлами – медью, никелем и цинком, проба почвы № 3 загрязнена никелем и медью; в остальных пробах обнаружено превышение допустимого содержания только одного из определяемых металлов. Среди загрязнителей доминирует никель, повышенное содержание которого обнаружено в почвах селитебных ландшафтов. По степени загрязнения исследуемых почв определяемые металлы-загрязнители можно расположить в ряд: Ni>Zn>Pb>Cu>Cd. Содержание кадмия во всех пробах не превышало его ОДК.

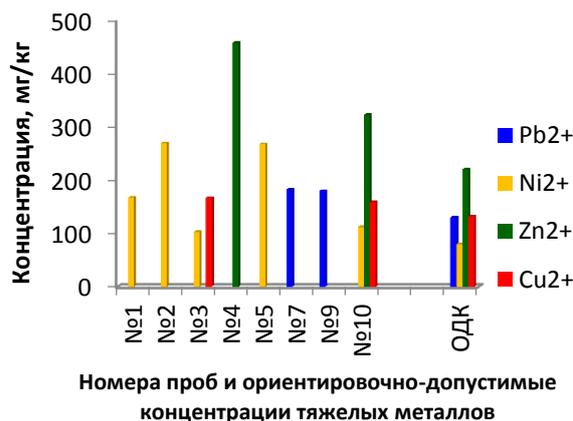


Рис. 4. Превышение ориентировочно-допустимых концентраций тяжелых металлов в пробах исследуемых почв

Fig. 4. Excess of the approximate permissible concentrations of heavy metals in the samples of the studied soils

Для оценки уровня загрязнения почв токсичными элементами, степени их вовлечения в процессы техногенеза, а также с целью определения техногенной трансформации природных ландшафтов используются кларками – средним содержанием элемента в верхней части земной коры. Поскольку на сегодняшний день расхождения в оценках среднего содержания одного и того же элемента в земной коре довольно велики, нами были приняты рекомендации [2], согласно которым в качестве эталонов сравнения целесообразно использовать кларки, полученные разными исследователями.

Таблица 4. Кларки тяжелых металлов в земной коре и их фоновое содержание в почвах

Table 4. Clarks of heavy metals in the Earth's crust and their background content in soils

Металл Metal	Условные кларки тяжелых металлов в континентальной земной коре, мг/кг Conditional clarks of heavy metals in the continental Earth's crust, mg/kg	Среднее содержание кислоторастворимых форм металлов в почвах Свердловской области*, мг/кг Average content of acid-soluble forms of metals in the soils of the Sverdlovsk region*, mg/kg	Фоновые концентрации тяжелых металлов в почве, мг/кг** Background concentrations of heavy metals in the soil, mg/kg**
Pb ²⁺	17	29	10
Ni ²⁺	50	35	30
Zn ²⁺	75	84	50
Cu ²⁺	27	68	20
Cd ²⁺	0,09	1,1	0,1

* Среднее содержание тяжелых металлов в почвах Свердловской области приведено с учетом данных [30] за 2008г.; ** фоновые концентрации ТМ в гумусовых горизонтах почв приведены по [5].

* The average content of heavy metals in the soils of the Sverdlovsk region is given taking into account the data [30] for 2008; ** background concentrations of TM in humus horizons of soils are given according to [5].

Как следует из табл. 4, среднее содержание кислоторастворимых форм тяжелых металлов Свердловской области, за исключением никеля, превышает их условные кларки в земной коре.

Степень загрязнения почв можно оценить с помощью таких величин, как коэффициент концентрации химического вещества K_{Ci} и суммарный показатель загрязнения Z_C [31]:

$$K_{Ci} = \frac{C_i}{C_{\phi i}},$$

где C_i – фактическое содержание металла в почве; $C_{\phi i}$ – фоновое содержание металла;

$$Z_C = \left(\sum_{i=1}^n K_{Ci} \right) - (n - 1),$$

где n – число определяемых металлов; K_{Ci} – коэффициент концентрации i -го металла.

Однако расчет показателя Z_C без учета степени токсичности металла не позволяет получить корректные значения. В этой связи нами была внесена поправка на токсичность в расчетную формулу Z_C согласно [32]:

$$Z_{CT} = \left(\sum_{i=1}^n K_{Ci} \cdot K_{Ti} \right) - (n - 1),$$

где K_{Ti} – коэффициент токсичности i -го металла.

Согласно [31] при значениях Z_C менее 16 загрязнение почв считается допустимым; умеренно опасное загрязнение соответствует диапазону значений 16–32; Z_C выше 32 свидетельствует об опасном уровне загрязнения. Из табл. 5 следует, что учет коэффициента токсичности способствует увеличению суммарного показателя загрязнения: допустимым уровнем загрязнения характеризуются почвы сельскохозяйственного назначения – № 6, 8; почвы № 1–5, 7, 9 соответствуют умеренно опасной категории загрязнения, почва № 10 – опасной категории. Степень загрязнения почв селитебных ландшафтов (№ 1–5, 10) закономерно выше.

Наибольший вклад в суммарный показатель загрязнения, как следует из табл. 5, вносит кадмий, поскольку его фоновое содержание в почвах Свердлов-

ской области очень невелико. Результаты, представленные на рис. 5, свидетельствуют о большей степени загрязнения почвы № 10 из Первоуральска (индекс загрязнения составляет 42,5), что хорошо согласуется с данными [2, 33].

Таблица 5. Коэффициенты концентрации металлов и суммарные показатели загрязнения участков местности

Table 5. Metal concentration coefficients and total indicators of contamination of terrain areas

Номер пробы Sample number	Коэффициенты концентрации металла, K_{Ci} Metal concentration coefficients, K_{Ci}					Суммарный показатель загрязнения участка местности Total indicator of pollution of the site area	
	Pb ²⁺	Ni ²⁺	Zn ²⁺	Cu ²⁺	Cd ²⁺	Z_C	Z_{CT}
1	1,3	3,3	0,3	0,9	10	11,8	17,6
2	2	5,4	0,3	0,8	10,2	14,7	25
3	4,8	2,1	1,8	6,2	13,3	24,2	34,2
4	5	0,8	6,1	3,9	9,1	20,9	31
5	3,2	5,4	2,8	4,5	11	22,9	31,4
6	0,9	0,6	0,7	0,6	5,2	3,9	7,4
7	10,7	0,1	0,06	0,2	3,6	10,7	17,8
8	0,6	0,2	0,1	0,3	8,3	5,5	10
9	10,6	1,1	1,6	2,4	8	19,7	29,6
10	5,8	2,2	5,1	5,9	17,7	29,7	42,5

Для более точной оценки загрязнения почв были также рассчитаны индексы геоаккумуляции тяжелых металлов [34]:

$$I_{geo} = \log_2 \cdot \frac{C_n}{1,5B_n},$$

где C_n – концентрация элемента в верхнем слое почвы; B_n – фоновая концентрация элемента; 1,5 – коэффициент, позволяющий компенсировать содержание элемента в фоне за счет литогенных факторов.

Существует следующая классификация загрязнения ландшафта по индексу геоаккумуляции элементов [35]: $I_{geo} \leq 0$ – практически незагрязненный; $0 < I_{geo} < 1$ – незагрязненный до умеренно загрязненного; $1 < I_{geo} < 2$ – умеренно загрязненный; $2 < I_{geo} < 3$ – средне загрязненный; $3 < I_{geo} < 4$ – сильно загрязненный; $4 < I_{geo} < 5$ – сильно загрязненный до чрезмерно загрязненного; $5 < I_{geo}$ – чрезмерно загрязненный.

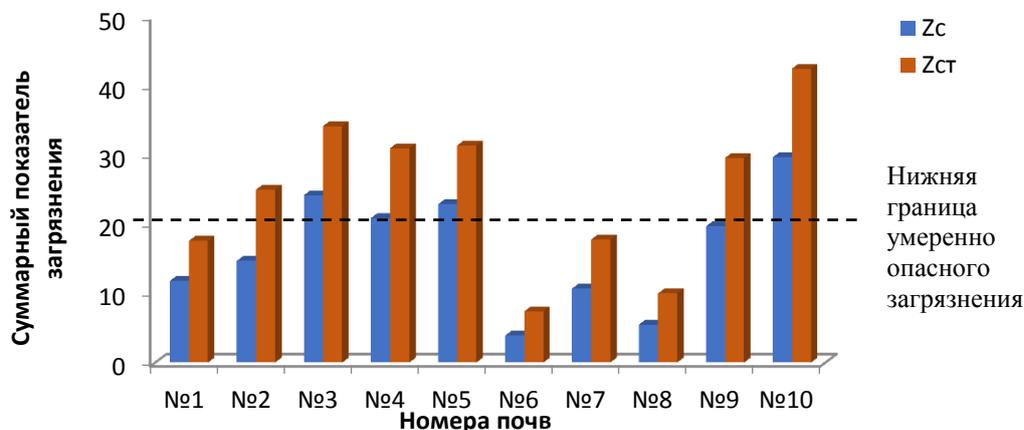


Рис. 5. Распределение исследуемых почв по суммарному показателю загрязнения
Fig. 5. Distribution of the studied soils by the total pollution indicator

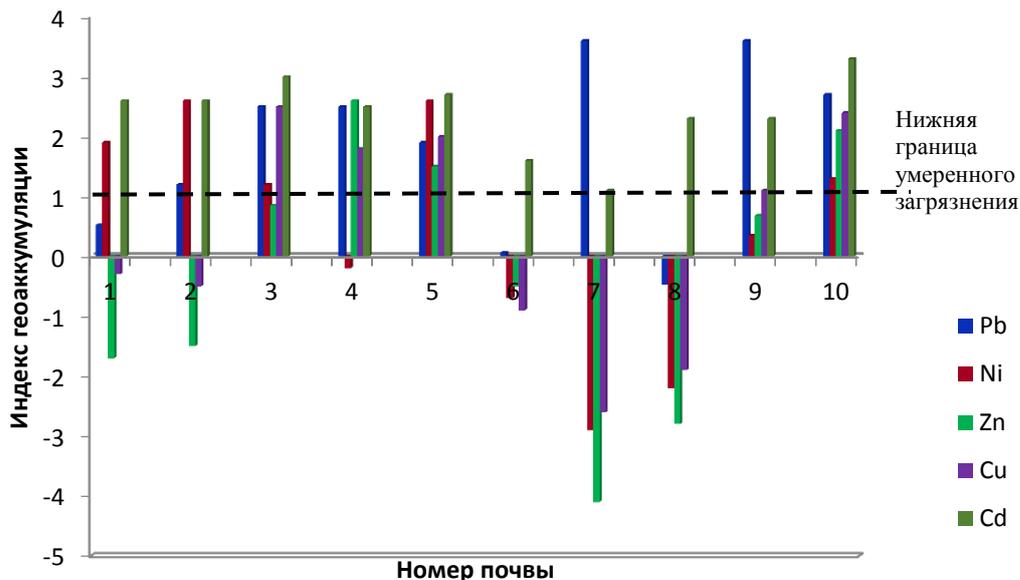


Рис. 6. Распределение почв по индексу геоаккумуляции тяжелых металлов

Fig. 6. Distribution of soils according to the index of geo accumulation of heavy metals

Как видно из рис. 6, почвы № 6–8 практически не загрязнены цинком, никелем и медью – индексы геоаккумуляции имеют отрицательные значения, это почвы сельскохозяйственных угодий, в которых содержание указанных металлов находится на уровне фонового. Почвы № 1–5, 10 (урбоземы) характеризуются средним индексом геоаккумуляции никеля, свинца и кадмия, что соответствует среднему загрязнению. Сильное загрязнение свинцом характерно для почв № 7, 9, для которых I_{geo} выше 3.

Заключение

На основании проведенных геохимических исследований обнаружено, что почвы Свердловской области характеризуются слабокислой реакцией среды и загрязнены такими тяжелыми металлами, как никель, цинк, свинец, медь. Среди загрязнителей доминирует никель, повышенное содержание которого обнаружено в почвах городских ландшафтов. Распределение металлов-загрязнителей в исследуемых почвах можно расположить в ряд: $Ni > Zn > Pb > Cu > Cd$.

Выявлено, что аккумуляции указанных тяжелых металлов в почвах способствуют глинистые и сугли-

нистые фракции, а также оксиды железа в составе изучаемых почв.

На основании рассчитанных значений суммарного показателя загрязнения Z_{CT} установлено, что почвы селитебных ландшафтов (№ 1–5, 10) характеризуются умеренно опасной категорией загрязнения, почвы сельскохозяйственного назначения (№ 6, 8) – допустимым уровнем загрязнения. Наибольший вклад в суммарный показатель загрязнения вносит кадмий в связи с его небольшим фоновым содержанием в почвах Свердловской области. Загрязнению почв в Свердловской области способствуют такие источники техногенных эмиссий, как автотранспорт, предприятия цветной металлургии и металлообрабатывающей промышленности, теплоэлектростанции.

Индексы геоаккумуляции I_{geo} подтверждают сформулированные выше утверждения: городские почвы загрязнены тяжелыми металлами в большей степени. Почвы сельскохозяйственных угодий (№ 6–8), характеризующиеся отрицательными значениями I_{geo} , практически не загрязнены тяжелыми металлами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Состояние и перспективы использования минерально-сырьевой базы Свердловской области на 15.03.2021. Справка подготовлена ФГБУ «ВСЕГЕИ» в рамках выполнения Государственного задания Федерального агентства по недропользованию от 14.01.2021 г. № 049-00016-21-00. URL: <https://rosnedra.gov.ru/data/Fast/Files/202104/8cb09d4c5ef96b69de56b70811dd1d5a.pdf> (дата обращения 30.07.2021).
2. Касимов Н.С., Власов Д.В. Тяжелые металлы и металлоиды в почвах российских городов (по данным ежегодных докладов Росгидромета) // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2018. – № 3. – С. 14–22.
3. Мониторинг качества питьевой воды в Свердловской области России / Г.В. Харина, Л.В. Алешина, С.В. Анахов, О.В. Инжеватова // Вода и экология: проблемы и решения. – 2020. – № 1 (83). – С. 63–83.
4. Potentially toxic elements status and distribution in Usangu agroecosystem-Tanzania / M. Mng'ong'o, S. Comber, L.K. Munishi, P.A. Ndakidemi, W. Blake, T.H. Hutchinson // Environmental Challenges. – 2021. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100200> (дата обращения 30.07.2021).
5. Михеева Е.В., Байтиминова Е.А., Голдышева Е.В. Химическая безопасность населения: природный компонент // Технологии гражданской безопасности. – 2009. – Т. 6. – № 3–4. – С. 137–143.
6. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: pollution and health risk assessment / Z. Li, Z. Ma, T.J. van der Kuijp, Z. Yuan, L. Huang // Science of the Total Environment – 2014. – V. 468–469. – P. 843–853.
7. ГОСТ 17.4.3.01-83. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору почв. – М.: Стандартинформ, 2008. – 4 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200012800> (дата обращения 30.07.2021).

8. Брайнина Х.З., Нейман Е.Я. Твердофазные реакции в электро-аналитической химии. – М.: Химия, 1982. – 264 с.
9. Гафуров Ф.Г. Почвы Свердловской области. – Екатеринбург: Изд-во Урал. Ун-та. 2008. – 396 с.
10. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) тяжёлых металлов и мышьяка в почвах: ГН 2.1.7.020-94 (Дополнение № 1 к перечню ПДК и ОДК №6229-91) Утв. ГКСН РФ. 27.12.94. – М., 1995. – 7 с.
11. ГОСТ 17.4.1.02–83. Охрана природы. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения. – М.: Госстандарт, 1983. – 3 с.
12. Current and future emissions of selected heavy metals to the atmosphere from anthropogenic sources in Europe / E.G. Pacyna, J.M. Pacyna, J. Fudala et al. // Atmospheric Environment. – 2007. – V. 41. – № 38. – P. 8557–8566.
13. Шабанов М.В., Маричев М.С. Тяжелые металлы в почвах гео-химически сопряженных ландшафтов Красноуральского промышленного узла // Социально-экологические технологии. – 2020. – Т. 10. – № 2. – С. 201–225.
14. Physiological, biochemical changes, and phytotoxicity remediation in agricultural plant species cultivated in soils contaminated with copper and zinc / P.A.A. Ferreira, C. Lourenzi, T. Tiecher, T.L. Tiecher, F. Ricachenevsky, G. Brunetto, A.J. Giachini, C.R.F. Sauso Soares // Plants Under Metal and Metalloid Stress / Eds. M. Hasanuzzaman, K. Nahar, M. Fujita. – Singapore: Springer, 2018. – P. 29–76. URL: <https://doi.org/10.1007/978-981-13-2242-62> (дата обращения 30.07.2021).
15. Оценка загрязнения рекреационных зон мегаполиса тяжелыми металлами (на примере Екатеринбурга) / Е.А. Байтмирова, Е.В. Михеева, Е.Н. Беспамятных, И.М. Донник, А.С. Кривоногова // Аграрный вестник Урала. – 2016. – № 4. – С. 71–77.
16. Heike В.В. Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituents // Journal of Colloid and Interface Science. – 2004. – V. 277. – Iss. 1. – P. 1–18.
17. Васильев А.А., Чащин Н.Н. Тяжелые металлы в почвах города Чусового: оценка и диагностика загрязнения. Монография. – Пермь: ФГБОУ ВПО Пермская ГСХА, 2011. – 197 с.
18. Brian J.A. Sources of heavy metals and metalloids in soils // Heavy Metals in Soils. – 2012. – V. 22. – P. 11–50.
19. Ильин В.Б. Тяжелые металлы в системе почва–растение. – Новосибирск: Наука, Сиб. отделение, 1991. – 151 с.
20. The link between clay mineral weathering and the stabilization of Ni surface precipitates / R.G. Ford, A.C. Scheinost, K.G. Scheckel, D.L. Sparks // Environmental Science Technology. – 1999. – V. 33. – P. 3140–3144.
21. Лукин С.В. Мониторинг содержания никеля в почвах // Достижения науки и техники АПК. – 2011. – № 3. – С. 14–16.
22. Martinez С.Е., Bazilevskaya K.A., Lanzirotti A. Zinc coordination to multiple ligand atoms in organic-rich surface soils // Environmental Science Technology. – 2006. – V. 40. – P. 5688–5695.
23. Zinc and arsenic immobilization and magnetite formation upon maghemite reduction by shewanella putrefaciens ATCC 8071 / A.C. Cismasu, G. Ona-Nguema, D. Bonnin, N. Menguy, G. Brown // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2008. – V. 72 (12). – P. A165.
24. Zinc immobilization and magnetite formation via ferric oxide reduction by Shewanella putrefaciens / D.C. Cooper, F. Picardal, J. Rivera, C. Talbot // Environmental Science Technology. – 2000. – V. 34. – P. 100–106.
25. Ford R.G., Sparks D.L. The nature of Zn precipitates formed in the presence of pirophyllite // Environmental Science Technology. – 2000. – V. 34. – P. 2479–2483.
26. McBride M.B., Sauve S., Hendershot W. Solubility control Cu, Zn, Cd and Pb in contaminated soils // European Journal Soil Science. – 1997. – V. 48. – P. 337–346.
27. Xia K., Bleam W., Helmke P.A. Studies of the nature of Cu²⁺ and Pb²⁺ binding sites in soil humic substances using x-ray absorption spectroscopy // Geochimica Cosmochimica Acta. – 1997. – V. 61. – P. 2211–2221.
28. Kubier A., Wilkin R.T., Pichler T. Cadmium in soils and groundwater: a review // Applied Geochemistry. – 2019. – V. 108. – P. 104388.
29. Krishnamurti G.S.R., Naidu R. Solid-solution equilibria of cadmium in soils // Geoderma. – 2003. – V. 113 (1–2). – P. 17–30.
30. Обзор фоновое состояние окружающей природной среды на территории стран СНГ за 2008 год / под ред. Ю.А. Израэля // Росгидромет, 2010. – 103 с. URL: <http://downloads.igce.ru/publications/reviews/fon2008.pdf> (дата обращения 30.07.2021).
31. МУ 2.1.7.730-99. Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест. Методические указания. – М.: Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России, 1999. – 38 с.
32. Водяницкий Ю.Н. Тяжелые металлы и металлоиды в почвах. – М.: ГНУ Почвенный институт им. В.В. Докучаева РАСХН, 2008. – 84 с.
33. Загрязнение почв Российской Федерации токсикантами промышленного происхождения в 2019 году. Ежегодник. – Обнинск: ФГБУ «НПО «Тайфун», 2020. – 129 с.
34. Шабанов М.В., Стрекулов Г.Б. Геохимические процессы накопления тяжелых металлов в ландшафтах Южного Урала // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 1. – С. 184–192.
35. Charzyński P., Plak A., Hanaka A. Influence of the soil sealing on the geoaccumulation index of heavy metals and various pollution factors // Environmental Science and Pollution Research. – 2017. – V. 24. – P. 4801–4811.

Поступила 09.02.2022.

Информация об авторах

Харина Г.В., кандидат химических наук, доцент кафедры математических и естественнонаучных дисциплин Российского государственного профессионально-педагогического университета.

Алешина Л.В., кандидат химических наук, доцент кафедры физики и химии Уральского государственного экономического университета.

UDC 631.41:631.453

ACCUMULATION OF HEAVY METALS IN THE SOILS OF THE SVERDLOVSK REGIONGalina V. Kharina¹,
gvkharina32@yandex.ruLudmila V. Aleshina²,
alv@usue.ru¹ Russian State Vocational Pedagogical University,
11, Mashinostroiteley street, Ekaterinburg, 620012, Russia.² Ural State University of Economics,
62, Vosmoe Marta street, Ekaterinburg, 620144, Russia.

The relevance of the study is dictated by the need for constant environmental monitoring of environmental objects in the Sverdlovsk region, in particular soils, due to the high level of anthropogenic load on the territory.

The purpose of the work is to assess the degree of contamination of residential landscapes and agricultural lands in the Sverdlovsk region with heavy metals by determining the concentration of gross forms of heavy metals and calculating quantitative criteria for contamination with heavy metals

Objects: soil samples from several points of the Sverdlovsk region, representing urbanized territories and agricultural land.

Methods: mechanical and chemical sample preparation of soils; potentiometric method for determining the nature of the soil environment; inversion voltammetry method for determining the concentration of gross forms of heavy metals.

Results. The correspondence of sampling points to soil provinces is established, a brief description of the granulometric and geochemical composition of the studied soils is given. It was found that the analyzed soils are contaminated with nickel, zinc, lead and copper; there is a multiple excess of the approximate permissible concentrations of nickel in the soils of Ekaterinburg and Pervouralsk. The main sources of technogenic soil pollution of the Sverdlovsk region with heavy metals are listed. Natural factors contributing to the accumulation of metals are considered; possible mechanisms of fixing heavy metals in the soils of the region are described. The ranking of metal pollutants by their content in the studied soils was carried out. Quantitative criteria for the degree of soil pollution are calculated: the total pollution index and the geoaccumulation index. Based on the obtained values of the specified parameters, it is shown that the soils of residential landscapes are characterized by a moderately dangerous level of pollution, agricultural soils – an acceptable level of pollution. It was found that the greatest contribution to the total pollution index is made by cadmium.

Key words:

Heavy metals, technogenic pollution, residential landscape, accumulation, geochemical composition.

REFERENCES

1. *Sostoyaniye i perspektivy ispolzovaniya mineralno-syr'evoy bazy Sverdlovskoy oblasti na 15.03.2021. Spravka podgotovlennaya FGPU «VSEGEI» v ramkakh vypolneniya Gosudarstvennogo zadaniya federalnogo agenstva po nedropolzovaniyu ot 4.01.2021 № 049-00016-21-00* [The state and prospects for the use of the mineral resource base of the Sverdlovsk region as of 03.15.2021. The reference was prepared by FSBI VSEGEI as part of the State Assignment of the Federal Agency for Subsoil Use dated January 14, 2021, No. 049-00016-21-00]. Available at: <https://rosnedra.gov.ru/data/Fast/Files/202104/8cb09d4c5ef96b69de56b70811dd1d5a.pdf> (accessed 30 July 2021).
2. Kasimov N.S., Vlasov D.V. Heavy metals and metalloids in the soils of Russian cities (according to the annual reports of Roshydromet). *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*, 2018, no. 3, pp. 14–22. In Rus.
3. Kharina G.V., Aleshina L.V., Anakhov S.V., Inzhevatoeva O.V. Monitoring of drinking water quality in the Sverdlovsk region of Russia. *Water and ecology: problems and solutions*, 2020, no. 1 (83), pp. 63–83. In Rus.
4. Mng'ong'o M., Comber S., Munishi L.K., Ndakidem P.A., Blake W., Hutchinson T.H. Potentially toxic elements status and distribution in Usangu agroecosystem-Tanzania. *Environmental Challenges*, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100200> (accessed 30 July 2021).
5. Mikheeva E.V., Baitimirova E.A., Goldypeva E.V. Chemical safety of the population: natural component. *Civil Security Technologies*, 2009, vol. 6, no. 3–4, pp. 137–143. In Rus.
6. Li Z., Ma Z., van der Kuijp T.J., Yuan Z., Huang L. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: pollution and health risk assessment. *Science of the Total Environment*, 2014, vol. 468–469, pp. 843–853.
7. GOST 17.4.3.01-83. *Okhrana prirody. Pochvy. Obshchie trebovaniya k otboru pochv* [State Standard 17.4.3.01-83. Protection of Nature. Soils. General requirements for the selection of soils]. Moscow, StandardInform Publ., 2008. 4 p. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200012800> (accessed 30 July 2021).
8. Braynina Kh.Z., Neyman E.Ya. *Tverdofaznye reaktsii v elektroanaliticheskoy khimii* [Solid-phase reactions in electroanalytical chemistry]. Moscow, Khimiya Publ., 1982. 264 p.
9. Gafurov F.G. *Pochvy Sverdlovskoy oblasti* [Soils of the Sverdlovsk region]. Yekaterinburg, Ural University Publ. house, 2008. 396 p.
10. *Orientirovochno dopustimye kontsentratsii (ODK) tyazheykh metallov i myshyaka v pochvakh: GN 2.1.7.020-94* (Dopolnenie № 1 k perechnyu PDK i ODK № 6229-91) [GN 2.1.7.020-94. Approximately permissible concentrations (OEC) of heavy metals and arsenic in soils: GN 2.1.7.020-94 (Supplement no. 1 to the list of MPC and OEC no. 6229-91)]. Approved. GKSN RF. 12.27.94. Moscow, 1995. 7 p.
11. GOST 17.4.1.02–83. *Okhrana prirody. Pochvy. Klassifikatsiya khimicheskikh veshchestv dlya kontrolya zagryazneniya* [State Standard 17.4.1.02–83. Protection of Nature. Soils. Classification of chemicals for pollution control]. Moscow, Gosstandart Publ., 1983. 3 p.
12. Pacyna E.G., Pacyna J.M., Fudala J. Current and future emissions of selected heavy metals to the atmosphere from anthropogenic sources in Europe. *Atmospheric Environment*, 2007, vol. 41, no. 38, pp. 8557–8566.
13. Shabanov M.V., Marichev M.S. Heavy metals in the soils of geochemically conjugated landscapes of the Krasnouralsk industrial hub. *Socio-ecological technologies*, 2020, vol. 10, no. 2, pp. 201–225. In Rus.

14. Ferreira P.A.A., Lourenzi C., Tiecher T., Tiecher T.L., Ricachenevsky F., Brunetto G., Giachini A.J., Sauso Soares C.R.F. Physiological, biochemical changes, and phytotoxicity remediation in agricultural plant species cultivated in soils contaminated with copper and zinc. *Plants under Metal and Metalloid Stress*. Eds. M. Hasanuzzaman, K. Nahar, M. Fujita. Singapore, Springer, 2018. pp. 29–76. Available at: <https://doi.org/10.1007/978-981-13-2242-62> (accessed 30 July 2021).
15. Baitimirova E.A., Mikheeva E.V., Bespamyatnykh E.N., Donnik I.M., Krivonogova A.S. Assessment of pollution of recreational zones of a megapolis with heavy metals (on the example of Yekaterinburg). *Agrarian Bulletin of the Urals*, 2016, no. 4, pp. 71–77. In Rus.
16. Heike B.B. Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituents. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2004, vol. 277, Iss. 1, pp. 1–18.
17. Vasiliev A.A., Chashchin N.N., Chashchin N.N. *Tyazhelye metally v pochvakh goroda Chusovogo: otsenka i diagnostika zagryazneniya. Monografiya* [Heavy metals in the soils of the city of Chusovoy: assessment and diagnostics of pollution. Monograph]. Perm, FGBOU VPO Perm State Agricultural Academy Publ., 2011. 197 p.
18. Brian J.A. Sources of heavy metals and metalloids in soils. *Heavy Metals in Soils*, 2012, vol. 22, pp 11–50.
19. Ilyin V.B. *Tyazhelye metally v sisteme pochva–rastenie* [Heavy metals in the soil–plant system]. Novosibirsk, Nauka Publ., Sib. Department, 1991. 151 p.
20. Ford R.G., Scheinost A.C., Scheckel K.G., Sparks D.L. The link between clay mineral weathering and the stabilization of Ni surface precipitates. *Environmental Science Technology*, 1999, vol. 33, pp. 3140–3144.
21. Lukin S.V. Monitoring sodержaniya nikelya v pochvakh [Monitoring of nickel content in soils]. *Achievements of science and technology of the agro-industrial complex*, 2011, no. 3, pp. 14–16.
22. Martinez C.E., Bazilevskaya K.A., Lanzirrotti A. Zinc coordination to multiple ligand atoms in organic-rich surface soils. *Environmental Science Technology*, 2006, vol. 40, pp. 5688–5695.
23. Cismasu A.C., Ona-Nguema G., Bonnin D., Menguy N., Brown G. Zinc and arsenic immobilization and magnetite formation upon maghemite reduction by shewanella putrefaciens ATCC 8071. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, vol. 72 (12), p. A165.
24. Cooper D.C., Picardal F., Rivera J., Talbot C. Zinc immobilization and magnetite formation via ferric oxide reduction by Shewanella putrefaciens. *Environmental Science Technology*, 2000, vol. 34, pp. 100–106.
25. Ford R.G., Sparks D.L. The nature of Zn precipitates formed in the presence of pirophyllite. *Environmental Science Technology*, 2000, vol. 34, pp. 2479–2483.
26. McBride M.B., Sauve S., Hendershot W. Solubility control Cu, Zn, Cd and Pb in contaminated soils. *European Journal Soil Science*, 1997, vol. 48, pp. 337–346.
27. Xia K., Bleam W., Helmke P.A. Studies of the nature of Cu²⁺ and Pb²⁺ binding sites in soil humic substances using x-ray absorption spectroscopy. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 1997a, vol. 61, pp. 2211–2221.
28. Kubier A., Wilkin R.T., Pichler T. Cadmium in soils and groundwater: a review. *Applied Geochemistry*, 2019, vol. 108, P. 104388.
29. Krishnamurti G.S.R., Naidu R. Solid-solution equilibria of cadmium in soils. *Geoderma*, 2003, vol. 113 (1–2), pp. 17–30.
30. Obzor fonovogo sostoyaniya okruzhayushchey prirodnoy sredy na territorii stran SNG za 2008 god [Review of the background state of the natural environment in the territory of the CIS countries for 2008]. Ed. by Yu.A. Izrael. *Roshydromet*, 2010. 103 p. Available at: <http://downloads.igce.ru/publications/reviews/fon2008.pdf> (accessed 30 July 2021).
31. MU 2.1.7.730-99. *Gigienicheskaya otsenka kachestva pochvy naseleennykh mest. Metodicheskie ukazaniya* [MU 2.1.7.730-99. Hygienic assessment of soil quality in populated areas. Methodical instructions]. Moscow, Federal Center for State Sanitary and Epidemiological Supervision of the Ministry of Health of Russia Publ., 1999. 38 p.
32. Vodyanitskiy Yu.N. *Tyazhelye metally i metalloidy v pochvakh* [Heavy metals and metalloids in soils]. Moscow, V.V. Dokuchaeva GNU Soil Institute RAAS Publ., 2008. 84 p.
33. *Zagryaznenie pochv Rossiyskoy Federatsii toksikantami promyshlennogo proiskhozhdeniya v 2019 godu* [Soil pollution of the Russian Federation with industrial toxicants in 2019. Yearbook]. Obninsk, FSBI NPO Typhoon Publ., 2020. 129 p.
34. Shabanov M.V., Strekulev G.B. Geochemical processes of accumulation of heavy metals in the landscapes of the South Urals. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 1, pp. 184–192. In Rus.
35. Charzyński P., Plak A., Hanaka A. Influence of the soil sealing on the geoaccumulation index of heavy metals and various pollution factors. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, vol. 24, pp. 4801–4811.

Received: 9 February 2022.

Information about the authors

Galina V. Kharina, Cand. Sc., associate professor, Russian State Vocational Pedagogical University.

Ludmila V. Aleshina, Cand. Sc., associate professor, Ural State University of Economics.

УДК 666.762.11.539.4

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ОКСИНИТРИДОВ АЛЮМИНИЯ И ЦИРКОНИЯ

Матренин Сергей Вениаминович¹,
vm-s@mail.ru

Мостовщиков Андрей Владимирович^{1,2},
avmost@tpu.ru

Мировой Юрий Александрович¹,
y.a.mirovoy@gmail.com

Чудинова Александра Олеговна¹,
chudinova.1509@mail.ru

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

² Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

Актуальность. Развитие геологии XXI в. невозможно без решения фундаментальных проблем современного материаловедения, обусловленных задачами создания новых материалов функционального назначения. Несмотря на многообразие методов синтеза оксинитридов алюминия и циркония и консолидирования керамики на их основе, разрабатываемых в настоящее время, научный и практический интерес представляет твердофазный синтез в процессе компактирования соответствующих смесей в инертной атмосфере. При этом порошки могут быть спрессованы в компакты как до спекания, так и в его процессе. Во втором случае могут применяться различные варианты горячего прессования и искрового плазменного спекания. Для тугоплавких ионно-ковалентных оксинитридов переходных металлов активированное спекание является актуальной проблемой, так как оно осуществляется по диффузионному механизму. Для решения этой проблемы необходимо исследование закономерностей и механизмов консолидирования оксинитридных керамических материалов и поиск соответствующих активирующих добавок и методов активирования.

Цель: разработать метод получения высокоплотной прочной керамики на основе оксинитрида алюминия и циркония, включающий синтез сжигания порошковых смесей и последующее горячее прессование в инертной атмосфере, и исследовать структуру и физико-механические свойства полученных компактов.

Методы: ситовый анализ крупнодисперсных порошков с использованием анализатора А20, рентгенофазовый анализ исследуемых образцов, гидростатическое взвешивание для определения кажущейся плотности спеченных образцов, измерение микротвердости спеченных образцов, растровая электронная микроскопия, Scratch-тестирование.

Результаты. Получена керамика на основе оксинитрида алюминия с применением уникального метода, включающего синтез порошка Al_2O_3 -AlN путем сжигания нанопорошка Al и последующее горячее прессование в инертной атмосфере. Полученная керамика имела следующие физико-механические свойства: модуль упругости при индентировании $E_H=286537$ МПа, твердость индентирования $H_T=13160$ МПа, прочность образцов $\sigma_s=2912$ МПа. Методом горячего прессования получена высокомолекулярная прочная оксинитридная керамика ZrO₂-ZrN (модуль упругости при индентировании $E_H=323897$ МПа, твердость индентирования $H_T=19244$ МПа, прочность образцов $\sigma_s=3381$ МПа). Полученные материалы предлагаются для использования в технологии функциональной керамики нового поколения.

Ключевые слова:

Нанопорошок алюминия, диоксид циркония, оксинитрид алюминия, керамика, синтез сжиганием, горячее прессование, наноиндентирование.

Введение

Развитие геологии XXI в. невозможно без решения фундаментальных проблем современного материаловедения, обусловленных задачами создания новых материалов функционального назначения. Материалы на основе оксинитридных фаз с регулярным распределением компонентов с различной степенью ионности химической связи характеризуются уникальным сочетанием прочностных, электро- и теплофизических свойств: низкой плотностью и высокой твердостью, высокой теплопроводностью и низкой электропроводностью, повышенной термической стабильностью жаропрочностью и др. [1, 2].

Несмотря на многообразие методов синтеза оксинитридов алюминия и циркония и консолидирования керамики на их основе, разрабатываемых в настоящее время, научный и практический интерес представляет твердофазный синтез в процессе компактирования соответствующих смесей в инертной атмосфере. При этом порошки могут быть спрессованы в компакты как до спекания, так и в его процессе. Во втором случае могут применяться различные варианты горячего прессования и искрового плазменного спекания (ИПС). Для тугоплавких ионно-ковалентных оксинитридов переходных металлов активированное спекание является актуальной проблемой, так как оно осуществляется по диффузионному механизму. Для

решения этой проблемы необходимо исследование закономерностей и механизмов консолидирования оксинитридных керамических материалов и поиск соответствующих активирующих добавок и методов активирования. Анализ научно-технической литературы показывает, что варианты активированного спекания с применением добавок, в том числе нанодисперсных порошков, разработаны недостаточно [3–5].

В настоящее время подавляющее большинство исследований оксинитрида алюминия связано с разработкой прозрачной легкой керамики на его основе. В этом классе материалов наиболее перспективной является прозрачная поликристаллическая керамика, обозначаемая общепринятой аббревиатурой AlON. При средней плотности AlON обладает достаточно высокой прочностью, сопоставимой с YAG (алюмоиттриевый гранат) и фианитом (стабилизированный ZrO_2), а по уровню ударной вязкости AlON превосходит все прозрачные неорганические материалы [6–9].

Также AlON уже применяется как керамика, прозрачная для инфракрасного излучения миллиметрового диапазона, для окон сканеров. Кроме того, она рассматривается как конкурент полупроводниковым подложкам с высокой теплопроводностью из нитрида алюминия для электронных устройств большой мощности [10].

Введение примесей щелочноземельных, редкоземельных элементов в состав диоксида циркония с образованием твердых растворов является стандартным приемом стабилизации высокотемпературных модификаций ZrO_2 , проявляющих высокую ионную проводимость и в ряде случаев повышенные прочностные свойства. Иным способом стабилизации флюоритоподобной (F) структуры ZrO_2 является гетероэвалентное легирование кислородной подрешетки диоксида атомами неметаллов, среди которых наибольшее внимание привлекает азот. Было показано, что частичное замещение ионов O^{2-} на N^{3-} позволяет стабилизировать высокотемпературный кубический диоксид циркония при обычных условиях [11, 12].

Более поздними исследованиями в области c - ZrO_2 установлено образование семейства упорядоченных флюоритоподобных фаз. Их общей особенностью является наличие четкого порядка в распределении примесных атомов азота и анионных вакансий по узлам неметаллической подрешетки матрицы [13].

Показано [14], что стабилизация флюоритоподобных диоксинитридов циркония при замещении $O \rightarrow N$ происходит за счет образования сильных гибридных связей $Zr\ 4d-N\ 2p$. Роль анионных вакансий заключается в регулировании степени заполнения валентных зон. Оптимальная устойчивость структуры достигается при содержании дефектов (примесных атомов азота и анионных вакансий) в соотношении $(2N^{3-} + V_O)$. Изучение упорядочения дефектов показывает, что энергетический выигрыш достигается при образовании в структуре диоксинитридов компактных ассоциатов атомов азота, при этом дополнительная стабилизация системы происходит при расположении анионной вакансии таким образом, что для ряда катионов атомная конфигурация их ближнего окружения соот-

ветствует условию их «локальной стехиометрии» ($ZrO_5N_2V_O$). Указанные кластеры дефектов можно рассматривать как зародыши нитридной фазы в объеме диоксинитридов циркония.

Целью работы являлось исследование структуры и физико-механических свойств керамики на основе оксинитридов алюминия и циркония, полученной горячим прессованием порошковых смесей.

Материалы и методы исследования

Для синтеза оксинитрида алюминия использовали нанокристаллический порошок алюминия, полученный методом электрического взрыва проводников. Процесс взрыва осуществлялся в лабораторной установке УДГ-5 в атмосфере аргона и подробно исследован в работах [15, 16]. Для получения оксинитрида алюминия нанопорошок Al сжигали в атмосфере воздуха. Закономерности и механизмы горения металлических порошков подробно изучены в ряде работ [17–20].

Спёки AlO_xN_y , полученные сжиганием нанопорошка Al в воздухе, обрабатывали в планетарной мельнице «Активатор SL» в течение 20 мин, скорость вращения размольных стаканов составляла $20\ c^{-1}$. Механическую обработку проводили с целью измельчения порошков и их механоактивации. Мелющими телами являлись диоксидциркониевые шары. В результате механического воздействия в контактных областях частиц происходила значительная пластическая деформация. Релаксация возникающих напряжений может происходить путем выделения тепла, образования новой поверхности, возникновения различных дефектов в кристаллах, инициирования твердофазных химических реакций [21]. По мере увеличения мощности механического импульса и времени воздействия происходил постепенный переход от релаксации путем выделения тепла к релаксации, связанной с разрушением, диспергированием и пластической деформацией материала и появлением аморфных структур различной природы. Каналом релаксации поля напряжений может быть также химическая реакция, инициируемая разными механизмами, такими как прямое возбуждение и разрыв связи, которые могут реализоваться в вершине трещины. Обработанные порошки AlO_xN_y просеивали через стандартное сито № 004.

Аналогично подготавливали порошковую смесь оксида и нитрида циркония в соотношении 50 мас. % ZrO_2 – 50 мас. % ZrN . Для ее получения использовали промышленный нанокристаллический оксидный порошок ZrO_2 с добавкой 3 мол. % Y_2O_3 марки УДПО ВТУ 4-25-90, полученный в условиях плазмохимического синтеза (ПХС), и порошок ZrN квалификации «ч» ТУ 6-09-4050-75. Наиболее распространенный способ получения оксидных нанопорошков методом плазмохимического синтеза заключается в подаче водных растворов нитратов металлов (Al, Zr, Y) в сопло плазмотрона, генерирующего плазму воздуха. В каплях раствора возникали чрезвычайно высокие температурные градиенты. Происходил очень быстрый процесс синтеза и кристаллизации требуемого оксида или смеси оксидов на поверхности капли с

одновременным испарением воды через кристаллизирующуюся сферическую корку. Поэтому оксидные порошки, полученные ПХС, имеют характерную форму полых сфер, состоящих из нанокристаллитов и аморфизированной межкристаллитной фазы [22]. Размер сфер зависит от скорости подачи раствора через форсунку в плазму от температуры и варьируется в пределах 100...1000 нм, размер кристаллитов, образующих сферу, составляет 50...100 нм. Следует отметить высокую гомогенность плазмохимических порошков твердых растворов ZrO_2 [23].

Для идентификации кристаллических фаз, присутствующих в исходном нанопорошке, продуктах сгорания нанопорошка алюминия в различных условиях, а также его смесей с добавками оксидов проводили рентгенофазовый анализ, который был выполнен с использованием дифрактометра Дифрей-401 с анодом из железа. Излучение рентгеновской трубки $\lambda(Fe_{K\alpha})=0,193$ нм.

Обработанные в планетарной мельнице порошковые смеси консолидировали с использованием метода горячего прессования (ГП) в графитовой пресс-форме в атмосфере аргона в Институте физики прочности и материаловедения СО РАН. Метод ГП является эффективной технологией, позволяющей получать высокоплотные тугоплавкие материалы с высокими физико-механическими характеристиками. Режимы ГП указаны в табл. 1.

Таблица 1. Режимы горячего прессования

Table 1. Modes of hot pressing

Состав порошка Powder composition	Давление прессования, МПа Pressure, MPa	Время изотермической выдержки, мин Time of isothermal holding, min	Температура спекания, °С Sintering temperature, °C
$(AlN)_x(Al_2O_3)_{1-x}$	40	20	1600
50 мас. % ZrO_2 – 50 мас. % ZrN	40	20	1700

Примечание: x варьируется в пределах от 0 до 1.

Note: x varies in the range from 0 to 1.

Горячее прессования в закрытых пресс-формах представляет собой процесс консолидации порошковых материалов посредством одновременного приложения осевого давления и спекания порошкового тела. Метод ГП эффективен для получения различных типов керамик, в том числе высокотемпературных. Главными достоинствами метода являются высокие прочностные характеристики получаемых изделий и сокращение времени процесса благодаря объединению процессов спекания и прессования [24, 25].

Процесс горячего прессования осуществлялся по схеме одностороннего сжатия [26]. Пресс-формы выполнены из графита высокой плотности. Во избежание спекания пресс-формы и пуансонов с образцом использовали графитовую бумагу в качестве прокладочного материала. Прессование проведено в атмосфере аргона с величиной давления 1 атм при предварительном вакуумировании до 0,1 атм. Температурный режим выполнен следующим образом: нагрев

линейно осуществлялся в течение 10 минут; выдержка в течение 20 минут при заданной температуре и давлении 40 МПа; охлаждение в течение 15 минут до температуры около 400 °С; естественное охлаждение в течение 15 минут в рабочей камере.

Горячепрессованные образцы представляли собой цилиндры диаметром $15,0 \pm 0,1$ мм и высотой $5,0 \pm 0,2$ мм.

Плотность спеченных образцов ρ определяли гидростатическим взвешиванием в 96%-м этиловом спирте ($\rho_{сп}=0,807$ г/см³ при 20 °С) с погрешностью $\pm 0,001$ г. Рассчитывали также относительную плотность образцов Θ в соответствии с выражением:

$$\Theta = \frac{\rho}{\rho_T} \cdot 100 \%,$$

где ρ_T – теоретическая плотность керамики.

Образцы шлифовали и полировали с применением алмазных паст с целью получения полированных поверхностей, обладающих шероховатостью, допустимой для проведения последующего индентирования и Scratch-тестирования.

Индентирование осуществляли с помощью прибора Nano Indenter G200 в соответствии со стандартом ISO 14577. Прочность спеченной керамики определяли по методике «Scratch Testing» также с помощью прибора Nano Indenter G 200. Суть метода заключается в нанесении на исследуемую поверхность царапины длиной 500 мкм под действием линейно возрастающей нагрузки (от 0 до 100 мН) и последующем определении глубины и ширины профиля царапины на дистанции 40 мкм. Прочность образцов σ_s рассчитывалась по формулам:

$$\sigma_s = \frac{F_n}{A_s \sin \alpha} \text{ и } A_s = \frac{a^2}{2\sqrt{3} \sin \alpha} + \frac{ah}{\cos \alpha},$$

где F_n – нормальная нагрузка; A_s – проекционная площадь отпечатка от пирамиды Берковича; a и h – ширина и глубина профиля царапины на дистанции 40 мкм соответственно; α – угол, для пирамиды Берковича равный 65°.

Микроструктуру микрошлифов горячепрессованных образцов изучали методом растровой электронной микроскопии с использованием приборов JSM-840 фирмы «Jeol» и CM-12 фирмы «Philips».

Результаты и их обсуждение

Для изучения продуктов сгорания исследуемого НП алюминия образец массой 4 г был сожжен в воздухе. Состав продуктов сгорания был представлен следующими кристаллическими фазами (рис. 1): нитрид алюминия, оксинитрид алюминия, остаточный алюминий, оксид алюминия.

Содержание компонентов рассчитывали по формуле:

$$C_n = I_i / \sum_{i=1}^n I_i,$$

где I_i – интенсивность максимального пика i -й фазы.

В продуктах сгорания НП алюминия рассчитанное содержание нитрида, оксида и оксинитрида алюминия составило 45, 27,5 и 27,5 % соответственно.

В табл. 2 и на рис. 2 приведены физико-механические свойства горячепрессованной керамики и результаты проведения Scratch-тестирования.

Для расчета относительной плотности спеченной керамики использовали известную формулу аддитивности, с помощью которой определяется теоретическая плотность многокомпонентных фаз [27].

Необходимо отметить, что при внедрении пирамиды Берковича в поверхность исследуемого материала вокруг отпечатка образуется объёмное сложонапряженное и сложноедеформированное состояние, близкое к всестороннему сжатию, причем значения компонент соответствующих тензоров различны.

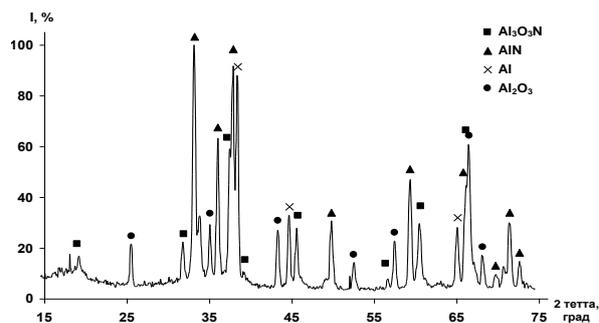


Рис. 1. Дифрактограмма продуктов сгорания в воздухе нанопорошка алюминия

Fig. 1. Diffractogram of combustion products in air of aluminum nanopowder

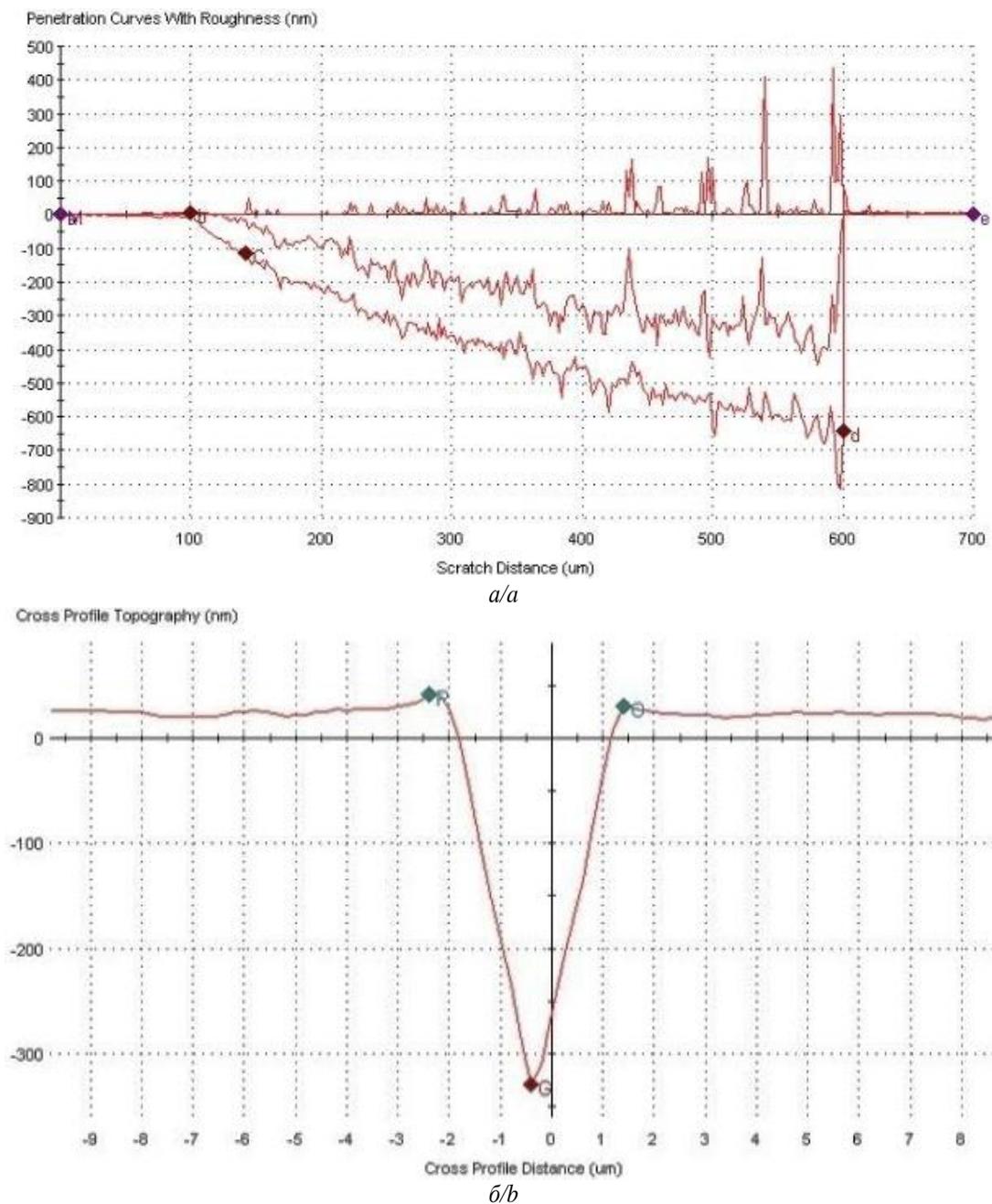


Рис. 2. Схема царапины (а) и ее профиль (б) на поверхности образца состава 50% ZrO_2 –50 % ZrN

Fig. 2. Scratch pattern (a) and profile (b) on the sample surface 50 % ZrO_2 –50 % ZrN

Таблица 2. Физико-механические свойства спеченной керамики

Table 2. Physical and mechanical properties of sintered ceramics

Состав Composition	Плотность ρ , г/см ³ Density ρ , g/cm ³	Теоретическая плотность керамики ρ_t , г/см ³ Theoretical density of ceramics ρ_t , g/cm ³	Плотность образцов θ , % Sample density θ , %	Модуль упругости при индентировании E_{IT} , МПа Modulus of elasticity during indentation E_{IT} , MPa	Твердость индентирования H_{IT} , МПа Indentation hardness H_{IT} , MPa	Прочность образцов σ_s , МПа Specimen strength σ_s , MPa
$(AlN)_x(Al_2O_3)_{1-x}$	3,25	3,58	90,86	286537	13160	2912
50 мас. % ZrO ₂ – 50 мас.% ZrN	5,88	6,41	91,73	323897	19244	3381

Примечание: x варьируется в пределах от 0 до 1.

Note: x varies in the range from 0 to 1.

На рис. 2 приведены результаты нанесения и профилирования царапины на полированную поверхность образцов состава 50 мас. % ZrO₂–50 мас. % ZrN, выдаваемые прибором Nanoindenter G200 автоматически. По оси x отмечена длина царапины поверхности образца, составляющая 500 мкм.

На первой стадии (верхняя кривая) происходит сканирование поверхности образцов без нагрузки. Затем происходит нанесение царапины (нижняя кривая). В точке, соответствующей 100 мкм, к индентору Берковича прикладывается усилие, которое линейно возрастает, достигая максимального значения в точке d , соответствующей дистанции 600 мкм. Таким образом, длина царапины составляет 500 мкм. На третьей стадии прибор сканирует нанесенную царапину без нагрузки для определения остаточной деформации (средняя кривая).

На рис. 2, б приведены результаты поперечного сканирования профилей царапин на расстоянии 300 мкм от момента приложения нагрузки. Эта операция дает возможность определить глубину и ширину царапины, количественные значения которых необходимы для расчета прочности образцов. Следует иметь в виду, что профиль и глубина царапин по оси y отсчитываются в нанометрах, в отличие от их длины, поэтому первичные кривые имеют выраженные пики.

После Scratch-тестирования поверхности микрошлифов горячепрессованного оксинитрида алюминия получены аналогичные результаты.

На рис. 3 приведены результаты рентгенофазового анализа горячепрессованных образцов из оксинитридов алюминия и циркония. Длина волны излучения составляла 0,193 нм.

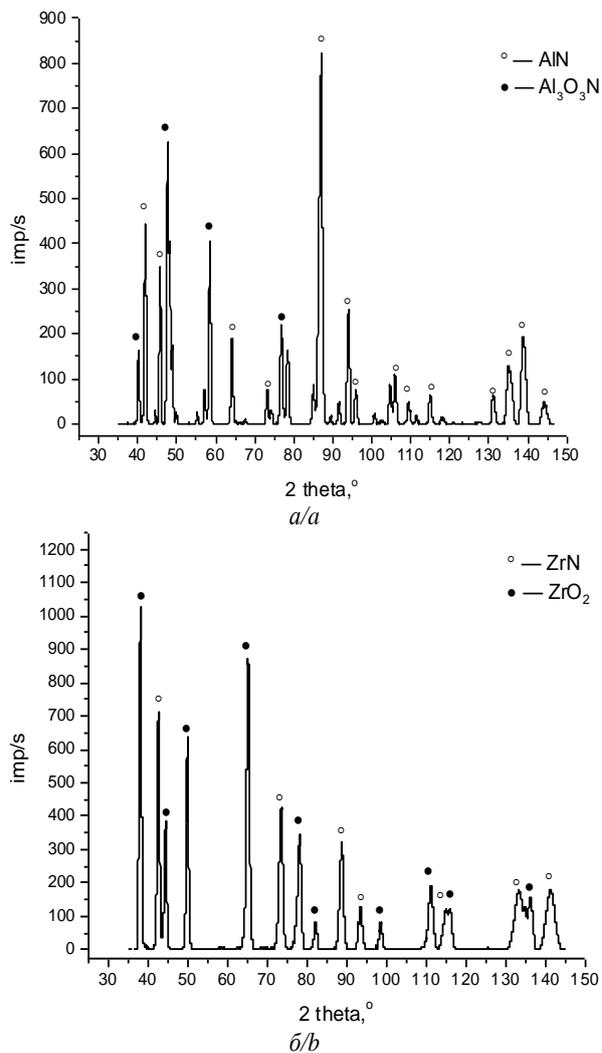


Рис. 3. Дифрактограммы горячепрессованной керамики на основе оксинитридов алюминия (а) и циркония (б)

Fig. 3. Diffraction patterns of hot-pressed ceramics based on aluminum (a) and zirconium oxynitrides (b)

Из дифрактограмм (рис. 3) видно, что оксинитрид алюминия по преимуществу состоит из оксинитридной и нитридной фаз алюминия. Исходя из пиков интенсивностей, данные фазы представлены примерно в равном соотношении.

В горячепрессованной смеси диоксида и нитрида циркония оксинитридных фаз не обнаруживается. Это подтверждается данными растровой электронной микроскопии: структура спеченной керамики на основе смеси диоксида и нитрида циркония гетерогенна. Если растворимость компонентов и имеет место быть, то она весьма незначительна. Это может быть объяснено тем, что цирконий является сильным нитридообразующим элементом в условиях высоких температур и инертной атмосферы, в которых осуществляется процесс горячего прессования керамических материалов. На рис. 4, 5 приведены фотографии микроструктур горячепрессованной керамики.

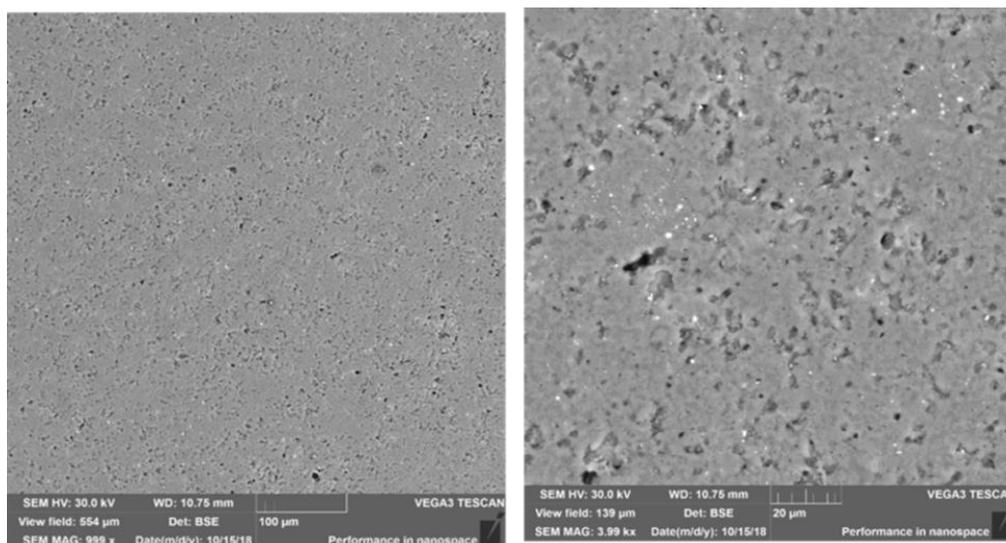


Рис. 4. Фотографии микролифов поверхности образца керамики $Al_{23}O_{27}N_5$
Fig. 4. Photographs of microsections of the surface of a ceramic sample $Al_{23}O_{27}N_5$

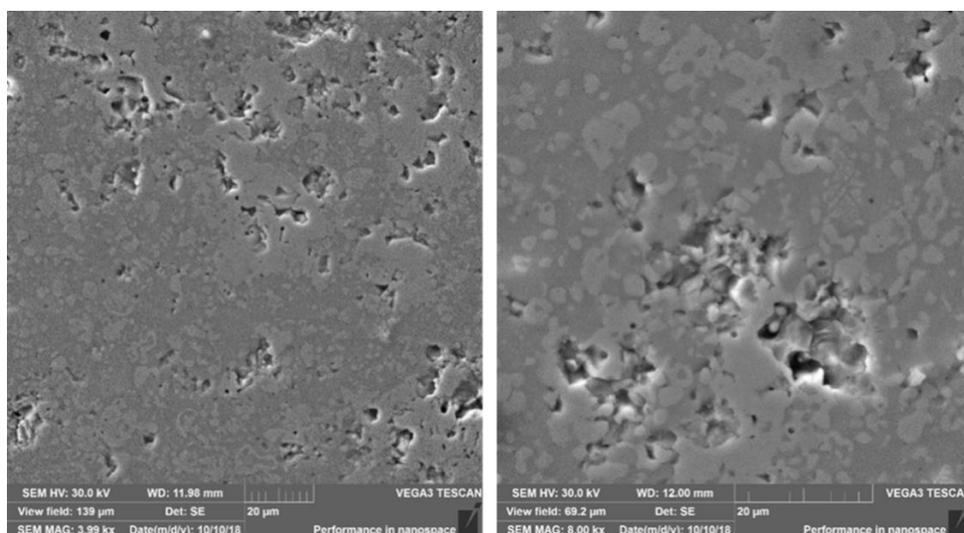


Рис. 5. Фотографии микролифов поверхности образца керамики 50 % ZrO_2 –50 % ZrN
Fig. 5. Photos of microsections of the surface of a ceramic sample 50 % ZrO_2 –50 % ZrN

Микроструктура оксинитрида алюминия однородна, наблюдается некоторая пористость, не превышающая 3–5 %. Оксинитрид циркония имеет двухфазную структуру: светлая составляющая представлена нитридом циркония, серая составляющая – оксинитридом циркония. Физико-механические характеристики, полученные методами наноиндентирования и Scratch-тестирования, относятся к локальным беспористым участкам материала.

Заключение

Показано, что методики наноиндентирования и Scratch-тестирования являются эффективными средствами оценки физико-механических характеристик спеченных керамических материалов, обладающим высокой степенью достоверности результатов.

Была определена плотность спеченных образцов, измерены модуль упругости, нанотвердость и предел прочности с использованием методик наноиндентро-

вания и Scratch-тестирования, исследованы фазовый состав и микроструктура спеченных образцов.

Разработан уникальный метод получения высокоплотной прочной керамики на основе оксинитрида алюминия, включающий синтез порошка Al_2O_3 -AlN путем сжигания нанопорошка Al и последующее горячее прессование в инертной атмосфере. Полученная керамика имела следующие физико-механические свойства: $E_{IT}=286537$ МПа, $H_{IT}=13160$ МПа, $\sigma_s=2912$ МПа.

Методом горячего прессования получена высокомодульная прочная оксинитридная керамика ZrO_2 - ZrN (модуль упругости при индентировании $E_{IT}=323897$ МПа, твердость индентирования $H_{IT}=19244$ МПа, прочность образца $\sigma_s=381$ МПа).

Полученные материалы предлагаются для использования в технологии функциональной керамики нового поколения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ: проект № 19-03-00160.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Theoretical study on composition- and pressure-dependent mechanical properties of AlON solid solution / L. Ren, H. Wang, B. Tu, X. Zong, W. Wang, Z. Fu // Journal of the American Ceramic Society. – 2020. – V. 103 (8). – P. 4390–4401.
2. Akopdzhanyan T.G., Rupasov S.I., Vorotilo S. Chemically activated combustion synthesis of AlON under high nitrogen pressure // Combustion and Flame. – 2021. – V. 232. – № 11560. – P. 1–7.
3. Synthesis of aluminium oxynitride (AlON) and study of the properties of ceramics based on it / A.S. Lysenkov, I.A. Timoshkin, Y.F. Kargin, D.D. Titov, A.Y. Fedotov, A.A. Ashmarin, A.E. Baranchikov // Inorganic Materials. – 2016. – V. 7 (4). – P. 517–519.
4. Synthesis of aluminium oxynitride nanopowders in a plasma reactor with a confined jet flow / A.V. Samokhin, A.G. Astashov, N.V. Alekseev, M.A. Sinaysky, Yu.V. Tsvetkov // Inorganic Materials. – 2018. – V. 9 (3). – P. 393–398.
5. AlON: synthesis and thermal properties / N.A. Gribchenkova, E.N. Beresnev, K.G. Smorchkov, M.A. Mikhailov, A.V. Shcherbakov, T.A. Ivanova, A.S. Alikhanyan // Russian Journal of Inorganic Chemistry. – 2015. – V. 60 (9). – P. 1137–1142.
6. Parauha Y.R., Sahu V., Dhoble S.J. Prospective of combustion method for preparation of nanomaterials: a challenge // Materials Science and Engineering: B. – 2021. – V. 267. – 115054. – P. 1–29.
7. Feng Z., Qi J., Lu T. Highly-transparent AlON ceramic fabricated by tape-casting and pressureless sintering method // Journal of the European Ceramic Society. – 2020. – V. 40 (4). – P. 1168–1173.
8. A new and highly active sintering additive: SiO₂ for highly-transparent AlON ceramic / Z. Feng, J. Qi, X. Guo, Y. Wang, X. Cao, Y. Yu, C. Meng, T. Lu // Journal of Alloys and Compounds. – 2019. – V. 787. – P. 254–259.
9. Min J.-H., Lee J., Yoon D.-H. Fabrication of transparent γ -AlON by direct 2-step pressureless sintering of Al₂O₃ and AlN using an AlN-deficient composition // Journal of the European Ceramic Society. – 2019. – V. 39 (15). – P. 4673–4679.
10. New method of free silicon determination in pressureless sintered silicon nitride by Raman spectroscopy and XRD / O.A. Lukianova, A.A. Parkhomenko, V.V. Krasilnikov, A.N. Khmara, A.P. Kuzmenko // Ceramics International. – 2019. – V. 45 (11). – P. 14338–14346.
11. Galakhov A.V., Zelenskii V.A. Sintering of aluminium oxynitride powder prepared by self-propagating // High-Temperature synthesis, Refractories and Industrial Ceramics. – 2018. – V. 59 (1). – P. 25–26.
12. Kolmakov A.G., Prosvirnin D.V., Larionov M.D., Alikhanyan A.S., Prutskov M.E., Pivovarchik S.V. Effect of sintering parameters on the phase composition of ceramic based on aluminium oxynitride // Inorganic Materials: Applied Research. – 2019. – V. 10 (2). – P. 416–419.
13. Van Tendeloo G., Thomas G. Electron microscopy investigation of the ZrO₂-ZrN system-I. Formation of an incommensurate superstructure ZrON₆ // Acta Metallurgica. – 1983. – V. 31. – P. 1611–1618.
14. Synthesis and thermal behavior of zirconium oxynitride / J. Ando, K. Shinozaki, N. Mizutani, M. Kato // Journal of the Ceramic Society of Japan. – 1988. – V. 96 (12). – P. 1157–1162.
15. Recherches sur les oxynitrides metalliques / R. Collongues, J.C. Gilles, A.M. Lejus, M.P. Jorba, D. Michel // Materials Research Bulletin. – 1967. – V. 2. – P. 837–848.
16. Ивановский А.Л., Зайнуллина В.М., Окатов С.В. Химическая связь и электронное строение оксинитридов циркония // Журнал структурной химии. – 2000. – Т. 41. – № 4. – С. 679–687.
17. On the effects of powder morphology on the post-comminution ballistic strength of ceramics / G.J. Appleby-Thomas, D.C. Wood, A. Hameed, J. Painter, B. Fitzmaurice // International Journal of Impact Engineering. – 2017. – V. 100. – P. 46–55.
18. Mostovshchikov A.V., Ilyin A.P., Zakharova M.A. Structural and energy state of electroexplosive aluminum nanopowder // Key Engineering Materials. – 2016. – V. 712. – P. 261–266.
19. Facile synthesis of powder-based processing of porous aluminum nitride / K. Nam, K. Hong, H. Park, H. Choe // Journal of the European Ceramic Society. – 2018. – V. 38 (4). – P. 1164–1169.
20. Трушин Ю.В. Физическое материаловедение. – СПб.: Наука, 2000. – 286 с.
21. Матренин С.В., Слосман А.И. Техническая керамика. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 75 с.
22. Матренин С.В., Ильин А.П., Кулявцева С.В. Низкотемпературное спекание корундовых порошков // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 2. – С. 127–135.
23. Маслюк В.А., Львова Г.Г. Перспективные тенденции развития методов получения порошковых конструкционных материалов // Порошковая металлургия. – 2006. – № 5 (6). – С. 92–100.
24. Adaptation and self-healing effect of tribo-oxidizing in high-speed sliding friction on ZrB₂-SiC ceramic composite / N.L. Savchenko, Y.A. Mirovoj, A.S. Buyakov, A.G. Burlachenko., M.A. Rudmin, I.N. Sevostyanova, S.P. Buyakova, S.Y. Tarasov // Wear. – 2020. – V. 446–447. – 203204.
25. Алымов М.И. Порошковая металлургия нанокристаллических материалов. – М.: Наука, 2007. – 169 с.
26. Хасанов О.Л., Двилис Э.С., Бикбаева З.Г. Методы компактирования и консолидации наноструктурных материалов и изделий. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 212 с.
27. Золоторевский В.С. Механические свойства металлов. – М.: МИСиС, 1998. – 400 с.

Поступила 26.01.2022 г.

Информация об авторах

Матренин С.В., кандидат технических наук, доцент отделения материаловедения в машиностроении Инженерной школы новых производственных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Мостовщиков А.В., доктор технических наук, старший научный сотрудник Инженерной школы ядерных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета; доцент кафедры физической электроники Факультета электронной техники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

Мировой Ю.А., аспирант Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Чудинова А.О., инженер отделения естественных наук школы базового инженерного образования Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 666.762.11.539.4

RESEARCH OF STRUCTURE AND PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CERAMICS BASED ON ALUMINUM AND ZIRCONIUM OXYNITRIDES

Sergey V. Matrenin¹,
vm-s@mail.ru

Andrey V. Mostovshchikov^{1,2},
avmost@tpu.ru

Yuriy A. Mirovoy¹,
y.a.mirovoy@gmail.com

Alexandra O. Chudinova¹,
chudinova.1509@mail.ru

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

² Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
40, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Relevance. The development of geology in the XXI century is impossible without solving the fundamental problems of modern materials science, caused by the tasks of creating new materials for functional purposes. Despite the variety of methods for aluminum and zirconium oxynitride synthesis and consolidating ceramic based on them, currently being developed, scientific and practical interest is the solid phase synthesis during compaction of corresponding mixtures in inert atmosphere. In this case, powders can be pressed into compacts, both before and during sintering. In the latter case various variants of hot pressing and spark plasma sintering can be applied. For refractory ionic-covalent transition metal oxynitrides, the activated sintering is an urgent problem, since it is carried out by a diffusion mechanism. To solve this problem, it is necessary to study the patterns and mechanisms of consolidation of oxynitride ceramic materials and to search for appropriate activating additives and activation methods.

The main aim of the research is to develop a method for obtaining high-density durable ceramics based on aluminum and zirconium oxynitride, including the synthesis of combustion of powder mixtures followed by hot pressing in inert atmosphere and to investigate the structure and physico-mechanical properties of the resulting compacts.

The methods: sieve analysis of coarse powders using the A20 analyzer, X-ray phase analysis of the samples under study, hydrostatic weighing to determine the apparent density of sintered samples, measurement of the microhardness of sintered samples, scanning electron microscopy, scratch testing.

The results. Using a unique method, including the synthesis of Al_2O_3 -AlN powder by burning Al nanopowder and subsequent hot pressing in inert atmosphere, an oxynitride ceramic based on aluminum oxynitride was obtained. The resulting ceramics had the following physical and mechanical properties: modulus of elasticity during indentation $E_{IT}=286537$ MPa, indentation hardness $H_{IT}=13160$ MPa, specimen strength $\sigma_s=2912$ MPa. The ultra-high solid oxynitride ceramic ZrO_2 -ZrN (modulus of elasticity during indentation $E_{IT}=323897$ MPa, indentation hardness $H_{IT}=19244$ MPa, specimen strength $\sigma_s=3381$ MPa) was obtained by hot pressing. The obtained materials are proposed for use in the technology of new generation functional ceramics.

Key words:

Aluminum nanopowder, zirconium dioxide, aluminum oxynitride, ceramics, combustion synthesis, hot pressing, nanoindentation.

The research was financially supported by RFBR: project no. 19-03-00160.

REFERENCES

- Ren L., Wang H., Tu B., Zong X., Wang W., Fu Z. Theoretical study on composition- and pressure-dependent mechanical properties of AlON solid solution. *Journal of the American Ceramic Society*, 2020, vol. 103 (8), pp. 4390–4401.
- Akopdzhanyan T.G., Rupasov S.I., Vorotilo S. Chemically activated combustion synthesis of AlON under high nitrogen pressure. *Combustion and Flame*, 2021, vol. 232, 11560, pp. 1–7.
- Lysenkov A.S., Timoshkin I.A., Kargin Y.F., Titov D.D., Fedotov A.Y., Ashmarin A.A., Baranchikov A.E. Synthesis of aluminium oxynitride (AlON) and study of the properties of ceramics based on it. *Inorganic Materials*, 2016, vol. 7 (4), pp. 517–519.
- Samokhin A.V., Astashov A.G., Alekseev N.V., Sinaysky M.A., Tsvetkov Yu.V. Synthesis of aluminium oxynitride nanopowders in a plasma reactor with a confined jet flow. *Inorganic Materials*, 2018, vol. 9 (3), pp. 393–398.
- Gribchenkova N.A., Beresnev E.N., Smorchkov K.G., Mikhailov M.A., Shcherbakov A.V., Ivanova T.A., Alikhanyan A.S. AlON: synthesis and thermal properties. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 2015, vol. 60 (9), pp. 1137–1142.
- Parauha Y.R., Sahu V., Dhoble S.J. Prospective of combustion method for preparation of nanomaterials: a challenge. *Materials Science and Engineering: B*, 2021, vol. 267, 115054, pp. 1–29.
- Feng Z., Qi J., Lu T. Highly-transparent AlON ceramic fabricated by tape-casting and pressureless sintering method. *Journal of the European Ceramic Society*, 2020, vol. 40 (4), pp. 1168–1173.
- Feng Z., Qi J., Guo X., Wang Y., Cao X., Yu Y., Meng C., Lu T. A new and highly active sintering additive: SiO_2 for highly-transparent AlON ceramic. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, vol. 787, pp. 254–259.
- Min J.-H., Lee J., Yoon D.-H. Fabrication of transparent γ -AlON by direct 2-step pressureless sintering of Al_2O_3 and AlN using an AlN-deficient composition. *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, vol. 39 (15), pp. 4673–4679.
- Lukianova O.A., Parkhomenko A.A., Krasilnikov V.V., Khmara A.N., Kuzmenko A.P. New method of free silicon determination in pres-

- sureless sintered silicon nitride by Raman spectroscopy and XRD. *Ceramics International*, 2019, vol. 45 (11), pp. 14338–14346.
11. Galakhov A.V., Zelenskii V.A. Sintering of aluminium oxynitride powder prepared by self-propagating. *High-Temperature synthesis, Refractories and Industrial Ceramics*, 2018, vol. 59 (1), pp. 25–26.
 12. Kolmakov A.G., Prosvirnin D.V., Larionov M.D., Alikhanyan A.S., Prutskov M.E., Pivovarchik S.V. Effect of sintering parameters on the phase composition of ceramic based on aluminium oxynitride. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2019, vol. 10 (2), pp. 416–419.
 13. Van Tendeloo G., Thomas G. Electron microscopy investigation of the ZrO₂-ZrN system-I. Formation of an incommensurate superstructure ZrON₆. *Acta Metallurgica*, 1983, vol. 31, pp. 1611–1618.
 14. Ando J., Shinozaki K., Mizutani N., Kato M. Synthesis and thermal behavior of zirconium oxynitride. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 1988, vol. 96 (12), pp. 1157–1162.
 15. Collongues R., Gilles J.C., Lejus A.M., Jorba P.M., Michel D. Recherches sur les oxynitrides métalliques. *Materials Research Bulletin*, 1967, vol. 2, pp. 837–848.
 16. Ivanovskiy A.L., Zainullina V.M., Okatov S.V. Chemical bond and electronic structure of zirconium oxynitrides. *Journal of Structural Chemistry*, 2000, vol. 41, no. 4, pp. 553–559.
 17. Appleby-Thomas G.J., Wood D.C., Hameed A., Painter J., Fitzmaurice B. On the effects of powder morphology on the post-comminution ballistic strength of ceramics. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, vol. 100, pp. 46–55.
 18. Mostovshchikov A.V., Ilyin A.P., Zakharova M.A. Structural and energy state of electroexplosive aluminum nanopowder. *Key Engineering Materials*, 2016, vol. 712, pp. 261–266.
 19. Nam K., Hong K., Park H., Choe H. Facile synthesis of powder-based processing of porous aluminum nitride. *Journal of the European Ceramic Society*, 2018, vol. 38 (4), pp. 1164–1169.
 20. Trushin Yu.V. *Fizicheskoe materialovedenie* [Physical materials]. St-Petersburg, Nauka Publ. 2000. 286 p.
 21. Matrenin S.V., Slosman A.I. *Tekhnicheskaya keramika* [Technical ceramics]. Tomsk, TPU Publ. house, 2004. 75 p.
 22. Matrenin S.V., Ilyin A.P., Kulyavtseva S.V. Low-temperature sintering of corundum powders. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 2, pp. 127–135. In Rus.
 23. Maslyuk V.A., Lvova G.G. Perspective tendencies in the development of methods for obtaining powder constructional materials. *Powder metallurgy*, 2006, no. 5 (6), pp. 92–100. In Rus.
 24. Savchenko N.L., Mirovoj Y.A., Buyakov A.S., Burlachenko A.G., Rudmin M.A., Sevostyanova I.N., Buyakova S.P., Tarasov S.Y. Adaptation and self-healing effect of tribo-oxidizing in high-speed sliding friction on ZrB₂-SiC ceramic composite. *Wear*, 2020, vol. 446–447, 203204.
 25. Alymov M.I. *Poroshkovaya metallurgiya nanokristallicheskih materialov* [Powder metallurgy of nanocrystalline materials]. Moscow, Nauka Publ., 2007. 169 p.
 26. Khasanov O.L., Dvilis E.S., Bikbaeva Z.G. *Metody kompaktirovaniya i konsolidatsii nanostrukturnykh materialov i izdeliy* [Methods of compaction and consolidation of nanostructured materials and products]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2008. 212 p.
 27. Zolotarevsky V.S. *Mekhanicheskie svoystva metallov* [Mechanical properties of metals]. Moscow, MISiS Publ., 1998. 400 p.

Received: 26 January 2022.

Information about the authors

Sergey V. Matrenin, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Andrey V. Mostovshchikov, Dr. Sc., senior researcher, National Research Tomsk Polytechnic University; associate professor, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.

Yuriy A. Mirovoy, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexandra O. Chudinova, engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 556.161:556.166

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДИК ПРОГНОЗА МАКСИМАЛЬНЫХ УРОВНЕЙ И ОБЪЕМА СТОКА ПЕРИОДА ПОЛОВОДЬЯ ГОРНОЙ РЕКИ

Галахов Владимир Прокопьевич¹,
galahov@iwer.ru

Ловцкая Ольга Вольфовна¹,
lov@iwer.ru

Самойлова Светлана Юрьевна¹,
bastet05@list.ru

Мардасова Елена Владимировна²,
mardasova_ev@mail.ru

¹ Институт водных и экологических проблем СО РАН,
Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1.

² Алтайский государственный университет,
Россия, 656049, г. Барнаул, пр. Ленина, 61.

Актуальность работы обусловлена необходимостью анализа методов, используемых для оценки снегозапасов в речных бассейнах и прогнозирования половодья. В условиях недостаточности гидрометеорологической информации для прогноза объема и максимальных уровней половодья, как правило, используются статистические модели, основанные на корреляционной зависимости параметров стока от снегозапасов, либо уравнения множественной линейной регрессии. При этом нет обоснованного сравнения традиционных методов прогноза, основанных на расчете суммы зимних осадков (снегозапасов), и статистических моделей множественной регрессии.

Цель: сравнительный анализ методик расчета сумм зимних осадков в бассейне по традиционно применяемым высотным зависимостям и по авторской методике при помощи орографической добавки к скорости вертикальных движений воздушных масс; сравнительный анализ традиционных статистических методов прогноза и моделей множественной линейной регрессии на примере бассейна реки Амыл.

Методы: комплексный географо-гидрометеорологический анализ; выявление зависимостей по данным многолетних гидрометеорологических наблюдений с использованием методов математической статистики (корреляционный и регрессионный анализ); моделирование снегозапасов с использованием орографической добавки к скорости вертикальных движений.

Результаты. В результате использования двух разных подходов к определению сумм зимних осадков (по высотным зависимостям и с помощью орографической добавки к скорости вертикальных движений воздушных масс) получены идентичные статистические зависимости с близкими коэффициентами детерминации. Разработаны модели прогноза объема стока и максимальных уровней половодья на основе парной корреляции и с использованием множественного регрессионного анализа. Сравнительный анализ традиционных методов прогноза стока, основанных на расчете суммы зимних осадков (снегозапасов), и статистических моделей множественной регрессии также показал идентичность результатов. Для прогноза максимальных уровней воды, вызванных таянием снега, предпочтительнее использование однофакторных зависимостей.

Ключевые слова:

Река Енисей, Западный Саян, река Туба, бассейн реки Амыл, зимние осадки, снегозапасы, высотная зависимость, орографическая добавка к скорости вертикальных движений, статистическая модель множественной регрессии.

Введение

Объем стока и высокие уровни половодья в условиях длительной зимы обоснованы снегозапасами в конце зимы, интенсивностью снеготаяния, жидкими осадками периода половодья, степенью увлажнения и промерзания почвогрунтов бассейна в период снеготаяния [1–6].

Однако, как многократно указывали отечественные и зарубежные гидрологи [7–10], в горных бассейнах прогнозы стока и максимальных уровней периода половодья слабо обеспечены гидрометеорологической информацией. Метеорологические станции и гидрологические посты, фиксирующие увлажнение (количество осадков), расположены в речных долинах и не отражают условия увлажнения склонов и водораздельных пространств. В этой связи весьма показательно

мнение К.Г. Колльера: «В настоящее время многие гидрологи приходят к выводу, что все более усложняющееся моделирование реакции речных бассейнов на внешние воздействия будет оставаться бесплодным, пока на основе широких полевых исследований не удастся уменьшить погрешность определений, по крайней мере пространственной изменчивости осадков и физических характеристик почв» [11. С. 15].

С этим мнением можно полностью согласиться, но рассчитывать на расширение полевых наблюдений в бассейнах сибирских рек не приходится. Метеорологическая сеть в период развала СССР подверглась значительному сокращению (или оптимизации). Можно лишь надеяться, что Национальные проекты России помогут восстановить утраченную часть сети Росгидромета [12, 13].

Постановка задачи

В первую очередь, максимальные уровни сибирских горных рек зависят от величины снегонакопления в бассейне. В то же время сложность механизмов снегонакопления и слабая обеспеченность гидрометеорологической информацией значительно затрудняют оценку снеготронов. Традиционно в гидрологических исследованиях снеготроны в горных районах увязывают с абсолютной высотой пунктов наблюдений [14, 15]. В последние десятилетия разрабатываются гидрологические модели, основанные на данных дистанционного зондирования [3, 9, 10, 15–21].

Исследованию условий формирования талого стока бассейна р. Тубы и р. Амыл, в частности, посвящен ряд работ, выполненных на основе ландшафтно-гидрологического анализа и математического моделирования [22, 23], материалов снегомерных съемок и дистанционного зондирования [24]. В работах [8, 25] представлены модели множественной линейной регрессии для прогноза максимальных уровней воды и водности половодья.

В данной работе на примере бассейна р. Амыл разработаны статистические одно- и многофакторные модели среднесрочного прогноза объема стока и максимальных уровней половодья с использованием различных подходов к оценке сумм зимних осадков. Выполнен сравнительный анализ полученных моделей.

Объект исследования

Река Амыл является левым притоком р. Тубы (бассейн р. Енисей), впадающей в Красноярское водохранилище (рис. 1). Бассейн р. Амыл располагается в южной части Красноярского края, на северном склоне горной системы Западного Саяна.

Площадь бассейна р. Амыл в створе в/п Качулька (Качульские Выселки) составляет 9850 км², или примерно одну треть водосборного бассейна р. Тубы у в/п Бугуртак (31800 км²). Расстояние до впадения в р. Тубу – 11 км. Пост открыт в 1933 г. Основная площадь бассейна сосредоточена в высотном интервале от 250 до 1500 м, средняя высота водосбора – 797 м, максимальные отметки бассейна достигают 2200 м (вершина без названия, водораздел Амыла и Казыра). Абсолютные высоты водоразделов составляют 1500–2000 м. Большая часть водосборного бассейна залесена (94 %), заболоченность – 2 % (в нижнем течении). На водораздельных участках выше 1,5 км имеются выходы скальных пород [26] (табл. 1).

Основным достоинством бассейна р. Амыл, с точки зрения гидрологических исследований, является обеспеченность метеорологическими наблюдениями (в частности, информацией об осадках) всей амплитуды высот бассейна (табл. 2).

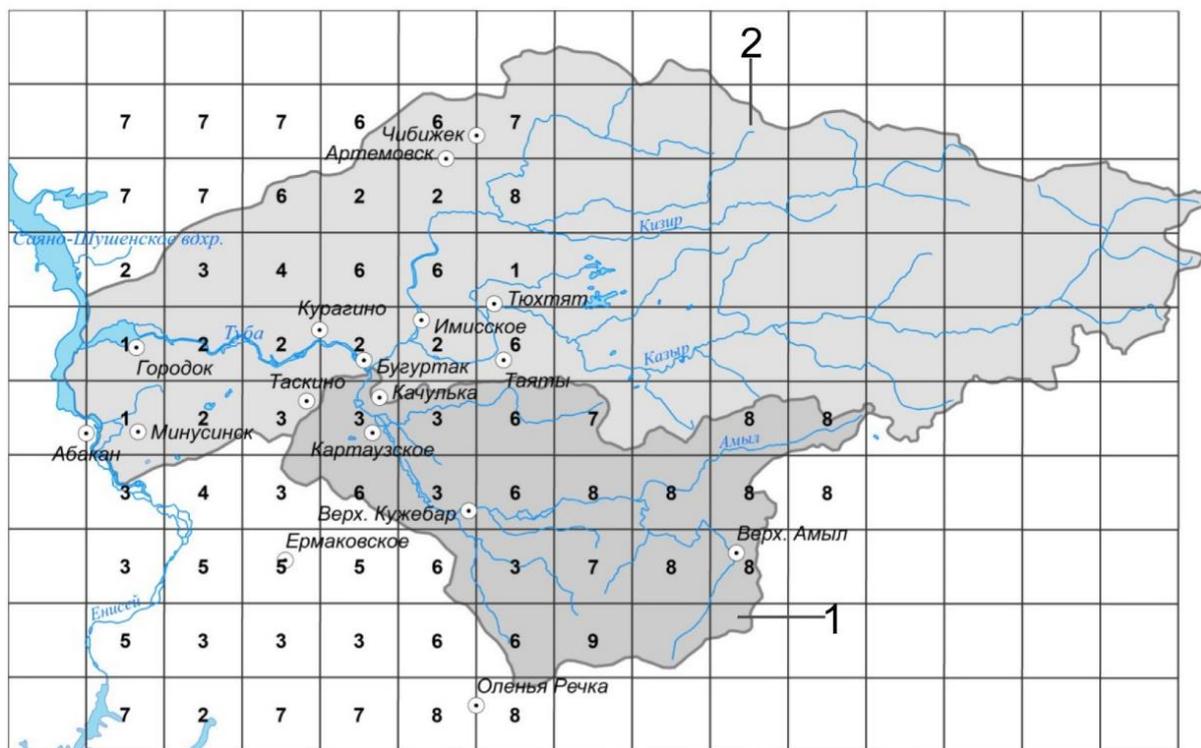


Рис. 1. Матрица орографической добавки к скорости вертикальных движений для бассейна р. Амыл. Условные обозначения: 1) –0,75; 2) –0,27; 3) –0,055; 4) –0,025; 5) –0,0; 6) +0,055; 7) +0,3; 8) +0,75 м/с. Выделены бассейны: 1 – Амыла, 2 – Тубы. Орографическая добавка относится к левому нижнему углу ячейки

Fig. 1. Matrix of orographic correction to the velocity of vertical movements for the Amyl River basin. Symbols: 1) –0,75; 2) –0,27; 3) –0,055; 4) –0,025; 5) –0,0; 6) +0,055; 7) +0,3; 8) +0,75 m/s. The Amyl (1) and Tuba (2) basins are highlighted. The orographic correction refers to the low left corner of the cell

Таблица 1. Абсолютная высота и сумма средних многолетних осадков за холодный период (ноябрь–март) в бассейне р. Амыл и нижней части бассейна р. Тубы [27]

Table 1. True altitude and average long-term precipitation amount for a cold period (November–March) in Amyl River and low Tuba River basins [27]

Бассейн р. Амыл Amyl River basin			Бассейн р. Туба Tuba River basin		
Осадкомерный пост Precipitation gauge	Абсолютная высота, м True altitude, m	Сумма осадков (XI–III) Precipitation amount (XI–III)	Осадкомерный пост Precipitation gauge	Абсолютная высота, м True altitude, m	Сумма осадков (XI–III) Precipitation amount (XI–III)
Каратузское Karatuzskoe	320	125	Курагино Kuragino	284	124
Верх. Кужебар Verh. Kuzhebar	340	231	Чибижек Chibizhek	570	299
Верх. Амыл Verh. Amyl	780	388	Ермаковское Ermakovskoe	300	147
Оленья Речка Olenya Rechka	1404	473	Минусинск Minusinsk	200	65
Таскино/Taskino	280	120	Бугуртак/Bugurtak	280	134
			Имисское/Imisskoe	350	158
			Городок/Gorodok	220	65
			Тюхтят/Tyukhtyat	370	177

Таблица 2. Распределение по высотным зонам бассейна р. Амыл (до створа с Качулька)

Table 2. Distribution of Amyl river basin (site Kachulka) by altitude zones

Высотная зона, м Altitude zone, m	Площадь, км ² Area, km ²	% от всей площади % of total area
250–500	3800	38,5
500–1000	3600	36,5
1000–1500	2100	21,4
>1500	350	3,6
всего/total	9850	100

Исходные данные

Для построения однофакторных моделей прогноза максимальных уровней и объема стока половодья выполнена оценка снегозапасов на основе метеорологических данных станций и постов, находящихся в пределах бассейна р. Амыл либо в непосредственной близости от него (табл. 1). Для оценки снегозапасов вычислялись суммы месячных осадков с октября предшествующего года по июнь (включительно) рассчитываемого. Кроме этого, по ГМС Верх. Кужебар (находится примерно в географическом центре исследуемого бассейна) использовались суточные данные о температуре воздуха и сумме осадков. Необходимые метеорологические данные выбирались из Метеорологических ежемесячников, публикация которых прекратилась в конце восьмидесятых годов прошлого века [28] (рис. 2, кривая 1).

Для проверки моделей выбран временной промежуток 2008–2017 гг. (выбор обусловлен наличием ис-

ходных данных в открытых интернет-источниках). За этот период использовались данные метеорологических станций: Минусинск, Оленья Речка, Курагино, Щетинино (Чибижек). Привлекались также метеоданные бассейна р. Абакан: Неожиданный, Абакан, Шира, Коммунар, Таштып. Как показал сравнительный анализ зависимости орографической добавки к скорости вертикальных движений от абсолютной высоты пункта наблюдений, использование осадкомерных пунктов, расположенных в бассейне р. Абакан, вполне приемлемо (рис. 2, кривая 2).

Расчет сумм осадков выполнялся двумя способами: по высотным зависимостям (зависимость суммы осадков на метеостанции от ее абсолютной высоты) и по зависимостям от орографической добавки к скорости вертикальных движений (методика подробно описана в [29]).

Информация о максимальных уровнях и слое стока половодья по в/п Качулька за период 1966–1980 гг. взята из соответствующего справочника [30]. Для анализа половодья и выделения максимальных уровней за счет таяния снега за период 1981–1986 гг. [31] строились комплексные графики с суточным разрешением: ход уровней с марта по июль, термический режим и осадки по ГМС Верх. Кужебар.

Анализ гидрографа и оценка максимальных уровней за счет таяния снега за период 2008–2017 гг. выполнены аналогичным образом с использованием метеорологической информации по ГМС Каратузское, расположенной на левом берегу Амыла, в 15 км выше по течению в/п Качулька. Определение сроков половодья и расчет слоя стока за период 2008–2017 гг. проводились авторами также по комплексным графикам.

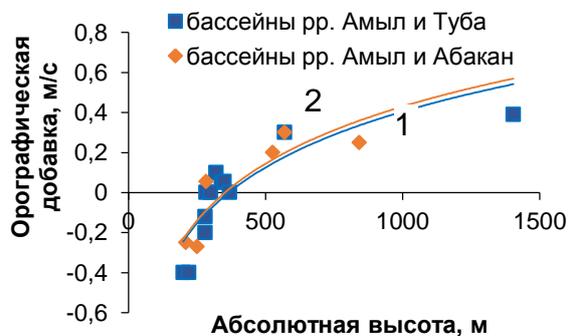


Рис. 2. Зависимости орографической добавки к скорости вертикальных движений от абсолютной высоты осадкомерных пунктов (1 – $y=0,41\ln(x)-2,41$, $R^2=0,8$; 2 – $y=0,40\ln(x)-2,38$, $R^2=0,74$, где x – абсолютная высота, м; y – орографическая добавка, м/с)

Fig. 2. Dependences of orographic correction to the velocity of vertical movements on precipitation gauge altitudes (1 – $y=0,41\ln(x)-2,41$, $R^2=0,8$; 2 – $y=0,40\ln(x)-2,38$, $R^2=0,74$, where x – absolute elevation, m; y – orographic correction, m/s)

Модель множественной линейной регрессии для прогноза максимальных уровней и объема половодья построена на основе анализа данных тех же метеостанций и постов (табл. 1). Дополнительно привлека-

лись данные метеостанций, расположенных в направлении основных влагонесущих воздушных масс – Абакан, Ненастная, Неожиданный. В качестве исходных данных использовались суммы месячных атмосферных осадков и среднемесячные температуры воздуха по перечисленным выше метеостанциям, а также максимальные запасы воды в снеге по метеостанциям Оленья Речка и Ермаковское.

Результаты

Как известно, сток половодья формируется под воздействием ряда факторов [1, 32–36], в число которых входят:

- запасы воды, накопленные в бассейне к началу снеготаяния;
- жидкие осадки в период снеготаяния и на спаде половодья;
- группа факторов, определяющих водопоглощающую емкость речного бассейна: состояние почвогрунтов, степень их увлажнения и промерзания.

Расчет суммы осадков за холодный период с использованием высотных зависимостей

Традиционно в гидрологических исследованиях величина снеготаяния в бассейне рассчитывается по высотным зависимостям [14]. Для бассейна р. Амыл прослеживается устойчивая статистически значимая ($R^2=0,96$) связь средней многолетней суммы осадков и абсолютной высоты, на которой установлен суммарный осадкомер (табл. 1, рис. 3).

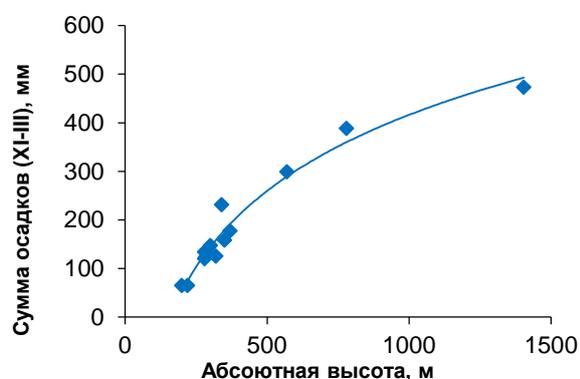


Рис. 3. Зависимость средней многолетней суммы осадков за холодный период (ноябрь–март) от абсолютной высоты осадкомерного поста (бассейн р. Амыл) ($y = 225,7 \ln(x) - 1142,9$; $R^2 = 0,96$, где x – абсолютная высота, м; y – средняя многолетняя сумма осадков (ноябрь–март), мм)

Fig. 3. Dependence of average annual precipitation amount in the cold period (November–March) on precipitation gauge altitudes for the Amyl river basin ($y = 225,7 \ln(x) - 1142,9$; $R^2 = 0,96$, where x – absolute elevation, m; y – mean total precipitation (November–March), mm)

Расчет с использованием орографической добавки к скорости вертикальных движений

Для того чтобы предварительно оценить зависимость суммы зимних осадков от орографической добавки, построим аналогичный график связи средних

многолетних сумм зимних осадков и величины орографической добавки к скорости вертикальных движений в пунктах наблюдения (табл. 3, рис. 4).

Таблица 3. Орографическая добавка к скорости вертикальных движений и средняя многолетняя сумма зимних осадков (ноябрь–март) в бассейнах рек Амыл и Туба

Table 3. Orographic correction to the velocity of vertical movements and average long-term amount of winter precipitation (November–March) for Amyl and Tuba river basins

Осадкомерный пункт Precipitation gauge	Орографическая добавка, м/с Orographic correction, m/s	Сумма зимних осадков, мм Winter precipitation amount, mm [27]
Курагино/Kuragino	0,055	124
Чибижек/Chibizhek	0,3	299
Каратузское Karatuszskoe	0,0	125
Верх. Кужебар Verh. Kuzhebar	0,055	231
Верх. Амыл Verh. Amyl	0,55	388
Оленья Речка Olenya Rechka	0,4	473
Ермаковское Ermakovskoe	0,0	147
Минусинск Minusinsk	-0,27	65
Таскино/Taskino	-0,27	120
Бугуртак/Bugurtak	-0,07	134
Имисское/Imisskoe	0,055	158
Городок/Gorodok	-0,3	65
Тюхтят/Tyukhtyat	0,0	177

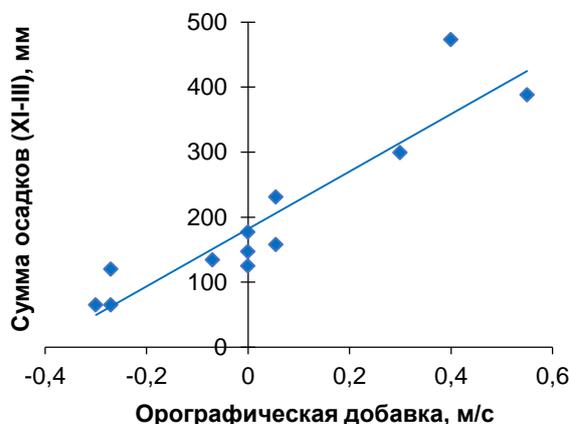


Рис. 4. Зависимость средней многолетней суммы осадков за холодный период (ноябрь–март) от орографической добавки к скорости вертикальных движений (бассейны рек Амыл и Тубы) ($y = 441,7x - 181,95$; $R^2 = 0,85$, где x – орографическая добавка, м/с; y – сумма зимних осадков)

Fig. 4. Dependence of average annual precipitation amount in the cold period (November–March) on orographic correction to the velocity of vertical movements for Amyl and Tuba river basins ($y = 441,7x - 181,95$; $R^2 = 0,85$, where x – orographic correction, m/s; y – winter precipitation amount)

Как видим, также имеется сильная прямая линейная связь, но R^2 (коэффициент детерминации) несколько меньше, чем для высотной зависимости (рис. 3).

Для оценки ежегодной суммы зимних осадков в бассейне р. Амыл анализировались два периода: с зимы 1965–1966 гг. по 1985–1986 гг. и с зимы 2007–2008 гг. по 2016–2017 гг. Соответственно, расчет производился двумя способами – по высотной зависимости и по зависимости от орографической добавки к скорости вертикальных движений воздушных масс.

Сравнительный анализ расчетов средних для бассейна сумм зимних осадков по высотным зависимостям и по орографической добавке к скорости вертикальных движений показал, что эти суммы практически одинаковые (рис. 5).

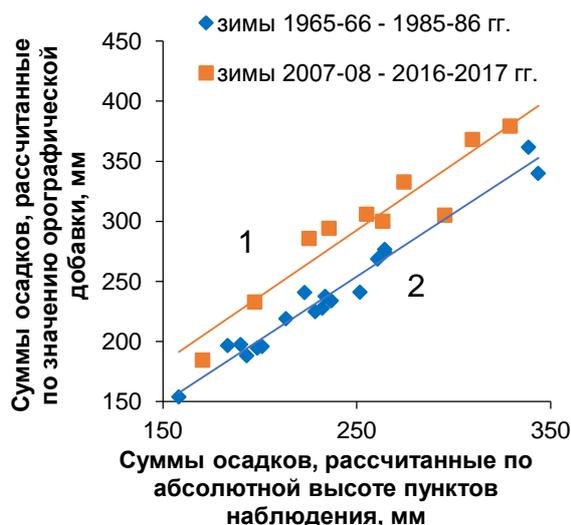


Рис. 5. Сравнительный анализ расчетов средних для бассейна сумм зимних осадков по высотным зависимостям и по орографической добавке к скорости вертикальных движений: 1 – $y = 1,1x + 16,36$; $R^2 = 0,90$; 2 – $y = 1,06x - 9,9$; $R^2 = 0,97$, где x – суммы осадков, рассчитанные по абсолютной высоте пункта наблюдения; y – суммы осадков, рассчитанные по значению орографической добавки к скорости вертикальных движений

Fig. 5. Comparative analysis of average winter precipitation calculated for the basin by altitude dependencies and orographic correction to the velocity of vertical movements: 1 – $y = 1,1x + 16,36$; $R^2 = 0,90$; 2 – $y = 1,06x - 9,9$; $R^2 = 0,97$, where x – precipitation amount calculated for the basin by altitude dependencies; y – precipitation amount calculated for orographic correction to the velocity of vertical movements

Естественно, за счет использования различных осадкомерных пунктов наблюдается некоторое различие в результатах, особенно за период 2008–2017 гг., где практически половина осадкомерных пунктов взяты из бассейна р. Абакан. Но оно (различие), на наш взгляд, минимально. Таким образом, использование орографической добавки к скорости вертикальных движений дает те же самые результаты, что и традиционно используемые для расчетов высотные зависимости. Но высотные зависимости обеспечены, в подавляющем большинстве, лишь наблюдениями по долинам рек (т. е. части водосборного бассейна).

Бассейн р. Амыл – это единственный бассейн (в нашей практике), где на высоте 1,4 км есть метеорологическая станция Оленья Речка, т. е. практически вся амплитуда высот обеспечена данными наблюдений. Это дало возможность сравнить результаты расчетов по высотным зависимостям и по орографической добавке. Естественно, использование орографической добавки – это не универсальный прием, который решает все проблемы расчета ежегодных зимних осадков в условиях недостатка наблюдений. Например, в бассейне р. Чарыш низкоротная метеостанция Змеиногорск имеет очень большую орографическую добавку и тем самым обеспечивает всю амплитуду ее изменений в бассейне. Использование же высотных зависимостей в этом бассейне не приводит к положительным результатам [37].

Влияние осадков на спаде половодья на максимальные уровни воды

Для оценки влияния жидких осадков на амплитуду уровней воды мы проанализировали динамику уровня воды в р. Амыл в период паводков, вызванных выпадением дождей на спаде половодья. Влияние дождей на динамику уровня воды до окончания снеготаяния оценить сложно, поэтому они, как правило, включаются в талый сток, т. к. имеют аналогичные условия стекания [38].

Для анализа дождевых паводков использованы годы с 1981 по 1984, по которым имеются уровни и данные метеостанции Верх. Кужебар (табл. 4).

Таблица 4. Время прохождения паводков и их подъем в бассейне р. Амыл (Качулька)

Table 4. Time of floods passage and their rise in the Amyl River basin (site Kachulka)

Год Year	Даты осадков «одного» дождя Dates of unit rain precipita- tion	Сумма осадков (Верх. Кужебар), мм Precipitation amount (Verh. Ku- zhebar), mm	Даты подъема уровня уровня Dates of level rise	Изменение уровня, см Level change, cm
1982	14–16.05	59,3	17–19.05	80
1982	10–11.06	15,4	10–12.06	18
1983	13–15.06	16,3	14–16.06	26
1984	23–27.05	28,9	27–30.05	48
1984	6–10.06	43,0	7–12.06	63
1984	15–16.06	13,9	15–17.06	24
1984	26–28.06	35,8	27–30.06	31
1984	2–4.07	28,7	3,4–5.07	44

Мы получили достаточно сильную зависимость подъёма уровней воды от суммы жидких осадков на ГМС Верх. Кужебар (рис. 6). Если использовать для аналогичной цели метеостанцию не в центре бассейна (например, Каратузское), то статистически значимая связь не наблюдается (рис. 7).

Таким образом, для включения в статистические модели осадков на спаде половодья необходимо выбирать ГМС примерно в географическом центре бассейна или характеризующую среднюю высоту водосборного бассейна. Метеостанция, находящаяся в районе выхода реки на предгорную равнину, не дает адекватных результатов.

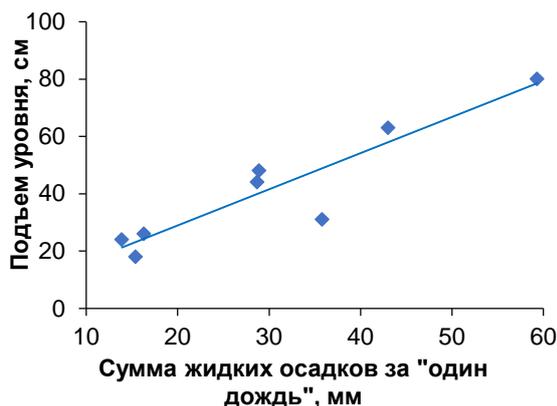


Рис. 6. Зависимость подъема уровня воды в створе Амыл–Качулька от суммы осадков за «один дождь» (период прохождения фронтальной зоны) по ГМС Верх. Куздебар ($y = 1,26x + 3,73$; $R^2 = 0,86$; где x – сумма жидких осадков за «один дождь», y – подъем уровня)

Fig. 6. Dependence of level rise in the Amyl–Kachulka site on a unit rain precipitation amount (the period of a frontal zone passage) according to the data from gauge Verh. Kuzhebar ($y = 1,26x + 3,73$; $R^2 = 0,86$, where x – precipitation amount of a unit rain; y – level rise)

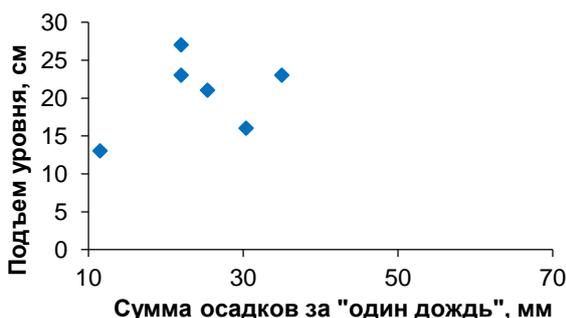


Рис. 7. Подъем уровня воды в створе Амыл–Качулька от суммы осадков за «один дождь» (период прохождения фронтальной зоны) по ГМС Каратузское

Fig. 7. Level rise in the Amyl–Kachulka site on a unit rain precipitation amount (the period of a frontal zone passage) according to the data from gauge Karatuzskoe

Влияние промерзания почвогрунтов

Влияние промерзания почвогрунтов в осенний период на сток половодья было рассмотрено нами достаточно подробно на примере бассейнов рр. Абакан, Ануй и Чарыш [37–40].

Материалы по бассейну р. Чарыша [37] и бассейну р. Абакан показали [38, 39], что условия осеннего промерзания влияют на максимальные уровни лишь в случае «присутствия» в бассейне значительной доли равнинных участков (в нашем случае это предгорные равнины). Если бассейн представлен лишь горным ландшафтом (бассейн р. Ануй [40], бассейн р. Амыл), то условия промерзания почвогрунтов слабо влияют на максимальные уровни и водность половодья.

Однофакторные стохастические модели формирования максимальных уровней и слоя стока половодья

Для создания однофакторной модели формирования максимальных уровней воды и слоя стока половодья были проанализированы регрессионные зависимости характеристик половодья (максимальные уровни, слой стока) от суммы зимних осадков, рассчитанной при помощи высотных зависимостей и орографической добавки к скорости вертикальных движений.

Зависимость максимальных уровней воды в створе Амыл–Качулька за счет таяния снега от суммы зимних осадков представлена на рис. 8.

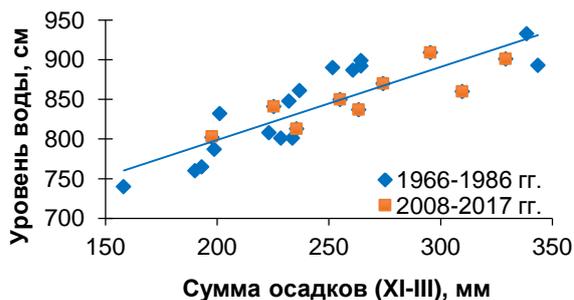


Рис. 8. Зависимость максимальных уровней воды, сформированных таянием снега, от суммы зимних осадков ($y = 0,92x + 614,95$; $R^2 = 0,74$, где x – сумма зимних осадков; y – максимальный средний суточный уровень)

Fig. 8. Dependence of snowmelt-induced maximum levels on winter precipitation amount ($y = 0,92x + 614,95$; $R^2 = 0,74$, where x – winter precipitation amount; y – maximum mean daily level)

В построении зависимости не участвуют зимы 1971–1972, 1974–1975 и 2011–2012 гг., т. к. максимальные уровни сформированы и таянием снега, и жидкими осадками.

Попытаемся увязать полученную величину зимних осадков со слоем стока в створе Амыл–Качулька (рис. 9).

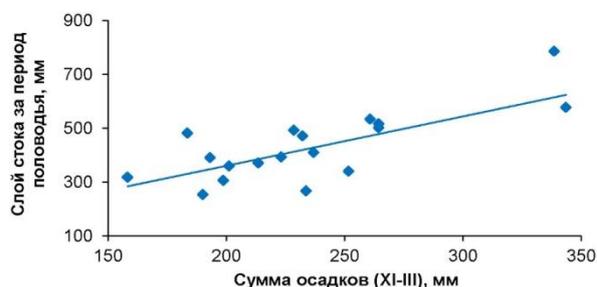


Рис. 9. Зависимость слоя стока половодья в створе Амыл–Качулька от суммы осадков за холодный период ($y = 1,67x^{1,014}$; $R^2 = 0,49$; x – сумма зимних осадков; y – слой стока за период половодья)

Fig. 9. Dependence of flood runoff layer in the Amyl–Kachulka site on precipitation amount in the cold period ($y = 1,67x^{1,014}$; $R^2 = 0,49$; x – winter precipitation amount; y – runoff depth of snowmelt flood)

Сток весеннего половодья зависит не только от суммы зимних осадков, но и от жидких осадков, выпадающих на спаде половодья (рис. 10). Как видим, разделение данных по продолжительности половодья (отдельно анализировались годы со значительным количеством осадков на спаде половодья) существенно увеличило коэффициент детерминации.

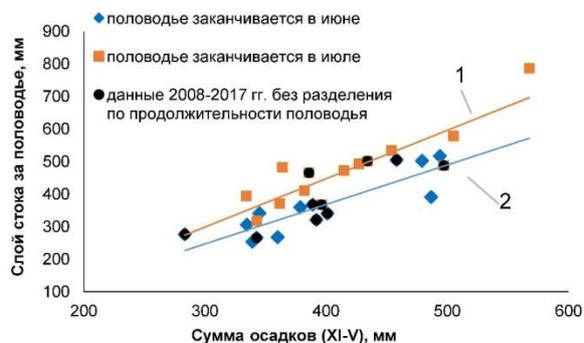


Рис. 10. Зависимость слоя стока половодья в створе Амыл–Качулька от суммы осадков за холодный период и осадков на спаде половодья (1 – $y=1,49x-147,02$; $R^2=0,77$; 2 – $y=1,21x-117,15$; $R^2=0,76$, где x – сумма осадков за ноябрь–май; y – слой стока за период половодья)

Fig. 10. Dependence of runoff layer flood in the Amyl–Kachulka site on precipitation amount in the cold period and during flood recession (1 – $y=1,49x-147,02$; $R^2=0,77$; 2 – $y=1,21x-117,15$; $R^2=0,76$, where x – November–May precipitation amount; y – runoff depth of snowmelt flood)

Статистическая модель множественной регрессии

На этапе отбора значимых предикторов построена и проанализирована корреляционная матрица, включающая следующие параметры:

- 1) среднемесячные температуры воздуха и суммы осадков с октября по июнь по всем метеостанциям и постам;
- 2) среднесезонные температуры воздуха и суммы осадков за зиму (IX–III);
- 3) средние температуры воздуха с начала половодья до окончания снеготаяния (IV–V);
- 4) суммы осадков за период половодья (IV–VI);
- 5) максимальные запасы воды в снеге по метеостанциям Ермаковское и Оленья Речка.

Выбор предикторов для построения уравнения осуществлялся путем пошаговой регрессии по мере уменьшения их влияния на сток. К сожалению, часть пунктов наблюдений имеет слишком короткий ряд (Верх. Кужебар, Таяты, Имисское, Богуртак, Каратузское), что не позволяет включить эти данные в уравнение регрессии.

Главным предиктором для прогноза объема стока и максимальных уровней половодья являются максимальные снегозапасы по ГМС Оленья Речка. На втором месте по значимости – сумма осадков за период с апреля по июнь: для максимальных уровней – по ГМС Ермаковское, а для объема половодья – по ГМС Оленья Речка. Связь снегозапасов и слоя стока свидетельствует о том, что основным источником половодья являются талые воды.

Дождевые и смешанные осадки, выпавшие в период половодья и формирующие дождевые паводки, оказывают влияние на сток половодья в значительно меньшей степени.

Практически по всем метеостанциям наблюдается слабая отрицательная связь (коэффициент корреляции от 0,43 до 0,55) слоя стока и средней температуры воздуха в апреле–мае, т. е. с начала половодья до окончания снеготаяния в бассейне. Вероятно, это свидетельствует о влиянии испарения с поверхности бассейна на объем талых вод, поступающих в речную сеть. Однако включение данного предиктора в уравнение регрессии не улучшило качество модели.

В общем виде уравнение множественной линейной регрессии для слоя стока имеет вид:

$$Y_{\text{половодья}} = 26,23 + 0,41X_{IV-VI} + 0,41S;$$

для максимальных уровней:

$$H_{\text{max}} = 713,5 + 0,26X_{IV-VI} + 0,18S,$$

где $Y_{\text{половодья}}$ – слой стока периода половодья, мм; X_{IV-VI} – осадки за апрель–май по соответствующей ГМС (для $Y_{\text{половодья}}$ – Оленья Речка, для H_{max} – Ермаковское); S – максимальные снегозапасы по ГМС Оленья Речка.

Параметры качества уравнений множественной регрессии представлены в табл. 5.

Таблица 5. Параметры уравнения множественной регрессии для прогнозирования слоя стока и максимальных уровней половодья

Table 5. Parameters of a multiple regression equation for predicting runoff layer and maximum flood levels

Итоговые статистики Summary statistics	Модель 1: $Y_{\text{половодья}}$ Model 1: Y_{flood}	Модель 2: H_{max} Model 2: H_{max}
Множественный R Multiple R	0,85	0,73
R^2	0,72	0,54
Нормированный R^2 Adjusted R^2	0,7	0,5
Стандартная ошибка Standard error	50,43	32,68
F	33,02	14,98
Наблюдения/Observations	29	29

Сравнительный анализ результатов моделирования

На заключительном этапе выполнен сравнительный анализ моделей множественной линейной регрессии и однофакторных моделей. Метод множественной линейной регрессии для прогноза максимальных уровней р. Амыл показал результат хуже ($R^2=0,54$), чем однофакторная зависимость от сумм зимних осадков, рассчитанных с помощью высотных зависимостей и орографической добавки ($R^2=0,74$).

Для прогноза слоя стока, напротив, модель множественной регрессии более предпочтительна ($R^2=0,71$), чем однофакторные регрессии, построенные без учета осадков на спаде половодья и продолжительности половодья ($R^2=0,49$). При учете осадков на спаде половодья модель множественной регрессии и традиционный метод на основе высотных зависимостей или орографической добавки имеют примерно одинаковую тесноту связи.

Выводы

1. Расчет сумм зимних осадков в бассейне р. Амыл по традиционно применяемой в гидрологии зависимости от высоты и с помощью орографической добавки к скорости вертикальных движений показал идентичные результаты.
2. Сравнительный анализ методик прогноза максимальных уровней воды показал, что однофакторные зависимости имеют более высокие коэффициенты детерминации, чем модель множественной регрессии.

циенты детерминации, чем модель множественной регрессии.

3. Для прогноза слоя стока, чтобы получить значимый результат, необходимо учитывать осадки на спаде половодья. В этом случае однофакторные модели и модель множественной регрессии показывают примерно идентичные результаты.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук (ИВЭП СО РАН).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аполлов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д. Курс гидрологических прогнозов. – Л.: Гидрометеоздат, 1974. – 422 с.
2. Владимиров А.М. Факторы, определяющие возникновение экстремальных расходов и уровней воды половодья // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2009. – № 9. – С. 22–39.
3. Streamflow response to seasonal snow cover mass changes over large Siberian watersheds / D. Yang, Y. Zhao, R. Armstrong, D. Robinson, M.J. Brodzik // Journal of Geophysical Research: Earth Surface. – 2007. – V. 112. – № 2. – P. F02S22.
4. Gelfan A.N. Extreme snowmelt floods: frequency assessment and analysis of genesis on the basis of the dynamic-stochastic approach // Journal of Hydrology. – 2010. – V. 388. – № 1–2. – P. 85–99.
5. DeWalle D.R., Rango A. Principles of Snow Hydrology. – Cambridge: Cambridge University Press, 2008. – 428 p.
6. Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) user guide: Version 4.2. Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA. U.S. Army Corps of Engineers. – 2016. URL: https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Users_Manual_4.2.pdf (дата обращения 15.03.2020).
7. Снежно-водно-ледниковые ресурсы бассейна Верхней Оби и прогнозы стока весеннего половодья / под ред. Д.А. Буракова. – Томск: Изд-во ТГУ, 1986. – 254 с.
8. Паромов В.В., Шумилова К.А., Гордеев И.Н. Условия формирования половодья большой водности и прогноз наводнения на реке Абакан // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 11. – С. 57–67.
9. Advances in snow hydrology using a combined approach of GNSS in situ stations, hydrological modelling and Earth observation – a case study in Canada / F. Appel, F. Koch, A. Rösel, P. Klug, P. Henkel, M. Lamm, W. Mauser, H. Bach // Geosciences. – 2019. – V. 9 (1):44. URL: <https://doi.org/10.3390/geosciences9010044> (дата обращения 15.03.2020).
10. Using MODIS estimates of fractional snow cover area to improve streamflow forecasts in interior Alaska / K.E. Bennett, J.E. Cherry, S. Lindsey, B. Balk // Hydrology and Earth System Sciences. – 2019. – V. 23. – № 5. – P. 2439–2459.
11. Грани гидрологии / под ред. Д.К. Родда. – Л.: Гидрометеоздат, 1987. – 536 с.
12. Перспективы совершенствования технологии экологического мониторинга поверхностных вод Обь-Иртышского бассейна / Д.М. Безматерных, А.В. Пузанов, Т.С. Папина, В.В. Кириллов, И.Д. Рыбкина, О.В. Ловцкая, Я.Э. Кузник // Известия Алтайского отделения русского географического общества. – 2020. – Т. 57. – № 2. – С. 49–58.
13. Федеральный проект «Цифровой Обь-Иртышский бассейн» URL: https://nticenter.spbstu.ru/nti_projects/43 (дата обращения 15.06.2021).
14. Ревякин В.С., Кравцова В.И. Снежный покров и лавины Алтая. – Томск: Изд-во Томского университета, 1977. – 216 с.
15. Сезонные закономерности распределения осадков на территории Западного Саяна и их учет при моделировании стока / Г.В. Пряхина, Е.С. Зелепукина, Т.Н. Осипова, С.А. Гаврилкина, В.А. Соловьев, Т.А. Виноградова // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. – 2019. – Т. 64. – № 3. – С. 466–476.
16. Snow cover mapping for complex mountainous forested environments based on a multi-index technique / X. Wang, J. Wang, T. Che, X. Huang, X. Hao, H. Li // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2018. – V. 11. – № 5. – P. 1433–1441. URL: <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2810094> (дата обращения 15.03.2020).
17. Gampe D., Ludwig R. Evaluation of gridded precipitation data products for hydrological applications in complex topography // Hydrology. – 2017. – V. 4 (4):53. URL: <https://doi.org/10.3390/hydrology4040053> (дата обращения 15.06.2021).
18. Evaluation of multi-satellite precipitation datasets and their error propagation in hydrological modeling in a monsoon-prone region / J. Chen, Z. Li, L. Li, J. Wang, W. Qi, C-Y. Xu, J-S. Kim // Remote Sensing. – 2020. – V. 12 (21):3550. URL: <https://doi.org/10.3390/rs12213550> (дата обращения 15.06.2021).
19. Ромасько В.Ю., Бураков Д.А. Космический мониторинг заснеженности территории речных бассейнов // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2017. – Т. 10. – № 6. – С. 704–713.
20. Marcil G.-K., Trudel M., Leconte R. Using remotely sensed MODIS snow product for the management of reservoirs in a mountainous canadian watershed // Water Resources Management. – 2016. – V. 30 (8). – P. 2735–2747.
21. Şorman A.A., Uysal G., Şensoy A. Probabilistic snow cover and ensemble streamflow estimations in the Upper Euphrates Basin // Journal of Hydrology and Hydromechanics. – 2019. – V. 67. – № 1. – P. 82–92.
22. Ландшафтно-гидрологическая структура водосбора р. Амыл / Г.В. Пряхина, Е.С. Зелепукина, С.А. Журавлев, Н.И. Амбурцева, К.В. Чистяков // География и природные ресурсы. – 2014. – № 4. – С. 131–137.
23. Пространственная структура формирования стока на основе математического моделирования / Г.В. Пряхина, Е.С. Зелепукина, С.А. Гаврилкина, В.А. Соловьев, Н.И. Амбурцева, Т.А. Виноградова // Известия академии наук. Серия географическая. – 2020. – Т. 84. – № 2. – С. 218–227.
24. Бураков Д.А., Гордеев И.Н. Оценка предвесенних снегозапасов в бассейнах Красноярского и Саяно-Шушенского водохранилищ // География и природные ресурсы. – 2013. – № 1. – С. 72–78.
25. Бураков Д.А., Космакова В.Ф., Гордеев И.Н. О результатах испытания методов прогноза максимальных уровней воды весеннего половодья р. Туба у пос. Курагино и р. Подкаменная Тунгуска у с. Ванавара // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2014. – № 41. – С. 89–97.
26. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 16. Ангаро-Енисейский район. Вып. 1. Енисей / под ред. А.П. Муранова. – Л.: Гидрометеоздат, 1973. – 724 с.
27. Справочник по климату СССР. Вып. 21. Влажность воздуха, атмосферные осадки, снежный покров. – Л.: Гидрометеоздат, 1969. – 405 с.
28. Метеорологический ежемесячник. Ч. 2. Вып. 21. Краснояр. террит. упр. по гидрометеорологии и контролю природ. среды. – Красноярск: Красноярская гидрометеорол. обсерватория, 1966–1987.
29. Галахов В.П. Условия формирования и расчет максимальных снегозапасов в горах. – Новосибирск: Наука, 2003. – 104 с.
30. Характерные уровни воды рек, каналов и водохранилищ (годовые данные). Т. 1. Вып. 12. Бассейн Енисея (без бассейна Ангары) и Пясины. – Л.: Гидрометеоздат, 1989, 108 с.

31. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши: Ч. 1. Реки и каналы. Т. 1: Вып. 12. Бассейны Енисея (без бассейна Ангары) и Пясины. – Л.: Гидрометеоздат, 1966–1987.
32. Effects of preferential flow on snowmelt partitioning and groundwater recharge in frozen soils / A.A. Mohammed, I. Pavlovskii, E.E. Sey, M. Hayashi // *Hydrology and Earth System Science*. – 2019. – V. 23. – P. 5017–5031. URL: <https://doi.org/10.5194/hess-23-5017-2019> (дата обращения 13.12.2020).
33. Effects of snow cover on soil freezing, water movement, and snowmelt infiltration: a paired plot experiment / Y. Iwata, M. Hayashi, S. Suzuki, T. Hirota, S. Hasegawa // *Water resources research*. – 2010. – V. 46. – № 9. – Article number W09504. URL: <https://doi.org/10.1029/2009WR008070> (дата обращения 13.12.2020).
34. Effects of soil water and heat relationship under various snow cover during freezing-thawing periods in Songnen Plain, China / Q.Fu, R. Hou, T. Li, R. Jiang, P. Yan, Z. Ma, Z.Zhou // *Scientific Reports*. – 2018. – V. 8. – № 1. – Article number 1325. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-19467-y> (дата обращения 13.12.2020).
35. Effect of snowmelt infiltration on groundwater recharge in a seasonal soil frost area: a case study in Northeast China / X. Du, M. Fang, H. Lv, T. Cheng, P. Hong, C. Liu // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2019. – V. 191. – Article Number 151. – P. 1–11. URL: <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7285-7> (дата обращения 13.12.2020).
36. Silvestro F., Rebori N. Impact of precipitation forecast uncertainties and initial soil moisture conditions on a probabilistic flood forecasting chain // *Journal of Hydrology*. – November 2014. – V. 519. – P. 1052–1067.
37. Влияние осеннего промерзания на максимальные уровни бассейна реки Чарыш / В.П. Галахов, Е.В. Мардасова, Н.В. Люцигер, С.Ю. Самойлова // *Известия Алтайского отделения русского географического общества*. – 2018. – Т. 48. – № 1. – С. 54–57.
38. Бураков Д.А., Иванова О.И. Анализ формирования и прогноз стока весеннего половодья в лесных и лесостепных бассейнах рек Сибири // *Метеорология и гидрология*. – 2010. – № 6. – С. 87–110.
39. Галахов В.П., Ловцкая О.В., Мардасова Е.В. Влияние климатических изменений на максимальные уровни периода половодья реки Абакан // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 3. – С. 219–228.
40. Галахов В.П., Самойлова С.Ю., Мардасова Е.В. Влияние условий формирования снежного покрова на сток половодья горной реки (на примере бассейна реки Ануй) // *Известия Алтайского отделения русского географического общества*. – 2020. – Т. 56. – № 1. – С. 24–33.

Поступила 02.02.2022 г.

Информация об авторах

Галахов В.П., кандидат географических наук, старший научный сотрудник Института водных и экологических проблем СО РАН.

Ловцкая О.В., старший научный сотрудник Института водных и экологических проблем СО РАН.

Самойлова С.Ю., кандидат географических наук, научный сотрудник Института водных и экологических проблем СО РАН.

Мардасова Е.В., старший преподаватель кафедры экономической географии и картографии, Институт географии Алтайского государственного университета.

UDC556.161:556.166

COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR FORECASTING MAXIMUM LEVELS AND VOLUMES OF FLOOD RUNOFF OF A MOUNTAIN RIVER

Vladimir P. Galakhov¹,
galahov@iwep.ru

Olga V. Lovtskaya¹,
lov@iwep.ru

Svetlana Yu. Samoilova¹,
bastet05@list.ru

Elena V. Mardasova²,
mardasovaev@mail.ru

¹ Institute for Water and Environmental Problems SB RAS,
1, Molodezhnaya street, Barnaul, 656038, Russia.

² Altai State University,
61, Lenin avenue, Barnaul, 656049, Russia.

The study topicality relates to the analysis of available methods for assessing snow reserves in river basins and forecasting floods. To predict runoff volume and maximum flood levels, statistical models resting on the correlation dependence of runoff parameters on snow reserves or multiple linear regression equations are usually used in the absence of sufficient hydrometeorological information. An important point is that there are no justified comparisons of traditional forecasting methods based on calculations of winter precipitation amount (snow reserves) and statistical models of multiple regression.

The aim of the study is to carry out the comparative analysis of methods for calculating winter precipitation amounts in the basin by means of traditionally applied altitude dependencies and the author's estimation method using orographic correction to the velocity of vertical movements of air masses; to carry out the comparative analysis of traditional statistical forecasting methods and models of multiple linear regression by the example of the Amyl River basin.

Methods: comprehensive geographical and hydrometeorological analysis; dependence establishment based on long-term hydrometeorological observations using methods of mathematical statistics (correlation and regression analysis); snow reserves simulation with the use of orographic correction to the velocity of vertical movements.

Results. By altitude dependencies and the author's assessment considering orographic correction to the velocity of vertical movements of air masses, two different approaches to estimate of winter precipitation amounts suggest similar statistical dependences with close values of determination coefficients. Models for predicting runoff volumes and maximum flood stages based on pair correlation and multiple regression analysis were developed. The comparative analysis of traditional methods for forecasting runoff layers based on calculations of winter precipitation amount (snow reserves) and statistical models of multiple regression also showed similar results. The applied one-factor dependencies turned out to be the best in forecasting snowmelt-induced maximum levels.

Key words:

Zapadny Sayan, Tuba River, Amyl River basin, winter precipitation, snow reserves, altitude dependence, orographic correction to the velocity of vertical movements, statistical model of multiple regression.

The research was carried out within the State Task of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS.

REFERENCES

1. Apollov B.A., Kalinin G.P., Komarov V.D. *Kurs gidrologicheskikh prognozov* [A course of hydrological forecasts]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1974. 422 p.
2. Vladimirov A.M. Faktory, opredelyayushchie vzniknovenie ekstremalnykh raskhodov i urovney vody polovodya [Factors initiating occurrence of extreme flow rates and flood water levels]. *Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University*, 2009, no. 9, pp. 22–39.
3. Yang D., Zhao Y., Armstrong R., Robinson D., Brodzik M.J. Streamflow response to seasonal snow cover mass changes over large Siberian watersheds. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2009, vol. 112, no. 2, p. F02S22.
4. Gelfan A.N. Extreme snowmelt floods: frequency assessment and analysis of genesis on the basis of the dynamic-stochastic approach. *Journal of Hydrology*, 2010, vol. 388, no. 1–2, p. 85–99.
5. DeWalle D.R., Rango A. *Principles of Snow Hydrology*. Cambridge, Cambridge University Press, 2008. 428 p.
6. *Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) user guide: Version 4.2*. Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA. U.S. Army Corps of Engineers, 2016. Available at: www.hec.usace.army.mil/hec-hms/HEC-HMS_Users_Manual_4.2.pdf (accessed: 15 March 2020).
7. *Snezhno-vodno-lednikovye resursy basseyna Verkhney Obi i prognozy stoka vesennego polovodya* [Snow-water-glacial resources of the Upper Ob basin and forecasts of spring flood runoff]. Ed. by D.A. Burakov. Tomsk, TSU Publ. House, 1986. 254 p.
8. Paromov V.V., Shumilova K.A., Gordeev I.N. Conditions of formation of high-water flood and flood forecast on the river Abakan. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 11, pp. 57–67. In Rus.
9. Appel F., Koch F., Rösel A., Klug P., Henkel P., Lamm M., Mauser W., Bach H. Advances in snow hydrology using a combined approach of GNSS in situ stations, hydrological modelling and earth observation – a case study in Canada. *Geosciences*, 2019, vol. 9 (1):44. Available at: <https://doi.org/10.3390/geosciences9010044> (accessed: 15 March 2020).
10. Bennett K.E., Cherry J.E., Lindsey S., Balk B. Using MODIS estimates of fractional snow cover area to improve streamflow forecasts in interior Alaska. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2019, vol. 23, no. 5, pp. 2439–2459.

11. *Grani gidrologii* [Facets of hydrology]. Ed. by Rodda J.C. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1987. 536 p.
12. Bezmaternykh D.M., Puzanov A.V., Papina T.S., Kirillov V.V., Rybkina I.D., Lovtskaya O.V., Kuznyak Ya.E. Prospects for improving the technology of environmental monitoring of surface waters in the Ob-Irtysh basin. *Bulletin of the Altay branch of the Russian geographical society*, 2020, vol. 57, no. 2, pp. 49–58. In Rus.
13. *Federalny proekt «tsifrovoy Ob-Irtyshsky Basseyn»* [Federal project «Digital Ob-Irtysh basin»]. 2020. Available at: https://nticenter.spbstu.ru/nti_projects/43 (accessed: 15 June 2021).
14. Revyakin V.S., Kravtsova V.I. *Snezhny pokrov i laviny Altaya* [Snow cover and avalanches of Altai]. Tomsk, Tomsk University Publ. House, 1977. 216 p.
15. Pryakhina G.V., Zelepukina E.S., Osipova T.N., Gavrilkina S.A., Solovyev V.A., Vinogradova T.A. Seasonal distribution patterns of precipitation on the territory of West Sayan Ridge and their consideration in runoff modeling. *Vestnik of St Petersburg University. Earth Sciences*, 2019, vol. 64, no. 3, pp. 466–476. In Rus.
16. Wang X., Wang J., Che T., Huang X., Hao X., Li H. Snow cover mapping for complex mountainous forested environments based on a multi-index technique. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, vol. 11, no. 5, pp. 1433–1441. Available at: <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2810094> (accessed: 15 June 2021).
17. Gampe D., Ludwig R. Evaluation of gridded precipitation data products for hydrological applications in complex topography. *Hydrology*, 2017, vol. 4 (4):53. Available at: <https://doi.org/10.3390/hydrology4040053> (accessed: 15 June 2021).
18. Chen J., Li Z., Li L., Wang J., Qi W., Xu C.-Y., Kim J.-S. Evaluation of multi-satellite precipitation datasets and their error propagation in hydrological modeling in a Monsoon-Prone Region. *Remote Sensing*, 2020, vol. 12 (21):3550. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs12213550> (accessed: 15 June 2021).
19. Romasko V.Y., Burakov D.A. Space monitoring of snow cover of river watersheds. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2017, vol. 10 (6), pp. 704–713.
20. Marcil G.-K., Trudel M., Leconte R. Using remotely sensed MODIS snow product for the management of reservoirs in a mountainous Canadian Watershed. *Water Resources Management*, 2016, vol. 30 (8), pp. 2735–2747.
21. Şorman A.A., Uysal G., Şensoy A. Probabilistic snow cover and ensemble streamflow estimations in the Upper Euphrates Basin. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2019, vol. 67, no. 1, pp. 82–92.
22. Pryakhina G.V., Zelepukina E.S., Zhuravlev S.A., Amburtseva N.I., Chistyakov K.V. Landshaftno-gidrologicheskaya struktura vodosbora r. Amyl [A landscape-hydrological structure of the Amyl catchment]. *Geography and natural resources*, 2014, no. 4, pp. 131–137.
23. Pryakhina G.V., Zelepukina E.S., Gavrilkina S.A., Solovyev V.A., Amburtseva N.I., Vinogradova T.A. Mathematical modeling of runoff formation spatial structure. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 2020, vol. 84, no. 2, pp. 218–227. In Rus.
24. Burakov D.A., Gordeev I.N. Otsenka predvesennikh snegozapasov v basseynakh Krasnoyarskogo i Sayano-Shushenskogo vodokhranilishch [Assessment of pre-spring snow reserves in the basins of Krasnoyarsk and Sayano-Shushensk reservoirs]. *Geography and natural resources*, 2013, no. 1, pp. 72–78.
25. Burakov D.A., Kosmakova V.F., Gordeev I.N. O rezultatakh ispytaniya metodov prognoza maksimalnykh urovney vody vesenego polovodya r. Tuba u pos. Kuragino i r. Podkamennaya Tunguska u s. Vanavara [Test results of methods for predicting maximum water levels of spring flood on R.Tuba at Kuragino and R. Podkamennaya Tunguska at Vanavara]. *Test results of new and upgraded technologies, models and methods for hydrometeorological forecasts*, 2014, no. 41, pp. 89–97.
26. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. T. 16. Vyp. 1. Angaroyeniseyskiy rayon. Yenisey* [Surface water resources in the USSR. Vol. 16. Iss. 1. Angara-Yenisey region. Yenisey]. Ed. by A.P. Muranov. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1973. 724 p.
27. *Spravochnik po klimatu SSSR. Vyp. 21. Vlazhnost vozdukh, atmosferyne osadki, snezhny pokrov* [Handbook on climate of the USSR. Iss. 21. Air humidity, precipitation, snow cover]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1969. 405 p.
28. *Meteorologicheskii ezheimesyachnik* [Meteorological Monthly]. P. 2, Iss. 21. Krasnoyarsk, 1966–1987.
29. Galakhov V.P. *Usloviya formirovaniya i raschet maksimalnykh snegozapasov v gorakh* [Conditions for formation and estimation of maximum snow storage in mountains]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2003. 104 p.
30. *Kharakternye urovni vody rek, kanalov, ozer i vodokhranilishch (pogodichnye dannye). Ch. 1. Reki i kanaly. Vyp. 12. Basseyny Yeniseya (bez basseyna Angary) i Pyasina* [Typical water levels of rivers, canals, lakes and reservoirs (year data). P. 1. Rivers and canals. Iss. 12. Basins of the Yenisei (without the Angara basin) and Pyasina]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1989. 108 p.
31. *Ezhegodnye dannye v rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod sushi: Ch. 1. Reki i kanaly. T. 1: Vyp. 12. Basseyny Yeniseya (bez basseyna Angary) i Pyasina* [Annual data of surface water regime and resources: P. 1. Rivers and canals. Vol. 1. Iss. 12. Basins of the Yenisei (without the Angara basin)]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1966–1987.
32. Mohammed A.A., Pavlovskii I., Cey E.E., Hayashi M. Effects of preferential flow on snowmelt partitioning and groundwater recharge in frozen soils. *Hydrology and Earth System Science*, 2019, vol. 23, pp. 5017–5031. Available at: <https://doi.org/10.5194/hess-23-5017-2019> (accessed: 13 December 2020).
33. Iwata Y., Hayashi M., Suzuki S., Hirota T., Hasegawa S. Effects of snow cover on soil freezing, water movement, and snowmelt infiltration: a paired plot experiment. *Water resources research*, 2010, vol. 46, no. 9. Available at: <https://doi.org/10.1029/2009WR008070> (accessed: 13 December 2020).
34. Fu Q., Hou R., Li T., Jiang R., Yan P., Ma Z., Zhou Z. Effects of soil water and heat relationship under various snow cover during freezing-thawing periods in Songnen Plain, China. *Scientific Reports*, 2018, vol. 8, no. 1. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-19467-y> (accessed: 13 December 2020).
35. Du X., Fang M., Lv H., Cheng T., Hong P., Liu C. Effect of snowmelt infiltration on groundwater recharge in a seasonal soil frost area: a case study in Northeast China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, vol. 191, no. 3. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7285-7> (accessed: 13 December 2020).
36. Silvestro F., Rebora N. Impact of precipitation forecast uncertainties and initial soil moisture conditions on a probabilistic flood forecasting chain. *Journal of Hydrology*, 2014, vol. 519, pp. 1052–1067.
37. Galakhov V.P., Mardasova E.V., Lyutsiger N.V., Samoilova S.Yu. Influence of fall freezing on maximum levels of Charysh River basin. *Bulletin of the Altay branch of the Russian geographical society*, 2018, vol. 48, no. 1, pp. 54–57. In Rus.
38. Burakov D.A., Ivanova O.I. The analysis of formation and the forecast of a drain of a spring high water in wood and forest-steppe pools of the rivers of Siberia. *Russian meteorology and hydrology*, 2010, vol. 35, no. 6, pp. 421–431.
39. Galakhov V.P., Lovtskaya O.V., Mardasova E.V. Climate change effect on maximum flood stages in Abakan River. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 3, pp. 218–228. In Rus.
40. Galakhov V.P., Samoilova S.Yu., Mardasova E.V. Effect of a ratio of large morphological units of a mountain basin on snowmelt runoff (The Anui river basin as a case study). *Bulletin of the Altay branch of the Russian geographical society*, 2020, vol. 56, no. 1, pp. 24–33. In Rus.

Received: 2 February 2022.

Information about the authors

Vladimir P. Galakhov, Cand. Sc., senior researcher, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS.

Olga V. Lovtskaya, senior researcher, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS.

Svetlana Yu. Samoilova, Cand. Sc., researcher, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS.

Elena V. Mardasova, senior lecturer, Altai State University.

УДК 552.52

ОЦЕНКА НАБУХАЮЩИХ СВОЙСТВ ГЛИН НА ТЕРРИТОРИИ Г. КАРАГАНДА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Вдовкина Дарья Игоревна¹,
daryavdovkina@gmail.com

Кошляков Алексей Евгеньевич²,
kosh57@ukr.net

Пономарева Марина Викторовна¹,
mv_ponomareva18@mail.ru

Пономарева Екатерина Вадимовна¹,
evmussina1992@gmail.com

¹ Карагандинский технический университет,
Казахстан, 100012, г. Караганда, пр. Нурсултана Назарбаева, 56/1.

² Киевский национальный университет им. Т. Шевченко,
Украина, 03022, г. Киев, ул. Васильковская, 90.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью выявления зависимости набухания глин от их физических характеристик с целью сокращения временных и денежных ресурсов при проведении инженерно-геологических изысканий. Активное развитие строительной отрасли приводит к тому, что осваиваются территории, сложенные грунтами, которые в результате увлажнения увеличиваются в объеме – набухают.

Целью исследования является установление зависимости относительного набухания глинистых пород от их физических характеристик, на определение которых затрачиваются минимальные ресурсы, с применением методов машинного обучения.

Объекты: четвертичные и неогеновые глины г. Караганда, которые слагают геологический разрез территорий, используемых для строительства зданий и сооружений.

Методы: создание базы данных лабораторных (физические и компрессионные характеристики, гранулометрический состав) и полевых (описание грунтов – цвет, наличие включений, определение уровня подземных вод, интервалы отбора проб) исследований глин в excel; применение высокоуровневого языка программирования «Python» для создания математических моделей посредством дистрибутива «Anaconda»; применение теоремы Парето с целью разделения данных для обучения и валидации, полученной модели; использование показателя «Mean Squared Error» для оценки адекватности построенных моделей.

Результаты. Построены три прогностические модели относительного набухания глин. Входными данными являлись лабораторные и геологические параметры 103 образцов глин, отобранных в результате инженерно-геологических изысканий в г. Караганда. Применялись следующие алгоритмы машинного обучения: Random forest, Multilinear regression, Support vector machines. По оценки критерия «Mean Squared Error» для построения модели относительного набухания была выбрана модель Random Forest.

Ключевые слова:

Глинистые породы, глины, набухание, модель относительного набухания, четвертичные отложения, неогеновые отложения.

Введение

В последние годы в Республике Казахстан происходит активный экономический рост строительной отрасли. Объем выполненных строительных работ с 2010 по 2019 гг. увеличился с 1,9 до 4,4 триллионов тенге [1]. Усложняются конструкции зданий и сооружений гражданского и промышленного строительства, что в свою очередь требует ужесточения требований к проведению предпроектных работ. Особого внимания при проведении инженерно-геологических исследований требуют специфические грунты, такие как набухающие глины. Основания, сложенные специфическими грунтами, должны проектироваться с учетом способности данных грунтов увеличиваться в объеме при повышении влажности и уменьшаться при высыхании. При набухании увеличивается пористость породы и ее влажность в связи с увеличением толщины гидратных оболочек на поверхности глинистых частиц. Происходит сниже-

ние ригидности глин, которое объясняется экстракцией связанной воды и приводит к модификации внутренней структуры породы [2].

Набухание зависит от минералогического и гранулометрического составов пород. Наличие грубообломочных включений способствует боковому расширению грунта и уменьшает его набухание по вертикали [3]. Из глинистых минералов наибольшим набуханием характеризуются минералы группы монтмориллонита, наименьшим – минералы группы каолинита [4]. Недооценка набухающих грунтов является причиной повреждения многих промышленных и гражданских сооружений. Главной особенностью набухающих грунтов является резкое снижение их несущей способности при замачивании [5].

Специфические грунты распространены по всему миру, и многочисленный ущерб, который был получен в результате их набухающих свойств, зарегистрирован в таких странах, как Саудовская Аравия, Гер-

мания, Испания, Франция, США [6–8]. В том числе такой ущерб зафиксирован в г. Караганда, Казахстан. В 2012 г. произошло обрушение четырех пятиэтажных секций восьми-секционного жилого комплекса «Бесоба» [9]. Большая часть ущерба, связанного со специфическими грунтами, вызвана не отсутствием соответствующих инженерных решений, а невыявлением таких грунтов и недооценкой масштабов их распространения по площади работ на ранних этапах планирования строительных проектов [10].

Таблица 1. Эмпирические зависимости для оценки набухания грунтов

Table 1. Empirical relationships for estimating soil swelling

$\varepsilon_{sw}=1,00+0,006 \cdot (C+I_p-w)$ [6]
$\varepsilon_{sw}=2,16 \cdot 10^{-3} \cdot I_p^{2,44}$
$\varepsilon_{sw}=3,60 \cdot 10^{-5} \cdot (A_c)^{2,44} \cdot (C)^{3,44}$
$\varepsilon_{sw}=4,13 \cdot 10^{-4} \cdot (\varepsilon_{sl})^{2,67}$ [12]
$\varepsilon_{sw}=4,57 \cdot 10^{-3} \cdot [\varepsilon_{sl} / (C-13)]^{2,67} \cdot (C)^{3,44}$
$\varepsilon_{sw}=4,113 \cdot 10^{-4} \cdot [\varepsilon_{sl} / (C-13)]^{2,67} \cdot (C)^{3,44}$ [13]
$\text{Log} \varepsilon_{sw}=(1/12) \cdot (0,4 \cdot W_L-w+5,5)$
$\text{Log} \varepsilon_{sw}=(1/19,5) \cdot (6,242 \cdot p_d+0,65 \cdot W_L-130,5)$ [14]
$\varepsilon_{sw}=82,56 \cdot \alpha^{0,821}$ [15]
$\varepsilon_{sw}=7,5-0,8 \cdot w+0,203 \cdot C$ [16]
$\varepsilon_{sw}=2,77+0,131 \cdot W_L-0,27$ [17]
For $I_p \geq 40$:
$\varepsilon_{sw}=23,82+0,7346 \cdot I_p-0,1458 \cdot 0,3 \cdot H-1,7 \cdot w+0,0025 \cdot I_p \cdot w-0,00884 \cdot I_p \cdot 0,3 \cdot H$
For $I_p \leq 40$:
$\varepsilon_{sw}=-9,18+1,5546 \cdot I_p+0,08424 \cdot 0,3 \cdot H-0,1 \cdot w-0,0432 \cdot I_p \cdot w-0,01215 \cdot 0,3 \cdot H$ [18]
$\varepsilon_{sw}=0,00001114 \cdot A_c^{2,559} \cdot C^{3,44}$ [19]
$\varepsilon_{sw}=-121,807+(12,1696 \cdot MBV)+[27,6579 \cdot \log_{10}(\psi)]$ [20]
$\varepsilon_{sw}=-57,965+37,076 p_d+0,524 MBV+\varepsilon$ [21]
$MFSI=1,84 \cdot e^{-0,004 \cdot SSA}$ [22]
$\varepsilon_{sw}=24,5 \cdot (P)^{0,26} \cdot (I_p \cdot C)^{1,26} \cdot [F_i-7,1 \cdot (P)^{0,22} \cdot (I_p \cdot C)^{0,78}]$ [23]
$\varepsilon_{sw}=-31,321+0,592 \cdot C+0,717 \cdot I_p-0,807 \cdot CEC-0,891 \cdot w+2,668 \cdot p_d$
$\varepsilon_{sw}=-9,567+0,606 \cdot C+0,636 \cdot I_p-0,792 \cdot w-0,487 \cdot p_d+6,289 \cdot W_L$
$\varepsilon_{sw}=-19,856+0,595 \cdot C+0,686 \cdot I_p-0,769 \cdot CEC-1,068 \cdot w+2,729 \cdot p_d$ [24]
$\varepsilon_{sw}=25,202+0,643 \cdot W_L-2,089 \cdot w$
$\varepsilon_{sw}=29,692+0,914 \cdot I_p-2,089 \cdot w$ [25]
$\varepsilon_{sw}=-432,06+7,73 \cdot C+0,12 \cdot CEC+0,46 \cdot I_p+4,30 \cdot p_d-1,18 \cdot w$ [26]
$\text{Log} \varepsilon_{sw}=0,0562 \cdot p_d+0,033 \cdot W_L-6,8$ [27]
$\varepsilon_{sw}=0,2558 \cdot e^{0,083 \cdot I_p}$ [28]

где ε_{sw} – набухание [%]; I_p – число пластичности [%]; W_L – влажность на границе текучести [%]; w – естественная влажность [%]; p_d – плотность скелета [г/см³]; C – содержание глины [%]; H – глубина залегания набухающего грунта [м]; α – модифицированная удельная влагоемкость; CEC – емкость поглощения [мг-экв/100 г]; ψ – водоудерживающая способность [кПа]; A_c – показатель коллоидной активности; ε_{sl} – усадка [%]; P – внешнее давление [кПа]; F_i – фактор начального состояния [1]; MBV – абсорбционная ёмкость по методу метиленового синего [г/100 г]; ε – средненулевое значение случайной ошибки Гаусса; $MFSI$ – модифицированный показатель свободного набухания.

where ε_{sw} – swelling [%]; I_p – plasticity index [%]; W_L – liquid limit [%]; w – water content [%]; p_d – dry soil density [g/cm³]; C – clay content [%]; H – depth of cover [m]; α – modified specific moisture capacity; CEC – cation exchange capacity [mg-equiv/100 g]; ψ – soil suction [kPa]; A_c – colloid activity; ε_{sl} – shrinkage [%]; P – swelling pressure [kPa]; F_i – initial state factor [1]; MBV – methylene blue value [g/100 g]; ε – mean-zero Gaussian random error term; $MFSI$ – modified free swell index.

Выявление корреляционных зависимостей между основными свойствами грунтов является важной задачей, поскольку в ряде случаев довольно сложно измерить необходимый параметр напрямую [11]. Определение набухания глинистых грунтов требует значительных затрат времени и денежных средств, а также предполагает разрушение образца породы во время испытания. Наличие прогностической модели для оценки корреляции набухания с физическими характеристиками (естественная влажность, плотность, пористость, число пластичности, влажность на границе текучести, влажность на границе раскатывания) значительно снизит затрачиваемые денежные и временные ресурсы на предварительной стадии проектирования.

На сегодняшний день проведены многочисленные исследования и анализ факторов, которые влияют на набухание грунтов. Обобщенные результаты исследований по корреляции выбранных параметров представлены в табл. 1.

До настоящего времени многие исследователи пытались разработать практические быстрые решения для прогнозирования трудно определяемых параметров (набухание, модуль деформации) по корреляции с легко определяемыми параметрами грунта. При этом использовались методы искусственного интеллекта, такие как множественный регрессионный анализ (MRA), искусственные нейронные сети (ANN) и генетическое программирование (GP) [29, 30].

Данное исследование посвящено определению взаимосвязи относительного набухания глин и их физических характеристик с применением методов машинного обучения.

Методы

В результате проведения инженерно-геологических изысканий в г. Караганда были отобраны и исследованы в лаборатории 103 пробы глин и получены значения следующих характеристик: естественная влажность (W), влажность на границе текучести (W_L), влажность на границе раскатывания (W_P), число пластичности (I_p), показатель текучести (I_L), плотность частиц грунта (p_s), плотность грунта (p), плотность скелета (p_d), плотность во взвешенном состоянии ($p_{вз}$), пористость (e), полная влагоемкость (W_p), степень влажности (S_r), относительное набухание (ε_{sw}).

Испытания в лаборатории для определения физических характеристик грунта и относительного набухания проводились согласно стандартам, применяемым на территории Республики Казахстан. Участки работ, где были проведены инженерно-геологические исследования в орографическом отношении, лежат в области водораздельного пространства между реками Нура и Шерубайнура. В целом рельеф представляет собой волнистую равнину, осложненную мелкосопочником. Глины, вскрытые на исследуемых участках, относятся к неогеновому и четвертичному периодам. Нижнечетвертичные отложения представлены глинистой толщей зеленовато-серых, темно-серых тонов с прослоями и линзами галечников, песков и супесей. Толща неогеновых осадков залегает на всей

территории Центрального Казахского мелкосопочника. Здесь широко развиты зеленые, зеленовато-серые монтмориллонитовые глины с марганцовистыми «картечинами», местами с гипсом и линзами мергеля, которые относятся к аральской свите нижне-среднемиоценового возраста.

Для создания прогностической модели набухания глин применялись следующие методы машинного обучения: Random Forest, Multilinear regression, Support vector machines. Входными данными послужили следующие параметры:

- физические характеристики и гранулометрический состав глин, полученные посредством лабораторных испытаний, которые выражают их физическое состояние в условиях естественного залегания. Гранулометрический состав отражает количество пылеватых и песчаных частиц, наличие грубообломочного материала. Чем больше пелитового материала содержит глина, тем больше площадь ее удельной поверхности и как следствие повышенная способность к поглощению воды;
- цвет глин, включения марганца и гипса (отражают минералогический состав и возраст пород). Четвертичные отложения представлены серыми глинами озерного генезиса, а неогеновые – зелеными, зелено-серыми глинами монтмориллонитового состава с включением марганцовистых картечин и друз гипса;
- уровень грунтовых вод и глубина отбора проб. Показывает на какой глубине по отношению к водоносному горизонту в естественном состоянии залегает глина.

Физико-механические свойства глин имеют следующие показатели: естественная влажность (w) изменяется от 16 до 34 % при среднем значении 24 %; влажность на границе текучести (W_L) изменяется от 23 до 60 % при среднем значении 44 %; влажность на границе раскатывания (W_p) изменяется от 13 до 36 % при среднем значении 21 %; число пластичности (I_p) изменяется от 17 до 37 % при среднем значении 23 %. По данным значений показателя текучести (I_L) в разрезе присутствуют твердые, полутвердые, тугопластичные и мягкопластичные глины. Плотность глин (ρ) изменяется от 1,64 до 2,16 г/см³ при среднем значении 1,98 г/см³; плотность частиц (ρ_s) изменяется от 2,57 до 2,79 г/см³ при среднем значении 2,71 г/см³; плотность сухого грунта (ρ_d) изменяется от 1,37 до 1,82 г/см³ при среднем значении 1,60 г/см³; плотность во взвешенном состоянии ($\rho_{вз}$) изменяется от 1,37 до 1,82 г/см³ при среднем значении 0,98 г/см³; пористость (e) изменяется от 0,47 до 0,97 д. ед. при среднем значении 0,70 д. ед.; полная влагоемкость (W_n) изменяется от 0,17 до 0,36 д. ед. при среднем значении 0,26 д. ед.; степень влажности (S_r) изменяется от 0,50 до 1,00 д. ед. при среднем значении 0,92 д. ед. Гранулометрический состав глин изучаемого района характеризуется преобладанием фракций меньше 0,005 мм (до 80 %). Фракции крупностью более 10 мм не превышают 20 %, крупностью от 2 до 10 мм – 16 %.

В качестве инструмента для создания моделей был использован высокоуровневый язык программирова-

ния «Python» посредством дистрибутива «Anaconda». Отобранные свойства грунтов являлись входными данными для создания прогностической модели относительного набухания. При этом 80 % данных использовались для обучения модели, а 20 % использовались для валидации построенной модели, согласно теореме Парето. С целью оценки прогностической эффективности моделей применялся метод перекрестной проверки. Такой подход обеспечивает большую надежность и устойчивость для оценки прогностической способности каждой модели. Адекватность регрессионных моделей оценивалась показателем «Mean Squared Error (MSE)». Показатель MSE измеряет среднеквадратичное отклонение между прогнозируемыми и истинными значениями. И чем меньшее значение он имеет, тем точнее будет прогностическая модель. Для оптимизации гиперпараметров (параметры модели, которые задаются исследователем) модели в данном исследовании применялся метод Random search, который оптимизирует выбор гиперпараметров путем перекрестного поиска. В методе Random Forest для настройки модели использовались следующие параметры: bootstrap, max depth, max features, n-estimators, min samples split. В методе Multilinear regression – fit intercept, normalize. В методе Support vector machines – epsilon, C.

Результаты

База данных лабораторных исследований состоит из 103 проб глин и была составлена в результате проведения инженерно-геологических изысканий в г. Караганда, Казахстан. При помощи метода Random search для трех применяемых прогностических моделей были выбраны значения гиперпараметров и параметр MSE, которые представлены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что наибольший показатель MSE имеет модель, построенная методом Multilinear regression (157,47) что говорит об отсутствии какой-либо зависимости между исследуемыми параметрами. Наименьшим показателем MSE обладает метод Random forest (27,73). Показатель MSE модели, построенной методом Support vector machines, занимает промежуточное положение и составляет 40,47.

На рис. 1 представлены результаты прогнозирования набухания методом Random Forest. Синим цветом обозначены измеренные значения, которые были получены посредством лабораторных испытаний, красным цветом – прогнозируемые значения, полученные в результате построения прогностической модели. Для построения диаграммы было использовано 21 значение относительного набухания глинистых пород (20 % данных использованы для валидации), которые были получены в результате построения модели Random Forest.

На диаграмме рассеяния (рис. 2) представлена корреляция между прогнозируемыми и измеренными значениями относительного набухания модели Random Forest. Коэффициент детерминации (R^2) составил 0,51. Коэффициент корреляции (R) – 0,71. Это говорит о том, что связь между переменными (набуханием и физическими характеристиками) является средней.

Таблица 2. Значения гиперпараметров моделей и параметра MSE

Table 2. Model hyperparameter and MSE parameter values

Модель Model	Гиперпараметры Hyperparameter	Значение Value	Среднеквадратическая ошибка Mean Squared Error
Случайный лес Random Forest	количество выборок n_estimators	100	27,73
	минимальное количество выборок min_samples_split	10	
	максимальное количество функций max_features	auto	
	максимальная глубина max_depth	40	
	бутстрап Bootstrap	true	
Множественная линейная регрессия Multilinear regression	фит интерсепт fit_intercept	true	157,47
	нормализация normalize	true	
Метод опорных векторов Support vector machines	эпсилон epsilon	0,1	40,47
	C	3,0	

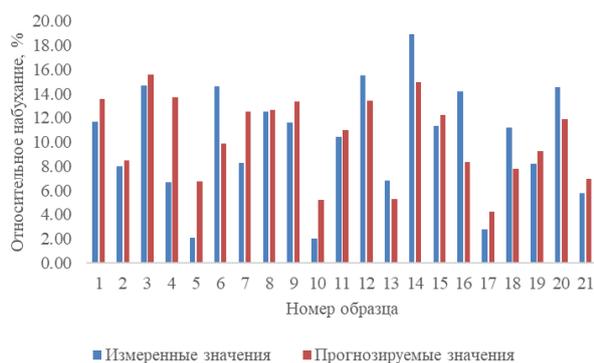


Рис. 1. Гистограмма сравнения измеренных и прогнозируемых значений набухания

Fig. 1. Bar graph comparing measured and predicted swelling values

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Agency for strategic planning and reforms of the Republic of Kazakhstan Bureau of National statistics // 2019. URL: <https://stat.gov.kz/> (дата обращения 17.11.2020).
- Zhang T.W., Wang S.J. Explanation of the influence of sodium chloride solution on volume deformation and permeability of normally consolidated clays // Materials. – 2019. – V. 12. – P. 1–13.
- Selvakumar S., Soundara B. Swelling behaviour of expansive soils with recycled geofam granules column inclusion // Geotextiles and Geomembranes. – 2019. – V. 47. – P. 1–11.
- Julina M., Thyagaraj T. Combined effects of wet-dry cycles and interacting fluid on desiccation cracks and hydraulic conductivity of compacted clay // Engineering Geology. – 2020. – V. 267. – P. 1–15.
- Khan M.A., Wang J.X., Patterson W.B. A study of the swell-shrink behavior of expansive Moreland clay // International Journal of Geotechnical Engineering. – 2019. – V. 13. – P. 205–217.
- Sabtan A.A. Geotechnical properties of expansive clay shale in Tabuk, Saudi Arabia // Journal of Asian Earth Sciences. – 2005. – V. 25. – P. 747–757.

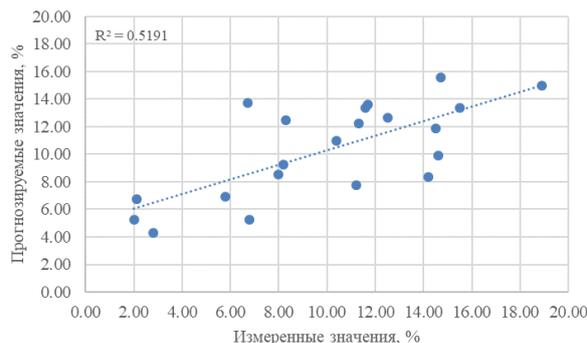


Рис. 2. Диаграмма рассеяния

Fig. 2. Scatter plot

Выводы

- Использовались методы машинного обучения для моделирования, нацеленного на предложение нового подхода к прогнозированию относительного набухания без проведения дополнительных лабораторных исследований. Относительное набухание (ϵ_{sw}) глин оценивалось на основе физических характеристик, таких как W , W_L , W_p , I_p , I_L , P_s , P , $P_{ск}$, $p_{вз}$, e , $W_{п.}$, S_g , гранулометрического состава, цвета, включений марганца и гипса, залегания глин относительно водоносного горизонта. Исследования проводились с использованием 103 образцов, полученных в результате инженерно-геологических изысканий в г. Караганда, Казахстан.
- Сравнение моделей проводилось по значениям показателя MSE. Для прогнозирования относительного набухания был выбран метод Random Forest. Модель, построенная с помощью метода Random Forest, наиболее эффективна для моделирования относительного набухания по сравнению с моделями, построенными методами Multilinear regression и Support vector machines.
- Построенную модель можно использовать при производстве инженерно-геологических изысканий для разработки предпроектной документации.
- Для повышения надежности рассматриваемой модели необходимо увеличить число исследуемых образцов глин.
- Giles D.P., Griffiths J.S. Geological hazards in the UK: their occurrence, monitoring and mitigation: engineering group working party report. – England: Geological Soc Publishing House, 2020. – 490 p.
- Swelling potential of clay-sulfate rocks in tunneling in complex geological settings and impact of hydraulic measures assessed by 3D groundwater modeling / C. Butscher, S. Scheidler, H. Farhadian, H. Dresmann, P. Huggenberger // Engineering Geology. – 2017. – V. 221. – P. 143–153.
- Акт расследования причин обрушения дома № 7 в микрорайоне Бесоба // 2012. URL: http://ekaraganda.kz/?mod=news_read&id=5678 (дата обращения 15.10.2020).
- Prediction of swelling pressure of soil using artificial intelligence techniques // S.K. Das, P. Samui, A.K. Sabat, T.G. Sitharam // Environmental Earth Sciences. – 2010. – V. 61. – P. 393–403.
- Yilmaz I., Yuksek G. Prediction of the strength and elasticity modulus of gypsum using multiple regression, ANN, and ANFIS models // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2009. – V. 46. – P. 803–810.
- Seed H.B., Woodward J., Lundgren R. Prediction of swelling potential for compacted clays // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. – 1962. – V. 88. – P. 53–87.

13. Ranganatham B.V., Satyanarayana B. A rational method of predicting swelling potential for compacted expansive clays // Proc. of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. – Montreal, 1965. – V. 1. – P. 92–96.
14. Vijayvergiya V.N., Ghazzally O.I. Prediction of swelling potential of natural clays // Proceedings of the Third International Conference on Expansive Soils. – Haifa, July 30 – August 1, 1973. – V. 44. – P. 227–234.
15. A semi-empirical approach-based model for swell characterization of expansive clays / A. Pedarla, A.J. Puppala, U.D. Patil, L.R. Hoyos, A.H. Pino // Geotechnical and Geological Engineering. – 2019. – V. 37. – P. 5371–5381.
16. McCormack D.E., Wilding L.P. Soil properties influencing swelling in canfield and Geeburg soils // Soil Science Society of America Journal. – 1975. – V. 39. – P. 496–502.
17. O'Neil M.W., Ghazzally O.I. Swell potential related to building performance // Journal of the Geotechnical Engineering Division. – 1977. – V. 103. – P. 1363–1379.
18. Johnson L.P., Snethen D.R. Prediction of potential heave of swelling soil // Geotechnical Testing Journal. – 1978. – V. 1. – P. 117–124.
19. Bandyopadhyay S.S. Prediction of swelling potential for natural soils // Journal of Geotechnical Engineering Division. – 1981. – V. 107. – P. 658–691.
20. Chao K.C., Nelson J.D. Validation of foundation design method on expansive soils // Geotechnical engineering. – 2019. – V. 50. – P. 103–111.
21. Cokca E. Relationship between methylene blue value, initial soil suction and swell percent of expansive soils // Turkish Journal of Engineering and Environmental Science. – 2002. – V. 26. – P. 521–529.
22. Prediction of geotechnical properties of clayey soils stabilised with lime using artificial neural networks (ANNs) / I.T. Bahmed, K. Harichane, M. Ghrici, B. Boukhatem, R. Rebouh, H. Gadouri // International Journal of Geotechnical Engineering. – 2019. – V. 16. – P. 702–711.
23. Zumrawi M. Prediction of swelling characteristics of expansive soils // Sudan Engineering Society Journal. – 2012. – V. 13. – P. 191–203.
24. Erzin Y., Gunes N. The unique relationship between swell percent and swell pressure of compacted clays // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2013. – V. 72. – P. 71–80.
25. Gawriuczzenkow I., Wójcik E. Prediction of swell pressure in Neogene clays from Warsaw, based on the swell index // Geology, Geophysics & Environment. – 2018. – V. 44. – P. 219–229.
26. Chen F.H. Foundations on expansive soils. – Amsterdam: Elsevier, 1975. – 295 p.
27. Ameratunga J., Sivakugan N., Das B.M. Correlations of soil and rock properties in geotechnical engineering. – India: Springer, 2016. – 228 p.
28. Spatial variation and correlation between undrained shear strength and plasticity index / X. Kang, S. Onyejekwe, L. Ge, R. Stephenson // Geo-Frontiers 2011: advances in geotechnical engineering. – Texas: American Society of Civil Engineers, 2011. – P. 2631–2636.
29. Erzin Y., Gunes N. The prediction of swell percent and swell pressure by using neural networks // Mathematical and Computational Applications. – 2013. – V. 16 – P. 425–436.
30. Vijayvergiya V.N., Sulvian R.A. Simple technique for identifying heave potential // Proceedings of Workshop on Expansive Clays and Shales in Highway Design and Construction. – Denver, 1972. – V. 1. – P. 149–154.

Поступила 02.02.2022 г.

Информация об авторах

Вдовкина Д.И., докторант кафедры геологии и разведки МПИ, Карагандинский технический университет.

Кошляков А.Е., доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой инженерной геологии и гидрогеологии, НИИ «Институт геологии», Киевский национальный университет им. Т. Шевченко.

Пономарева М.В., кандидат технических наук, доцент кафедры геологии и разведки месторождений полезных ископаемых, Карагандинский технический университет.

Пономарева Е.В., доктор PhD, старший преподаватель кафедры геологии и разведки месторождений полезных ископаемых, Карагандинский технический университет.

UDC 552.52

ESTIMATION OF CLAY SWELLING PROPERTIES IN KARAGANDA TERRITORY USING MACHINE LEARNING METHODS

Darya I. Vdovkina¹,
daryavdovkina@gmail.com

Oleksii Y. Koshliakov²,
kosh57@ukr.net

Marina V. Ponomareva¹,
mv_ponomareva18@mail.ru

Ekaterina V. Ponomareva¹,
evmussina1992@gmail.com

¹ Karaganda Technical University,
56/1, Nursultan Nazarbayev avenue, Karaganda, 100012, Kazakhstan.

² Taras Shevchenko National University,
90, Vasylykivska street, 03022, Kyiv, Ukraine.

The relevance of the study is caused by the need to identify the dependence of the clays swelling on their physical characteristics in order to reduce time and money resources during geotechnical surveys. The active development of the construction industry leads to the development of territories composed of soils, which, as a result of moisture, increase in volume – swell.

The main aim of the study is to establish the relationship between the relative swelling of clay rocks and their physical characteristics, the determination of which requires minimal resources using machine learning methods.

Objects: Quaternary and Neogene clays of Karaganda, which compose the geological section of the territories used for the construction of buildings and structures.

Methods: creation of laboratory database (physical and compression characteristics, particle size distribution) and field (description of soils: color, presence of inclusions, determination of groundwater level, sampling intervals) studies of clays in excel; application of the high-level programming language «Python» to develop mathematical models using the «Anaconda» distribution kit; the Pareto theorem application for training and validation of the resulting model; use of the «Mean Squared Error» indicator to assess the adequacy of the developed models.

Results. Three predictive models of the relative clay swelling were developed. The laboratory and geological parameters of 103 clay samples taken as a result of geotechnical surveys in Karaganda, Kazakhstan, were the input data. The following machine learning algorithms were used: Random Forest, Multilinear regression, Support vector machines. According to the «Mean Squared Error» criterion, the Random Forest model was chosen to develop a relative swelling model.

Key words:

Clay rocks, clays, swelling, Random Forest model, Quaternary deposits, Neogene deposits.

REFERENCES

- Agency for strategic planning and reforms of the Republic of Kazakhstan Bureau of National statistics. Available at: <https://stat.gov.kz/> (accessed 17 November 2020).
- Zhang T.W., Wang S.J. Explanation of the Influence of Sodium Chloride Solution on Volume Deformation and Permeability of Normally Consolidated Clays. *Materials*, 2019, vol. 12, pp. 1–13.
- Selvakumar S., Soundara B. Swelling behaviour of expansive soils with recycled geofoam granules column inclusion. *Geotextiles and Geomembranes*, 2019, vol. 47, pp. 1–11.
- Julina M., Thyagaraj T. Combined effects of wet-dry cycles and interacting fluid on desiccation cracks and hydraulic conductivity of compacted clay. *Engineering Geology*, 2020, vol. 267, pp. 1–15.
- Khan M.A., Wang J.X., Patterson W.B. A study of the swell-shrink behavior of expansive Moreland clay. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, vol. 13, pp. 205–217.
- Sabtan A.A. Geotechnical properties of expansive clay shale in Tabuk, Saudi Arabia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2005, vol. 25, pp. 747–757.
- Giles D.P., Griffiths J.S. *Geological hazards in the UK: their occurrence, monitoring and mitigation: engineering group working party report*. England, Geological Soc Publishing House, 2020. 490 p.
- Butscher C., Scheidler S., Farhadian H., Dresmann H., Huggenberger P. Swelling potential of clay-sulfate rocks in tunneling in complex geological settings and impact of hydraulic measures assessed by 3D groundwater modeling. *Engineering Geology*, 2017, vol. 221, pp. 143–153.
- Akt rassledovaniya prichin obrusheniya doma № 7 v mikroraione Besoba [The act of investigation of the causes for house no. 7 collapse in the Besoba microdistrict]. Available at: http://ekaraganda.kz/?mod=news_read&id=5678 (accessed 15 October 2020).
- Das S.K., Samui P., Sabat A.K., Sitharam T.G. Prediction of swelling pressure of soil using artificial intelligence techniques. *Environmental Earth Sciences*, 2010, vol. 61, pp. 393–403.
- Yilmaz I., Yuksek G. Prediction of the strength and elasticity modulus of gypsum using multiple regression, ANN, and ANFIS models. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, vol. 46, pp. 803–810.
- Seed H.B., Woodward J., Lundgren R. Prediction of swelling potential for compacted clays. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1962, vol. 88, pp. 53–87.
- Ranganatham B.V., Satyanarayana B. A rational method of predicting swelling potential for compacted expansive clays. *Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Montreal, 1965. pp. 92–96.
- Vijayvergiya V.N., Ghazzally O.I. Prediction of swelling potential of natural clays. *Proceedings of the Third International Conference on Expansive Soils*. Israel, Haifa, July 30 – August 1, 1973. pp. 227–234.

15. Pedarla A., Puppala A.J., Patil U.D., Hoyos L.R., Pino A.H. A semi-empirical approach-based model for swell characterization of expansive clays. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2019, vol. 37, pp. 5371–5381.
16. McCormack D.E., Wilding L.P. Soil properties influencing swelling in canfield and Geeburg soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1975, vol. 39, pp. 496–502.
17. O'Neil M.W., Ghazzally O.I. Swell potential related to building performance. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1977, vol. 103, pp. 1363–1379.
18. Johnson L.P., Sneath D.R. Prediction of potential heave of swelling soil. *Geotechnical Testing Journal*, 1978, vol. 1, pp. 117–124.
19. Bandyopadhyay S.S. Prediction of swelling potential for natural soils. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, 1981, vol. 107, pp. 658–691.
20. Chao K.C., Nelson J.D. Validation of foundation design method on expansive soils. *Geotechnical engineering*, 2019, vol. 50, pp. 103–111.
21. Cokca E. Relationship between methylene blue value, initial soil suction and swell percent of expansive soils. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Science*, 2002, vol. 26, pp. 521–529.
22. Bahmed I.T., Harichane K., Ghrici M., Boukhatem B., Rebouh R., Gadouri H. Prediction of geotechnical properties of clayey soils stabilised with lime using artificial neural networks (ANNs), *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, vol. 16, pp. 702–711.
23. Zumrawi M. Prediction of swelling characteristics of expansive soils. *Sudan Engineering Society Journal*, 2012, vol. 58, pp. 55–62.
24. Erzin Y., Gunes N. The unique relationship between swell percent and swell pressure of compacted clays. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2013, vol. 72, pp. 71–80.
25. Gawriuczzenkow I., Wójcik E. Prediction of swell pressure in Neogene clays from Warsaw, based on the swell index. *Geology, Geophysics & Environment*, 2018, vol. 44, pp. 219–229.
26. Chen F.H. *Foundations on expansive soils*. Amsterdam, Elsevier, 1975. 295 p.
27. Ameratunga J., Sivakugan N., Das B.M. *Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering*. India, Springer, 2016. 228 p.
28. Kang X., Onyejekwe S., Ge L., Stephenson R. Spatial variation and correlation between undrained shear strength and plasticity index. *Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering*. Texas, American Society of Civil Engineers, 2011. pp. 2631–2636.
29. Erzin Y., Gunes N. The prediction of swell percent and swell pressure by using neural networks. *Mathematical and Computational Applications*, 2013, vol. 16, pp. 425–436.
30. Vijayvergiya V.N., Sulvian R.A. Simple technique for identifying heave potential. *Proceedings of Workshop on Expansive Clays and Shales in Highway Design and Construction*. Denver, 1972, vol. 1, pp. 149–154.

Received: 2 February 2022.

Information about the authors

Darya I. Vdovkina, doctoral student, Karaganda technical university.

Oleksii Y. Koshliakov, Dr. Sc., professor, Taras Shevchenko National University.

Marina V. Ponomareva, Cand. Sc., associate professor, Karaganda Technical University.

Ekaterina V. Ponomareva, Dr. Sc., senior lecturer, Karaganda Technical University.

Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Корректурa и перевод на английский язык *С.В. Жаркова*
Дизайн обложки *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива
Валерия Касаткина

Руководство для авторов и образец оформления статьи: izvestiya.tpu.ru

Подписано к печати 28.02.2022. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 24,54. Уч.-изд. л. 22,20.
Заказ 31-22. Тираж 500 экз.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ