

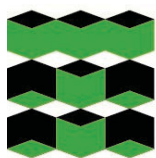


**ИЗВЕСТИЯ  
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

**Том 333, № 11, 2022  
Издается с 1903 г.**

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

**Volume 333, № 11, 2022  
Published since 1903**



**ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

---

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

**ИЗВЕСТИЯ  
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 333, № 11, 2022

Издательство  
Томского политехнического университета  
2022

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 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.

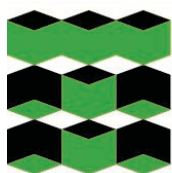
Автор статьи имеет право предложить двух рецензентов по научному направлению своего исследования.

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](http://www.elibrary.ru), [scholar.google.com](http://scholar.google.com)



**TOMSK  
POLYTECHNIC  
UNIVERSITY**

---

ISSN (print) – 2500\_1019  
ISSN (on\_line) – 2413\_1830

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

Volume 333, № 11, 2022

Tomsk Polytechnic University Publishing House  
2022

## EDITORIAL BOARD

Semiletov I.P., editor in chief, Dr. Sc. (Russia)  
Ostvald R.V., Cand. Sc. (Russia)  
Savichev O.G., Dr. Sc. (Russia)  
Pokrovsky O.S., Cand. Sc. (France)  
Starostenko V.I., Dr. Sc. (Ukraine)  
Kontorovich A.E., Dr. Sc. (Russia)  
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)  
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)  
Ludmila A. Strokova, Dr. Sc. (Russia)  
Alexey K. Mazurov, Dr. Sc. (Russia)  
Boyarko G.Yu., Dr. Sc., Cand. Sc. (Russia)  
Strizhak P.A., Dr. Sc. (Russia)  
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.

## СОДЕРЖАНИЕ

## CONTENTS

- Результаты экспериментов по фиторемедиации сульфидных отходов хвостохранилищ овсом посевным (*Avena sativa*)  
Бортникова С.Б., Артамонова В.С., Абросимова Н.А., Юркевич Н.В., Хващевская А.А.
- 7 Results of phytoremediation experiments with sowing oats (*Avena sativa*) on different types of mine tailings  
Bortnikova S.B., Artamonova V.S., Abrosimova N.A., Yurkevich N.V., Khvachevskaya A.A.
- Разработка методики синтеза фосфата алюминия и водорода из алюминиевого лома  
Новиков А.С., Мостовщиков А.В.
- 24 Development of a method for synthesis of aluminum phosphate and hydrogen from aluminum production wastes  
Novikov A.S., Mostovshchikov A.V.
- Влияние термобарических параметров на эффективность процесса подготовки природного газа  
Лиинтин И.А., Ерофеев В.И.
- 32 Influence of temperature and pressure conditions on the efficiency of natural gas preparation  
Liintin I.A., Erofeev V.I.
- Определение устойчивости скально-обвальных участков на перегоне Мугуле-Мукунга Дальневосточной железной дороги  
Сахаровский А.В., Строкова Л.А.
- 37 Determination of the stability of rock-fall sites on the Mugule-Mukunga stretch of the Far Eastern railway  
Sakharovskiy A.V., Strokova L.A.
- Анализ подходов к численному моделированию горения пылеугольного топлива в турбулентном потоке  
Пронин А.К., Гиль А.В.
- 50 Analysis of approaches to numerical simulation of pulverized coal fuel combustion in a turbulent flow  
Pronin A.K., Gil A.V.
- Изучение воздействия полимерных составов на фильтрационные потоки пласта Ю<sub>1</sub><sup>2+3</sup> нефтяного месторождения «Х»  
Серебрянников А.А., Зятиков П.Н.
- 63 Studying the effect of polymer compositions on the filtration flows of the Yu<sub>1</sub><sup>2+3</sup> formation of the oil field «X»  
Serebryannikov A.A., Zyatikov P.N.
- Органическое вещество и геохимия углей среднеюрского возраста Межегейского месторождения (Улуг-Хемский бассейн, Тува)  
Ондар С.А., Бушнева Д.А.
- 71 Organic matter and geochemistry of Middle Jurassic coals of the Mezhegey deposit (Ulug-Khem basin, Tuva)  
Ondar S.A., Bushneva D.A.
- Влияние структуры бентонитовой глины, активированной давлением, на показатель адсорбции  
Середин В.В., Алванян К.А., Маковецкий О.А., Ядзинская М.Р.
- 81 Effect of the structure of bentonite clay activated by pressure on the adsorption index  
Seredin V.V., Alvanyan K.A., Makovetskiy O.A., Yadzinskaya M.R.
- Ртуть в почвах и растительности на заповедных территориях Приморского края  
Барановская Н.В., Иванов В.В., Осипова Н.А., Паничев А.М., Чекрыжов И.Ю., Доронина В.Д., Хващевская А.А.
- 90 Mercury in soils and vegetation in protected areas of Primorsky Krai  
Baranovskaya N.V., Ivanov V.V., Osipova N.A., Panichev A.M., Chekryzhov I.Yu., Doronina V.D., Khvashchevskaya A.A.
- Термодинамический анализ реакций получения низших олефинов в технологии FCC на основе учета функциональных групп в молекулах углеводородов и квантовой химии  
Ивашкина Е.Н., Форутан С.К.
- 101 Thermodynamic analysis of FCC reactions based on functional groups in hydrocarbon molecules and quantum chemistry for production of light olefins  
Ivashkina E.N., Foroutan S.G.
- Анализ и выбор тампонажной смеси, устойчивой к динамическим нагрузкам, с целью повышения качества герметичности крепи в затрубном пространстве  
Блинов П.А., Черемшанцев Д.М., Шаншеров А.В., Кузнецова Н.Ю., Никишин В.В.
- 115 Analysis and selection of a grouting mixture, resistant to dynamic loads, in order to improve the support tightness quality in the annulus  
Blinov P.A., Shansherov A.V., Cheremshantsev D.M., Kuznetsova N.Yu., Nikishin V.V.
- Технико-экономическая модель автономного комплекса по производству «зелёного» водорода и её апробация на примере Монголии и Японии  
Попов С.П., Шакиров В.А., Колосницын А.В., Максаква Д.В., Балдынов О.А.
- 124 Technical and economic model of an autonomous complex for production of «green» hydrogen and its testing on the example of Mongolia and Japan  
Popov S.P., Shakirov V.A., Kolosnitsyn A.V., Maksakova D.V., Baldynov O.A.
- Improving sucker rod pump efficiency using frequency controlled induction motor  
Текле С.И., Зюзев А.М., Костылев А.В.
- 140 Повышение эффективности работы частотно-регулируемого электропривода штангового глубинного насоса  
Текле С.И., Зюзев А.М., Костылев А.В.
- Эмпирический метод распознавания группы стресс-коррозионных трещин в металле по сигналу накладного вихретокового преобразователя  
Загидулин Р.В., Бакиев А.Т., Бакиев Т.А.
- 149 Empirical method for recognizing a group of stress-corrosion cracks in metal by the signal of eddy-current sensor  
Zagidulin R.V., Bakiev A.T., Bakiev T.A.

- Применение наземных геофизических исследований методом электротомографии в составе инженерно-геологических изысканий подтапливаемой территории одного из жилых районов г. Иркутска**  
Шкиря М.С., Ланкин Ю.К., Терешкин С.А., Лазурченко А.В., Давыденко Ю.А.
- Исследования по лазерной дезактивационной очистке поверхностей металлов, загрязненных радиоактивными материалами**  
Софронов В.Л., Карташов Е.Ю., Ткачук С.А., Пак А.Д., Тинин В.В., Галата А.А.
- Расчетная и аппаратная база геомониторинга состояния массива методом регистрации естественного электромагнитного излучения**  
Простов С.М., Разумов Е.Е., Мулев С.Н., Шабанов Е.А.
- Исследование динамики выделения газообразного CO<sub>2</sub> в перегретом пристенном слое раствора C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O-CO<sub>2</sub>**  
Дехтярь Р.А., Овчинников В.В.
- Способ повышения экономической эффективности применения противотурбулентных присадок**  
Банерджи Т., Шестаков Р.А.
- Методология расчета комбинированной системы уравнивания привода штанговой установки при колебаниях динамического уровня**  
Уразакон К.Р., Тугунов П.М.
- 160 Applying ground geophysical prospecting using the method of electrical resistivity tomography as part of engineering and geological surveys of a flooded area in one of the residential areas of Irkutsk**  
Shkiria M.S., Lankin Yu.K., Tereshkin S.A., Lazurchenko A.V., Davydenko Yu.A.
- 171 Research on laser deactivation cleaning of metal surfaces contaminated with radioactive materials**  
Sofronov V.L., Kartashov E.Yu., Tkachuk S.A., Pak A.D., Tinin V.V., Galata A.A.
- 183 Calculation and hardware base for geomonitoring the state of the array by registering natural electromagnetic radiation**  
Prostov S.M., Razumov E.E., Mulev S.N., Shabanov E.A.
- 194 Study of the dynamics of gaseous CO<sub>2</sub> release in a superheated wall layer of C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O-CO<sub>2</sub> solution**  
Dekhtyar R.A., Ovchinnikov V.V.
- 207 Method for increasing the economic efficiency of the use of anti-turbulent additives**  
Banerjee T., Shestakov R.A.
- 218 Methodology for calculating the combined system for balancing the drive of a rod installation with fluctuations in the dynamic level**  
Urazakov K.R., Tugunov P.M.

УДК 550.47:550.73

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ФИТОРЕМЕДИАЦИИ СУЛЬФИДНЫХ ОТХОДОВ ХВОСТОХРАНИЛИЩ ОВСОМ ПОСЕВНЫМ (*AVENA SATIVA*)

**Бортникова Светлана Борисовна**<sup>1</sup>,  
BortnikovaSB@ipgg.sbras.ru

**Артамонова Валентина Сергеевна**<sup>2</sup>,  
artamonovavs@yandex.ru; artamonova@issa-siberia.ru

**Абросимова Наталья Александровна**<sup>1</sup>,  
AbrosimovaNA@ipgg.sbras.ru

**Юркевич Наталия Викторовна**<sup>1</sup>,  
YurkevichNV@ipgg.sbras.ru

**Хвощевская Альбина Анатольевна**<sup>3</sup>,  
unpr\_voda@mail.ru

<sup>1</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3.

<sup>2</sup> Институт почвоведения и агрохимии СО РАН,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, 8/2.

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность.** Повышение концентрации металлов и металлоидов в наземных экосистемах в результате деятельности горнодобывающей и металлургической промышленности является серьезной проблемой для окружающей среды – приводит к накоплению элементов в почвах, дикорастущих и сельскохозяйственных растениях и сопровождается загрязнение компонентов пищевой цепи.

**Цель:** определить и оценить способность овса посевного *Avena sativa* аккумулировать металлы и металлоиды из вещества хвостохранилищ с разными физико-химическими параметрами для фиторемедиации.

**Объекты:** вещество хвостохранилищ (Дюков лог, Талмовские Пески, Хову-Аксинские) и отвалов (Урской, Белоключевской, Беркульский).

**Методы.** Пробы корней и ростков были проанализированы на содержание широкого круга элементов методом ИСП-МС на масс-спектрометре NexION 300D (PerkinElmer, США) (ПНИЛ ГГХ ИШПР ТПУ). Отбор твердых проб выполнялся в соответствии с общепринятыми методиками. Пробы твердого вещества были проанализированы на содержание оксидов силикатной группы методом РФА на рентгенофлуоресцентном спектрометре ARL-9900-XP (Thermo Electron Corporation, Switzerland) в лаборатории рентгеноспектральных методов анализа ИГМ СО РАН, элементный анализ проводился методом ИСП-МС на приборе ELAN-9000 DRC-e, Perkin Elmer, USA (ХАЦ «Плазма»).

**Результаты.** Проведены эксперименты с проращиванием семян однодольного растения – овса посевного (*Avena sativa*), на субстратах хвостохранилищ (Дюков лог, Талмовские Пески, Хову-Аксинские) и отвалов (Урской, Белоключевской, Беркульский), расположенных в Западной Сибири и республике Тыва. Данное растение относится к списку гостированных тестов фитотоксичности и сидератам, но его развитие на представленных техногенных объектах ранее не изучалось. Впервые показано, что в среднем концентрация металлов и металлоидов в проростках овса превышала концентрацию этих элементов во всех случаях по сравнению с контролем. Оценено влияние кислотности/щелочности техногенных субстратов на извлечение элементов растениями. Показано, что семена овса не взошли в пробах с добавлением вещества, дающего кислую среду (pH<2) либо высокую минерализацию жидкой фазы. В веществе отходов с диапазоном pH 2–5 (кислая и слабокислая среда) семена проросли, но масса проростков существенно меньше, чем в веществе с нейтральной-субщелочной средой (pH 6–8). На всхожесть не влияет соотношение алюмосиликаты/пирит, основное значение имеет наличие карбонатов и степень окисленности вещества отходов. В кислой среде, при относительно высоких концентрациях металлов (Fe, Mn, Cu, Zn) в жидкой фазе, их доля, поглощаемая растениями, была существенно ниже, чем в нейтральной-субщелочной среде. На аккумуляцию большинства элементов кислотность среды не оказывала влияния, их накопление в подземных и в наземных частях растений зависело от содержания их растворимых форм. Для мышьяка и висмута прослеживается повышение их содержания в проростках овса с повышением pH водной вытяжки. Влияние концентраций элементов в среде питания растений неоднозначно. Например, для вещества с высоким содержанием подвижных форм Cd, Pb, Zn биомасса и длина корня проростков овса была выше, чем для овса, выращенного на другом веществе. Транслокационный индекс указывает на то, что накопление большинства металлов и металлоидов выше в корнях, чем в наземных частях.

**Ключевые слова:**

Хвостохранилища, металлы и металлоиды, подвижные формы элементов, фиторемедиация, овес посевной (*Avena sativa*).



## Введение

Фиторемедиация представляет собой эффективную, экологически чистую, недорогую технологию, в которой растения используются для уменьшения или удаления неорганических и органических загрязнителей из окружающей среды [1].

Выбор местных адаптированных видов растений важен для восстановления растительности, долгосрочной стабильности и устойчивости экосистемы. Фиторемедиация – это новая «зеленая» технология, которая использует растения и ризосферные микроорганизмы для очистки загрязненных участков. Фиторемедиация предлагает множество преимуществ, таких как низкая стоимость, общественное признание и эстетическая ценность, что делает ее востребованной для восстановления загрязненных территорий. Как правило, существует разрыв между исследованиями в лабораториях в контролируемых условиях и «реальным полевым сценарием», когда виды растений растут и выживают в загрязненной окружающей среде [2].

Основными технологиями фиторемедиации являются фитостабилизация и фитоэкстракция, ризодеградация/фитостимуляция и фитодеградация/фитотрансформация [1, 3]. Фитостабилизация – использование растений для снижения биодоступности тяжелых металлов в почве, (ii) фитоэкстракция – использование растений для извлечения и удаления тяжелых металлов из почвы, (iii) фитоволатилизация – использование растений для поглощения тяжелых металлов из почвы и выброса в атмосферу в виде летучих соединений, и (iv) фиточелатирование – использование гидропонно культивируемых растений для поглощения или адсорбции ионов тяжелых металлов из грунтовых вод и водных отходов [4, 5]. В число перспективных технологий биоремедиации входит фиторемедиация (фитоэкстракция). Механизм фиторемедиации заключается в следующем: в ходе корневого (минерального) питания растения поглощают практически все химические элементы. В процессе роста и развития растений осуществляется их транслокация в надземные органы растений. По мере приближения к старению надземная масса растений удаляется и подлежит соответствующей переработке. При этом растения следует отбирать экспериментально, исходя из поглотительной способности корней, их физиологической активности, гидротермических условий нарушенных территорий, подлежащих восстановлению. После скашивания растений надземная фитомасса может быть использована в качестве источника металлов. С этой целью растения сжигают и из золы извлекают целевые компоненты. Как технологический приём, фитоэкстракцию делят на два разных метода – индуцированную и непрерывную. Первый метод основывается на применении специальных хелатирующих агентов, образующих растворимые комплексы с металлами. В комплексном виде они довольно быстро поглощаются корнями и транспортируются в надземные органы растений. Непрерывная фитоэкстракция является более долгосрочной и базируется на приме-

нении растений-гипераккумуляторов [6]. Фиторемедиация стала эффективным и экономически выгодным методом очистки окружающей среды только после того, как обнаружили растения-гипераккумуляторы тяжелых металлов [7]. Фиторемедиация с применением растений-гипераккумуляторов является экологически чистой и экономически выгодной технологией для очистки окружающей среды [8]. Как правило, растениями-гипераккумуляторами являются те, которые способны накапливать ионы металлов  $>0,1-1\%$  в пересчете на сухой вес [9]. Растения-гипераккумуляторы могут накапливать  $>100$  мкг/г Cd,  $>300$  мкг/г Co/Cu/Cr,  $>1000$  мкг/г Ni/As/Pb,  $>3000$  мкг/г Zn,  $>10000$  мкг/г Mn при выращивании в естественной среде обитания [10].

Растения обладают способностью поглощать ионные соединения из корнеобитаемого слоя даже в низких концентрациях. Благодаря ризосферной микрофлоре происходит регулирование биодоступности тяжелых металлов, что позитивно отражается на плодородии [11, 12]. Использование фиторемедиации предполагает: 1) экономическую целесообразность, поскольку фиторемедиация представляет собой автотрофную систему, работающую от солнечной энергии, поэтому проста в управлении, а стоимость установки и обслуживания невысока; 2) экологичность и снижение воздействия загрязняющих веществ на окружающую среду; 3) доступность применения на крупномасштабных месторождениях; 4) противозерозионное действие и предупреждающее выщелачивание металлов благодаря стабилизации тяжелых металлов, что сокращает риск распространения загрязняющих веществ; 5) повышение плодородия [13–15].

Факторами, ограничивающими рост растений на отходах, являются кислотность/щелочность среды (значения pH), высокие концентрации растворимых солей As, B, Cd, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Se, недостаток биогенных элементов питания, таких как N и P, низкое содержание азотфиксирующих микроорганизмов [16, 17].

Переход металлов из почвы в растения оценивается и изучается с помощью различных индексов, один из них транслокационный (ТИ). Этот индекс рассчитывается как отношение концентрации металла в растении к концентрации того же металла в почве [18]. Высокие значения ТИ ( $\geq 1$ ) указывают на хорошую способность поглощения растениями металлов из корнеобитаемого слоя. Низкие значения ТИ указывают на слабое поглощение металлов корневой системой [19].

Цель исследования состояла в анализе влияния состава вещества хвостохранилищ на рост овса посевного (*Avena sativa*) для применения в фитостабилизации и/или фитоэкстракции металлов и металлоидов.

## Материалы и методы

Проведены эксперименты с проращиванием семян однодольного растения – овса посевного (*Avena sativa*) – на веществе хвостохранилищ (Дюков лог, Талмовские Пески, Хову-Аксинские) и отвалов (Урской, Белоключевской, Берикольский), расположенных в Кеме-

ровской области и Республике Тыва (рис. 1). Объекты подобраны таким образом, чтобы их минералогическо-геохимические характеристики охватывали многообразие составов складированных отходов.



Рис. 1. Расположение объектов исследования

Fig. 1. Location of study objects

Хранилища отходов переработки барит-полиметаллических руд Салаирского рудного поля (г. Салаир, Кемеровская область)

Талмовские Пески – первое хвостохранилище Салаирского ГОКа – образовано в начале эксплуатации барит-полиметаллических месторождений рудного поля, когда разрабатывались верхние, наиболее богатые части рудных тел из зоны окисления. Переработка руд производилась на Золотоизвлекательной фабрике методами гравитации, цианирования и флотации. С 1932 по 1942 гг. отходы обогащения складировались в запруженное дамбой русло реки Малой Талмовой в виде ленты протяженностью 7 км и шириной ~30 м. После заполнения отходами получившегося искусственного пруда ниже по течению сооружалась следующая дамба, и процесс повторялся. В настоящее время хвостохранилище представляет собой узкую (до 30 м) ленту протяженностью около 8 км, в непосредственной близости от которой протекает река Малая Талмовая. Мощность техногенных отложений не превышает 3 м, что составляет около 1 млн т. Содержание сульфидов (пирит, сфалерит, галенит) не превышает 6–7 %, карбонаты (кальцит, доломит) составляют 9–10 %.

Хвостохранилище Дюков лог находится к юго-востоку от Салаирского рудного поля, близ жилых построек г. Салаира. Оно эксплуатировалось после заполнения Талмовских Песков. Вещество, слагающее хвостохранилище, поступало из Золотообогащительной фабрики, перерабатывающей руды зоны окисления рудного поля, и поэтому состоит из сильноизмененных пород и минералов [20]. Сульфидные минералы составляют около 5 %, основной из них пирит, меньшая доля приходится на галенит и сфалерит; халькопирит встречается очень редко. Доля карбонатов – 2–3 % [21, 22]. В хвостохранилище складировано 1,5 млн т отходов.

Насыпные отвалы отходов переработки руд Урского рудного поля (пос. Урск, Кемеровская область)

Белоключевской отвал (~400 тыс. т) сформирован в результате складирования отходов цианирования руд зоны окисления одноименного месторождения. Характерной чертой отвала является переслаивание контрастных по составу горизонтов кварц-баритовой (рыжее окисленное вещество) и кварц-пиритовой сыпучки (голубовато-серое вещество). В сильноокисленной кварц-баритовой сыпучке содержание сульфидов составляет 2–4 %, а в кварц-пиритовой доходит до 25 %. Доля карбонатов в обоих горизонтах не превышает 0,5 % [23].

Урской отвал образован в 30–40-х гг. прошлого века и содержит отходы переработки зоны окисления Ново-Урского месторождения. Отходы цианирования кварц-баритовой сыпучки (самая верхняя, наиболее окисленная, часть рудных тел) и кварц-пиритовой сыпучки складировались рядом в пойме ручья в два насыпных отвала без защитных технических сооружений или дамб. В результате были сформированы насыпи высотой 10–12 м. Отвал кварц-пиритовой сыпучки в большой степени изъят в последнее десятилетие для вторичного извлечения барита. Второй, из отходов верхней части зоны окисления, остался как есть. Состав отвалов во многом аналогичен составу Белоключевского.

Берикульский отвал (пос. Комсомольск, Кемеровская обл.)

Берикульские кеки цианирования сульфидного флотоконцентрата являются отходами Берикульского золотоизвлекательного завода (БЗЗ, пос. Новый Берикуль, Тисульский район, Кемеровская область), где перерабатывались главным образом руды Старо-Берикульского месторождения. В отвале складированы отходы цианирования флотоконцентрата, в котором содержание сульфидов доходило до 25 %.

Хову-Аксинские хранилища (пос. Хову-Аксы, Республика Тыва)

Месторождение уникальных сульфидоарсенидных никель-кобальтовых руд Хову-Аксы расположено на левобережье р. Элегест в 70 км от места впадения ее в верховья р. Енисей (Республика Тыва). Комбинат «Тувакобальт», осуществлявший отработку рудных жил этого месторождения и получение коллективного концентрата, проработал с 1970 по 1991 гг. и остановлен из-за плановой убыточности производства. В результате за 20 лет производственной деятельности на промплощадке в пяти картах захоронения складировано более 2 млн м<sup>3</sup> хвостов гидрометаллургического передела [24].

Для проведения экспериментов отобраны пробы хвостохранилищ и отвалов. Пробы (~0,5 кг каждая) отбирались из закопшек глубиной ~20 см в пластиковые герметично закрывающиеся пакеты (грипперы).

Каждый образец высушен на воздухе, измельчен, тщательно перемешан и просеян через сито <0,25 мм.

## Лабораторные анализы и эксперименты

### Пробоподготовка и анализы вещества

В лабораторных условиях пробы были гомогенизированы и разделены на три части. Первая часть высушена при комнатной температуре и истерта для анализов. Из второй части приготовлены пасты (твердое/вода=2/1) для определения кислотно-основного баланса вещества [25], и в них измерены значения pH (pH/Т-метром HI 9025 С, HANNA Instruments, США) и электропроводности (УЭП) кондуктометром Cond 315 i (WTW, США). Водные вытяжки (твердое/вода=1/10) для определения концентраций подвижных форм элементов приготовлены из третьей части проб. В водных вытяжках также были измерены значения pH и УЭП. Концентрации основных ионов определялись методом капиллярного электрофореза на приборе «Капель 105-М» (Люмэкс, Санкт-Петербург). На микроэлементный состав пробы анализировались методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на приборе Agilent 8800 (Agilent Technologies, США).

Пробы твёрдого вещества проанализированы на содержание оксидов силикатной группы методом РФА на рентгенофлуоресцентном спектрометре ARL-9900-XP (Thermo Electron Corporation) в лаборатории рентгеноспектральных методов анализа ИГМ СО РАН, элементный анализ проводился методом ИСП-МС на приборе ELAN-9000 DRC-e, Perkin Elmer, USA (ХАЦ «Плазма»).

### Эксперименты по проращиванию

Вещество отходов насыпали в чашки Петри (10 г) и покрывали бумажным фильтром, на котором размещали семена в количестве 25 штук (в пятикратной повторности), увлажнённые дистиллированной водой (~5 мл). Закрытые чашки термостатировались в течение трех суток при  $t=20-25$  °С. Одновременно закладывались семена на фильтры, размещённые на поверхность пробы фоновой почвы. После трех суток прорастания семян в термостате подсчитывали долю проросших семян во всех вариантах. После семисуточной экспозиции проростков овса измеряли максимальную длину их корней и высоту ростков, их воздушно-сухую массу. Пробы корней и ростков (их сухая масса) проанализированы на содержание химических элементов методом ИСП-МС на масс-спектрометре NexION 300D (PerkinElmer, США) (ПНИЛ «Вода» ГГХ ИШПР ТПУ). Полученные результаты сопоставлены с параметрами вещества отходов, на которых проводились эксперименты с растениями.

### Расчеты и коэффициенты

Для оценки поглощения растениями химических элементов использовали: транслокационный индекс (ТИ), транслокационный фактор (ТФ) и биоконцентрационный фактор (БКФ).

Перемещение металлов из корней в надземную часть оценивают с помощью ТИ, который определяется как отношение концентрации металла в надземной части растения к его концентрации в корне:

$$ТИ = \frac{C_p}{C_k}, \quad (1)$$

где  $C_p$  – содержание элемента в ростках, мг/кг сух. вес.;  $C_k$  – содержание того же элемента в корнях, мг/кг сух. вес.

Поступление химических элементов из вещества хвостохранилища в корни и надземные части овса оценивали путем изучения соответствующих коэффициентов переноса. ТФ рассчитывался путем деления концентрации металлов в растении на общее содержание металлов в корнеобитаемом слое:

$$ТФ_p = \frac{C_p}{C_{\Pi}}, \quad (2)$$

где  $ТФ_p$  – транслокационный фактор для надземных частей [26];  $C_p$  – содержание элемента в ростках, мг/кг сух. вес.;  $C_{\Pi}$  – содержание того же элемента в пробе вещества, г/т;

$$ТФ_k = \frac{C_k}{C_{\Pi}}, \quad (3)$$

где  $ТФ_k$  – транслокационный фактор для подземных частей (корней) [27];  $C_k$  – содержание элемента в корнях, мг/кг сух. вес.;  $C_{\Pi}$  – содержание того же элемента в пробе вещества, г/т.

Если значения отношений  $>1$ , это указывает на то, что растения накапливают соответствующие элементы, отношения около 1 указывают на то, что растения не подвержены влиянию, а отношения  $<1$  показывают, что растения исключают элементы из поглощения [28–30]. Если растения имеют высокие значения ТФ, они могут быть использованы для фиторемедиации [27, 31].

Способность аккумулировать металлы рассчитывается через БКФ:

$$БКФ = \frac{C_p}{C_{\text{ВВ}}}, \quad (4)$$

где БКФ – биоконцентрационный фактор;  $C_p$  – суммарное содержание элемента в подземных и надземных частях, мг/кг сух. вес.;  $C_{\text{ВВ}}$  – содержание того же элемента в подвижной форме, в данном случае в водной вытяжке из пробы [29].

БКФ может быть рассчитан отдельно для побегов (БКФ<sub>p</sub>) и корней (БКФ<sub>k</sub>). Значение БКФ  $>1000$  является критерием отнесения растения к хорошим аккумуляторам элементов.

## Результаты

### Характеристика вещества

Состав экспериментальных проб вещества отходов изменялся в широких пределах (табл. 1). Содержание алюмосиликатов ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ ) колебалось в пределах 23,2–88,1 %, Fe (определяемое главным образом количеством пирита) – 2,9–31 %, CaO – 0,05–18,8 %,  $S_{\text{total}}$  – 0,4–24,6 % (рис. 2).

В соответствии с особенностями состава (кислотонейтрализующие/кислотопродуцирующие компоненты), кислотность вещества и минерализация жид-

кой фазы (в данном случае – электропроводность (УЭП) пасты) также лежат в широкой области значений (рис. 3): от ультракислых (рН 0,89) до слабощелочных (рН 8,13) с УЭП от 0,063 (минерализация водной вытяжки 0,88 г/л, ультрапресная) до 8,9 мСм/см (10,6 г/л, солоноватая).

Таблица 1. Состав проб для экспериментов SiO<sub>2</sub>-LOI в %, Cu-Sb в г/т

Table 1. Sample composition for the experiments SiO<sub>2</sub>-LOI in %, Cu-Sb in g/t

Компонент Component	Талмовские Пески Talmovskiy Sands		Дюков лог Dyukov Log			Белоключевской Beloklyuch		Урской Ursk		Берикольский Berikul		Хову-Аксинские хранилища Khovu-Aksy tailings				Контроль Control
	рН <sub>пасты</sub> pH <sub>paste</sub>	2,47	6,95	7,63	2,27	6,64	1,18	0,89	0,64	1,79	4,95	2,12	4,55	7,63	8,04	8,13
SiO <sub>2</sub>	39,34	42,08	85,36	62,86	44,71	69,49	49,24	77,12	23,38	50,77	17,97	34,45	55,45	34,01	35,67	57,45
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,05	3,81	2,70	15,64	2,79	2,77	1,97	4,88	0,91	16,39	5,27	7,22	13,56	7,44	9,26	14,25
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,17	4,57	2,91	4,63	4,73	4,24	15,66	7,50	17,79	11,53	31,1	7,56	6,00	7,79	7,46	7,25
MnO	0,03	0,16	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,07	0,051	<0,01	0,13	0,23	0,18	0,13
MgO	1,41	1,30	0,74	0,12	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	1,21	2,11	4,63	2,47	4,11	4,78	1,86
CaO	1,49	4,31	0,22	2,43	0,94	0,12	0,14	0,12	0,05	5,27	5,42	16,53	5,41	18,77	16,22	6,46
S <sub>total</sub>	9,15	5,83	1,60	3,65	13,43	9,75	24,63	1,38	17,45	1,63	14,45	0,58	0,45	0,68	0,40	0,35
S <sub>sulfate</sub>	0,62	0,01	0,007	0,71	0,0075	7,7	7,4	1,4	16,24	0,11	4,6	0,34	0,92	0,31	0,04	0,005
Na <sub>2</sub> O	0,26	0,24	<0,05	0,39	0,07	<0,05	<0,05	<0,05	0,38	2,77	0,48	<0,05	1,52	<0,05	<0,05	1,18
K <sub>2</sub> O	2,43	0,58	0,55	4,09	0,69	0,81	0,66	0,90	0,16	1,63	1,12	1,65	2,37	1,55	1,62	2,5
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,22	0,00	0,00	0,00	0,17	0,00	0,00	0,03	0,00	0,11	0,21	0,24	0,13	0,32	0,16	0,12
BaO	16,91	22,30	3,61	1,66	22,88	11,39	10,80	3,46	28,11	<0,01	0,042	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,063
TiO <sub>2</sub>	0,24	0,17	0,10	0,28	0,11	0,58	0,43	0,38	0,26	1,00	0,425	0,37	0,90	0,37	0,39	0,84
LOI	8,60	2,35	1,68	4,91	7,38	4,92	14,63	3,77	13,18	6,16	12,20	14,58	11,29	15,72	14,58	10
Cu	220	480	370	73	460	79	770	270	620	42	760	980	32	1000	610	19
Zn	680	7600	650	270	8400	62	110	110	320	150	330	480	90	330	210	80
Pb	3300	2400	2000	470	4500	1500	2000	1800	3100	370	4300	46	11	51	22	12
Cd	1,1	30	2,0	0,71	33	0,19	0,42	0,15	1,2	0,45	4,8	1,9	0,05	1,5	0,68	0,05
As	180	94	120	270	440	370	630	390	380	5600	8100	22000	180	14000	14000	4,5
Sb	44	37	37	30	190	400	280	130	400	29	140	88	1,4	87	88	1,2

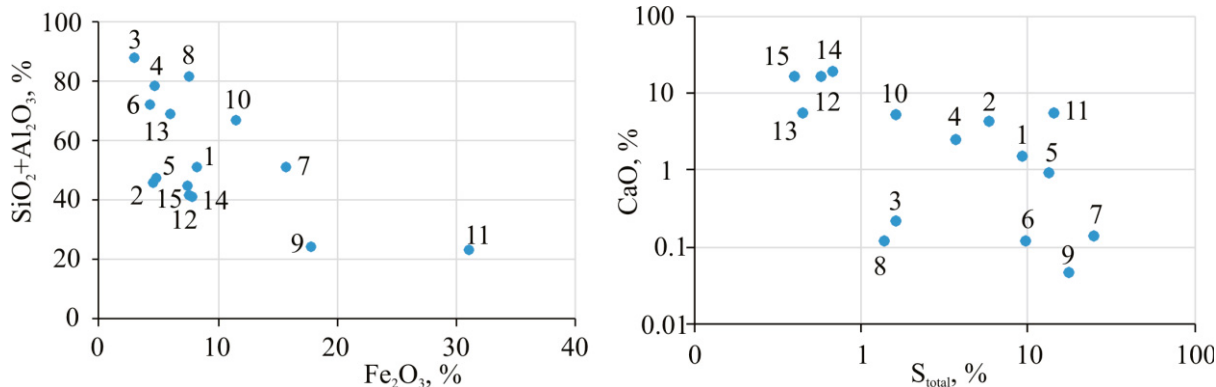


Рис. 2. Содержание некоторых оксидов и серы в пробах (здесь и далее: 1 – Талмовские Пески, окисленное вещество рыжего цвета; 2 – Талмовские пески, слабоокисленное вещество рыжевато-серого цвета; 3 – Дюков лог, желтовато-серое вещество верхнего слоя (ДЛ1-0); 4 – Дюков лог, рыжее вещество верхнего горизонта (ДЛ1-1); 5 – Дюков лог, серый песок (ДЛ2-1); 6 – Белоключевской отвал, кварц-баритовая сыпучка; 7 – Белоключевской отвал, кварц-пиритовая сыпучка; 8 – Урской отвал, кварц-баритовая сыпучка; 9 – Урской отвал, кварц-пиритовая сыпучка; 10 – Берикольский отвал, окисленный слой; 11 – Берикольский отвал рыжевато-серое вещество; 12 – Хову-Аксинские хранилища, карта 1; 13 – Хову-Аксинские хранилища, карта 1, почва; 14 – Хову-Аксинские хранилища, карта 3; 15 – Хову-Аксинские хранилища, карта 5

Fig. 2. Content of some oxides and sulfur in the samples (hereinafter: 1 – Talmovskiy Sands, oxidized tailings with red color; 2 – Talmovskiy Sands, slightly oxidized tailings with reddish-gray color; 3 – Dyukov Log, yellowish-gray tailings of the upper layer (DL1-0); 4 – Dyukov Log, red tailings of the upper horizon (DL1-1); 5 – Dyukov Log, gray sand (DL2-1); 6 – Beloklyuch waste heaps, quartz-barite tailings; 7 – Beloklyuch waste heaps, quartz-pyrite tailings; 8 – Ursk mining tailings, quartz-barite tailings; 9 – Ursk mining tailings, quartz-pyrite tailings; 10 – Berikul mine wastes, oxidized layer; 11 – Berikul mine wastes, reddish-gray tailings; 12 – Khovu-Aksy tailings, pond 1; 13 – Khovu-Aksy tailings, pond 1, soil; 14 – Khovu-Aksy tailings, pond 3; 15 – Khovu-Aksy tailings, pond 5

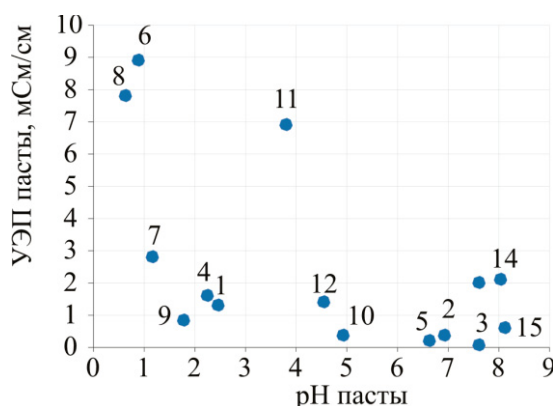


Рис. 3. Физико-химические параметры проб для экспериментов

Fig. 3. Physical and chemical parameters of samples for the experiments

Вариации в составе экспериментальных проб (концентрации основных и примесных компонентов, кислотность-щелочность, минерализация растворов) исчерпывали всё имеющееся разнообразие изучаемых отходов.

Таблица 2. Состав водных вытяжек из вещества экспериментальных проб, электропроводность УЭП в мкСм/см, концентрации в мг/л

Table 2. Composition of water extracts from the substance of experimental samples, electrical conductivity (SEC) –  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , concentrations –  $\text{mg}/\text{l}$

Объект / Object	Талмовские Пески / Talmovskiy Sands	Дюков лог / Dyukov Log			Белоклочевской / Beloklyuch		Урской / Ursk		Берикулский / Berikul		Хову-Аксинские хранилища / Khovu-Aksy tailings					
Компонент / Component																
pH	3,26	6,42	7,38	3,16	6,32	2,82	2,95	3,56	2,83	4,76	4,51	5,05	7,89	8,28	8,15	
УЭП/SEC	877	165	28	1506	98	4290	4590	430	1759	334	3660	576	1141	476	177	
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	620	46	6,9	720	390	7400	1900	170	1300	110	4600	340	920	310	730	
Cl <sup>-</sup>	1,6	0,49	0,35	0,61	1,9	11	0,95	0,22	0,55	0,59	2,04	1,8	2,4	3,0	0,57	
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	46	0,2	0,1	16
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	210	42	87	0,81
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<0,1	65	52	<0,1	30	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	70	140	140	100
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0,10	<0,002	0,0091	0,076	1,1	10	1,9	0,010	2,3	0,013	11	0,023	0,18	0,0071	0,0031	
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	<0,01	<0,01	<0,01	0,15	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,05	<0,01	0,06	<0,01	
Ca	101	9,9	2,88	151	2,1	46	33	10	6,1	6,12	154	86	160	8,4	5,5	
Mg	9,8	8,3	0,40	9,3	0,91	9,5	2,5	9,7	1,5	4,30	49	121	111	114	30	
Na	0,45	0,59	0,42	0,57	3,9	4,9	0,26	0,43	3,1	0,92	0,38	4,1	4,6	7,1	2,1	
K	0,062	0,62	0,25	0,95	1,3	0,17	<0,1	0,049	8,6	0,10	<0,1	4,0	1,1	4,8	2,4	
Fe	9,5	0,078	0,23	0,56	0,47	3000	520	0,70	480	11	1500	0,097	0,18	0,097	0,021	
Al	13	0,028	0,14	1,7	0,2	73	15	13	18	0,92	140	0,0031	0,0066	0,028	0,0095	
Mn	0,44	0,038	0,02	0,46	0,031	0,98	0,21	0,24	0,22	0,20	2,2	0,012	0,0033	0,018	0,012	
Si	2,7	0,34	0,77	1,2	0,89	0,22	1,2	1,2	0,34	5,7	9,0	1,1	3,7	0,53	0,97	
Cu	1,2	0,018	0,01	0,05	0,065	3,9	1,3	0,20	0,63	0,17	8,7	0,0026	0,0037	0,0062	0,0025	
Zn	16	0,52	0,07	0,78	1,0	1,7	0,73	0,47	0,96	0,25	10	0,0025	0,0033	0,0028	0,0013	
Pb	0,017	0,052	0,09	0,07	0,38	1,0	0,0037	0,0032	2,6	0,00	0,00	0,00001	0,00006	0,00003	0,00005	
Cd	0,048	0,0090	0,00	0,005	0,002	0,0035	0,0015	0,0008	0,0017	0,006	0,19	0,00003	0,00004	0,00003	0,00000	
As	0,0028	0,015	0,003	0,0016	0,053	15	1,9	0,0008	1,8	0,050	87	4,1	0,78	2,6	4,7	
Sb	0,0015	0,0032	0,0008	0,0005	0,028	0,13	0,0076	0,0006	0,047	0,001	0,012	0,21	0,0043	0,16	0,20	
Cr	0,029	0,00013	0,00021	0,00022	0,00078	0,092	0,024	0,0004	0,011	0,0017	0,37	0,00007	0,00045	0,00016	0,00053	
Co	0,0095	0,00025	0,00011	0,0050	0,00071	0,039	0,0099	0,0033	0,022	0,012	0,65	0,014	0,00084	0,0083	0,0087	
Ni	0,031	0,00061	0,00033	0,013	0,0025	0,077	0,024	0,0039	0,012	0,013	0,89	0,0049	0,0033	0,0025	0,0085	

В широких пределах изменяются концентрации элементов в вытяжках. Суммарные содержания растворимых форм металлов (Cu+Zn+Pb) и металлоидов (As+Sb), представленные на рис. 5, свидетельствуют о том, что эксперимент проведён с учётом большого разнообразия состава водной фазы и его результаты в дальнейшем могут применяться для оценки возможности рекультивации техногенных тел самого разного состава.

Вытяжки представлены растворами, которые условно можно разделить на 3 группы: 1) высокие

Общеизвестно, что обеспеченность растений элементами минерального питания зависит от кислотности среды, минерализации жидкой фазы и других условий. Повышению доступности металлов и металлоидов способствуют микроорганизмы, продуцирующие экзополисахариды и образующие с металлами хелатные комплексы, а также сидерофоры микробного происхождения, облегчающие транзит металлов через клеточные корневые оболочки внутрь растения. В растения поступают также водорастворимые формы элементов [32], и для оценки их концентраций нами были получены водные вытяжки из твердого вещества, используемого в экспериментах.

Оказалось, что состав водных вытяжек из вещества экспериментальных проб различается как по физико-химическим характеристикам, так и по концентрациям элементов (табл. 2).

По минерализации большинство проб соответствуют пресным водам ( $M_{\text{общ}} < 1$  г/л), 5 – солоноватым водам ( $M_{\text{общ}} 1,4–11$  г/л), рис. 4. Разброс значений pH – от 2,82 (сильнокислые воды) до 8,28 (слабощелочные воды).

(>1 мг/л) концентрации и металлов, и металлоидов; 2) высокие концентрации металлов (>0,1 мг/л), но сравнительно низкие металлоидов (<0,1 мг/л); 3) низкие концентрации металлов (<0,01 мг/л), но высокие металлоидов (первые мг/л). Это дало возможность проследить транзит элементов в растения из среды с большими колебаниями составов.

Всхожесть и рост овса посевного

Прорастание семян при наличии исследованных субстратов произошло не в каждой пробе (рис. 6).

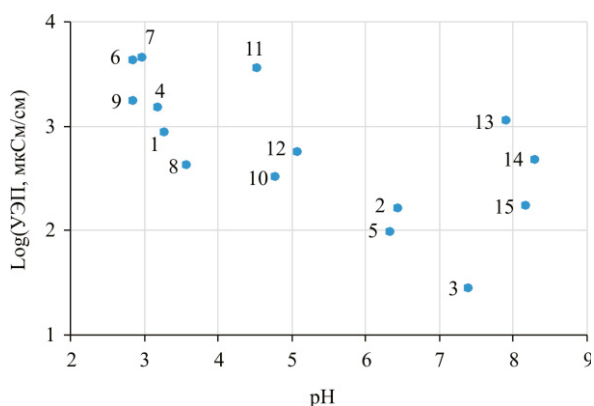


Рис. 4. Физико-химические параметры водных вытяжек из экспериментальных проб

Fig. 4. Physicochemical parameters of water leaching solution from the experimental samples

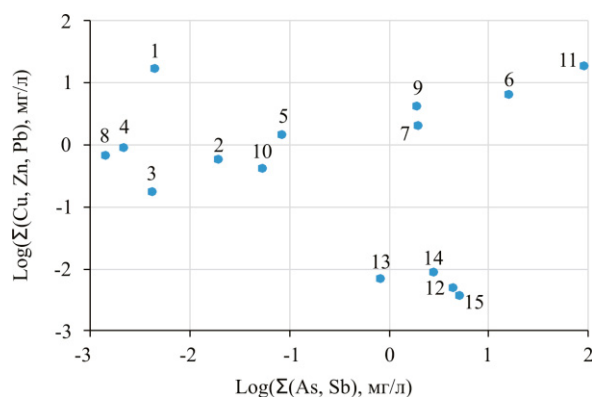
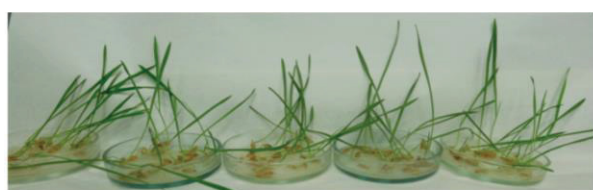
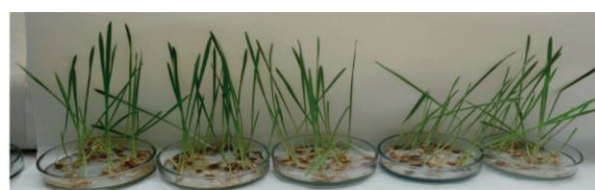


Рис. 5. Содержание металлов  $\Sigma(\text{Cu, Zn, Pb})$  и металлоидов  $\Sigma(\text{As, Sb})$  в водных вытяжках

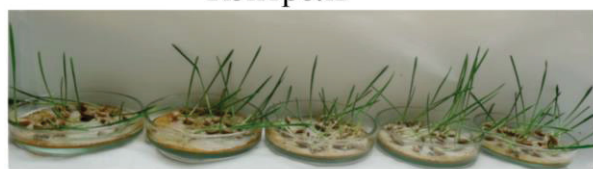
Fig. 5. Content of metals  $\Sigma(\text{Cu, Zn, Pb})$  and metalloids  $\Sigma(\text{As, Sb})$  in water leaching solution



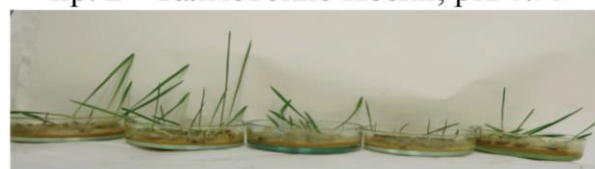
Контроль



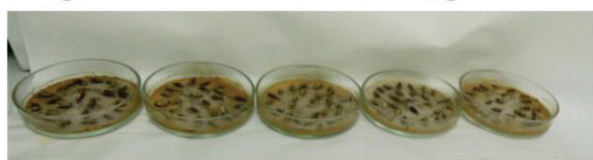
пр. 2 - Талмовские Пески, pH 6.95



пр. 1 - Талмовские Пески, pH 2.47



пр. 4 - Дюков Лог, pH 2.27



пр. 6 - Белоключевской отвал, pH 1.18



пр. 9 - Урской отвал, pH 1.79

Рис. 6. Примеры всхожести семян овса посевного на веществе с разной кислотностью и в контрольном варианте  
 Fig. 6. Examples of germination of oat seeds on a substance with different acidity and in the control sample

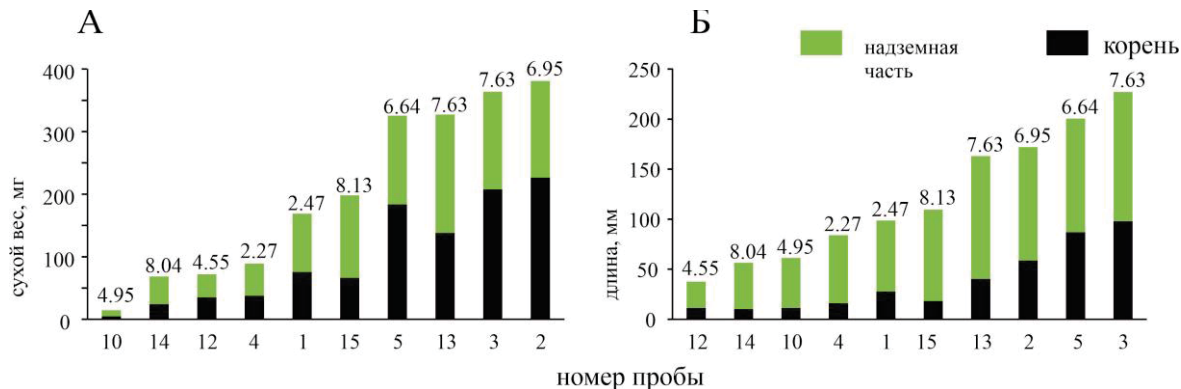
Семена не взошли в пробах с добавлением вещества, дающего ультра-кислую среду ( $\text{pH} < 2$ ) либо высокую минерализацию жидкой фазы. В веществе отходов с диапазоном pH 2–5 (кислая-слабокислая среда) всходы появились, но масса проростков была существенно меньше, чем в веществе с нейтральной-субщелочной средой (pH 6–8), рис 7, А. Проращивание семян овса посевного при наличии нейтрального вещества Талмовских Песков (проба 2) показало самую высокую массу проростков, за ним следуют пробы отходов с хвостохранилища Дюков лог (проба 3) и почва на поверхности карты захоронения Хову-Аксинских отходов (проба 13). Также в этих же пробах длина побегов овса оказалась больше (рис. 7, Б). Для проб с высоким содержанием Cd, Pb, Zn масса и длина корня овса были выше, чем в других случаях.

Снижение негативного действия высоких концентраций Cd в этих случаях, вероятно, обеспечивается

детоксикацией, как путём связывания металла в корневой зоне, в клеточной стенке и иммобилизации в плазмалемме, так и путём хелатирования кадмия в цитозоле клетки и его транспортирования в вакуоль [33]. Кроме этого, кадмий может повышать активность фермента О-ацетил-серинлиазы, который участвует в образовании цистеина, предшественника глутатиона и фитохелатинов – соединений клетки, связывающих тяжелые металлы. Поэтому повышение активности этого фермента при наличии кадмия рассматривается как адаптивный механизм. Что касается свинца, то он пассивно поглощается корнями, образуя в них нерастворимые комплексы, слабо перемещаемые в другие части растения. Подобное влияние Cd и Pb на массу корня кукурузы было обнаружено ранее [34]. В свою очередь, цинк в диапазоне кислотности pH 5–8 ед. наиболее доступен. В растениях цинк находится в двухвалентной форме, в то время как в корнеобитае-

мом слое – в адсорбированном виде: в кислой среде благодаря катионному обмену, в щелочной среде – благодаря хемосорбции, которая зависит от присутствия органических лигандов. Адсорбция цинка ослабляется при рН ниже 7. К этому приводит конкуренция со стороны других ионов. При повышенных рН и воз-

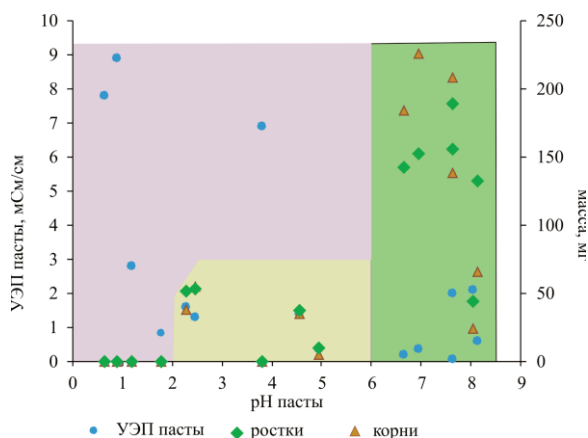
растении в почвенном растворе концентрации органических соединений цинк-органические комплексы вносят свой вклад в растворимость цинк-содержащих фаз. Большинство растительных генотипов и видов обладают высокой степенью приспособляемости к избыточным значениям цинка [35].



**Рис. 7.** Сухой вес ростков и корней овса (А), длина корней и высота ростков овса (Б), выращенного на техногенном веществе

**Fig. 7.** Dry weight of aerial part and roots of oats (A), length of roots and height of aerial part of oats (B) grown on the tailings

Анализ физико-химических параметров техногенного вещества позволил выявить области, соответствующие трём условиям прорастания: 1) полностью непригодные для жизнедеятельности овса (розовая, рис. 8); 2) пригодные, но угнетающие рост (желтая); 3) благоприятные для зарастания овсом и растениями, аналогичными по свойствам (зеленая).



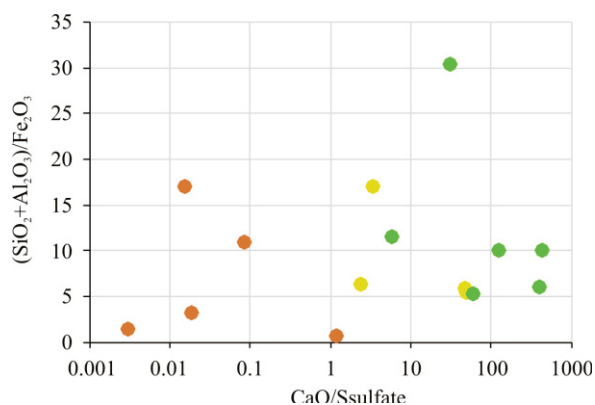
**Рис. 8.** Масса ростков и корней овса в зависимости от физико-химических параметров субстрата

**Fig. 8.** Mass of aerial part and roots of oats depending on the physicochemical parameters of the tailings

На всхожесть не влияет соотношение алюмосиликаты/пирит, основное значение имеет наличие карбонатов и степень окисленности вещества (рис. 9).

В целом в большинстве исследованных проб суммарный вес корней превышает суммарный вес ростков либо схож с ним, максимальная высота ростков больше максимальной длины корня. Наибольшие значения биомассы и морфометрических показателей овса обнаружены в пробах с нейтральной средой

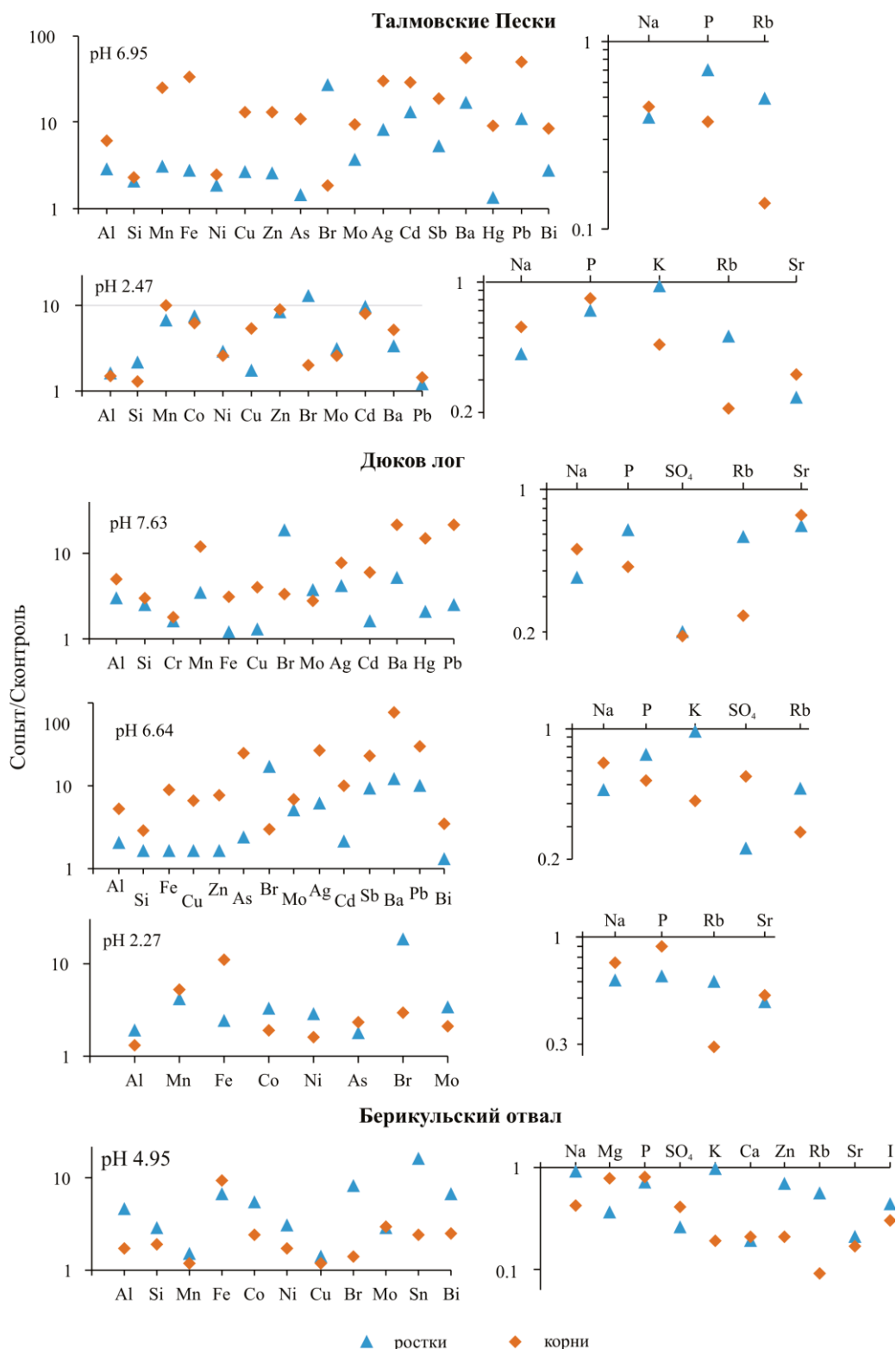
(№ 2, 3, 5, 13). Среднее положение занимают пробы № 1, 4 (кислая среда), 15 (субщелочная), минимальные – в пробах № 10, 12 (кислая среда), 14 (субщелочная).



**Рис. 9.** Зависимость всхожести овса от состава субстрата (красный – не взошли; желтый – угнетенный рост; зеленый – благоприятные условия)

**Fig. 9.** Oat germination depending on the composition of the tailings (red – did not germinate; yellow – growth-inhibiting; green – favorable conditions)

Поступление элементов в растения происходило в соответствии с геохимическими особенностями субстратов – пробами вещества разного состава. Растения, выращенные на отходах полиметаллических руд, накапливали Al, Si, Mn, Fe и характерные металлы, значительная доля которых была представлена водорастворимыми формами: Cu, Zn, Ag, Cd, Pb (рис. 10). При этом наблюдалось обеднение растений некоторыми биогенными элементами: Na, K, P, S, которые, видимо, замещались поступающими из субстратов металлами и металлоидами.

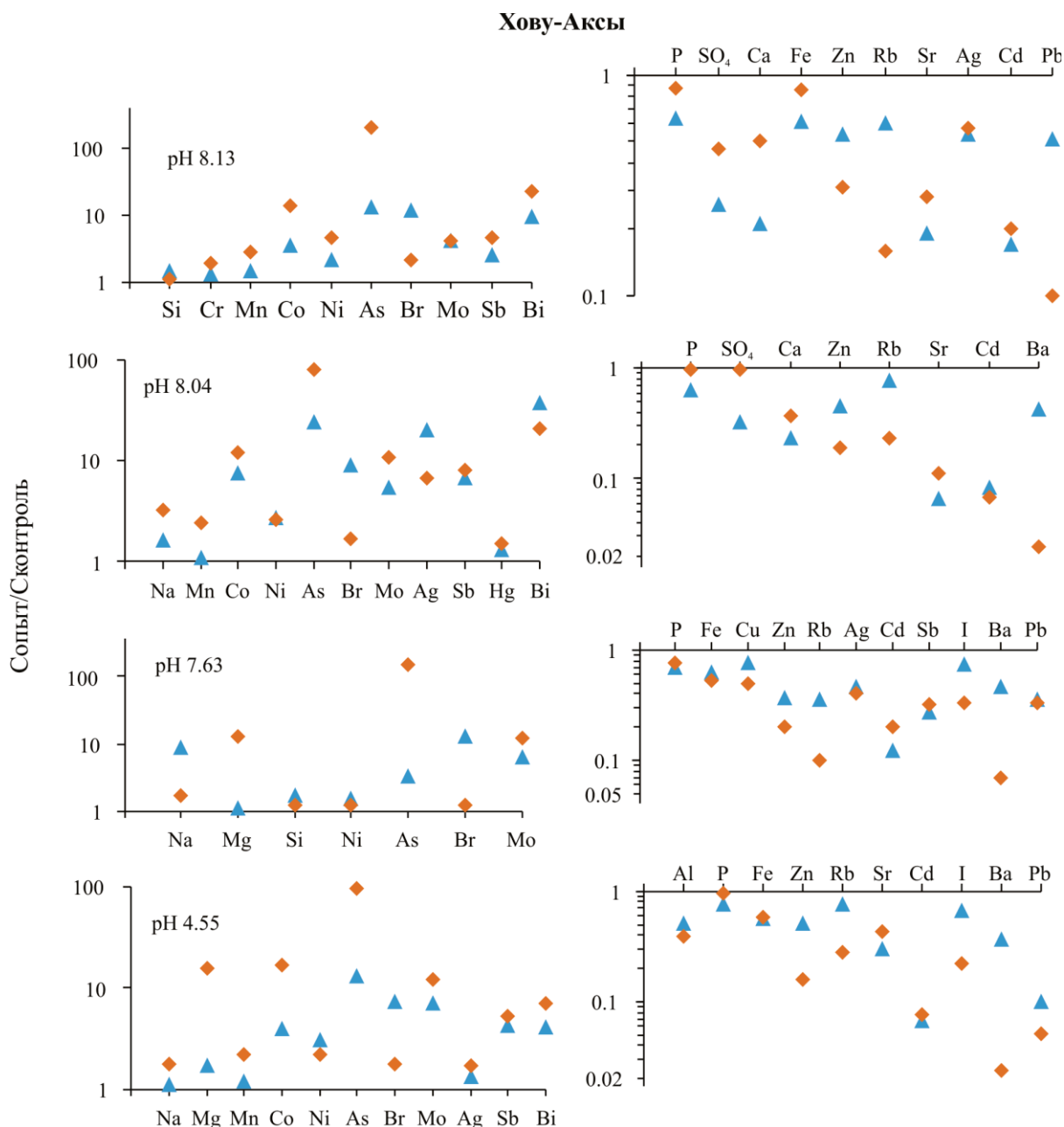


**Рис. 10.** Накопление/обеднение элементов в растениях, выращенных на субстрате отходов сульфидных руд  
**Fig. 10.** Accumulation/depletion of elements in oat grown on the sulfide tailings

На веществе арсенидных Cu-Co-Ni руд (Хову-Аксинские хранилища) в растениях концентрировался главным образом As (повышение его содержания в корнях достигало 200 раз в сравнении с контролем), а также ряд элементов: Co, Ni, Mo, Bi, Na, Mg (рис. 11). Как видим, в данном случае натрий, присутствующий в подвижных формах (2–7 мг/л в водных вытяжках), в

отличие от полиметаллических отходов, активно поступает в растения. Снижение концентраций по сравнению с контролем наблюдается для P, Fe и ряда металлов, содержание которых в Хову-Аксинских отходах существенно ниже, чем в полиметаллических (Бериккульских кеках, Дюковом логу, Талмовских Песках).





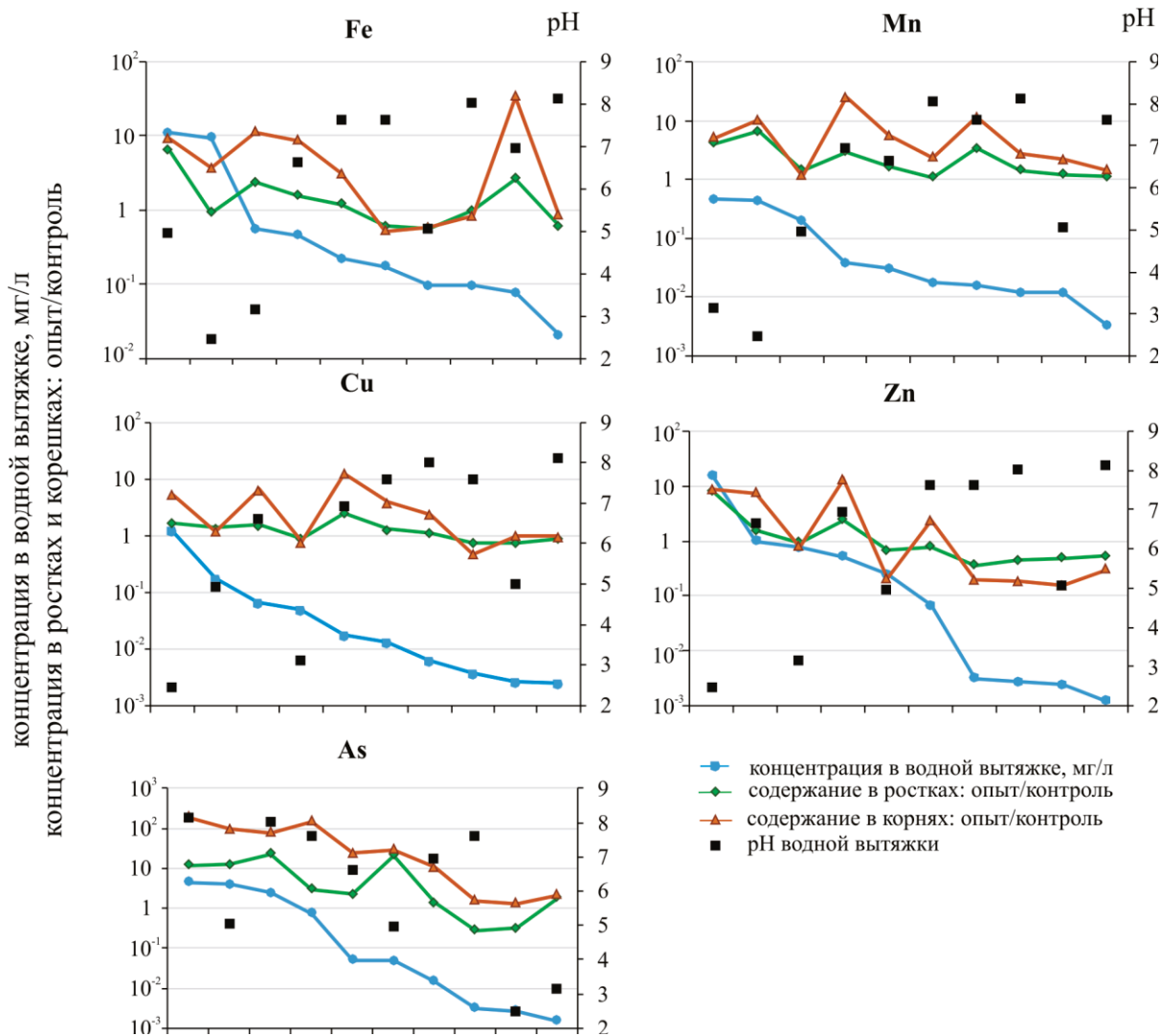
**Рис. 11.** Накопление/обеднение элементов в растениях, выращенных на субстрате отходов арсенидных руд  
**Fig. 11.** Accumulation/depletion of elements in oat grown on the arsenide tailings

В кислой среде при относительно высоких концентрациях металлов (Fe, Mn, Cu, Zn) в жидкой фазе их доля, поглощаемая растениями, была существенно ниже, чем в нейтральной-субщелочной среде (рис. 12). На проникание в растения As кислотность среды не оказывала влияния: его количество как в подземных, так и в надземных частях зависело от содержания растворимых форм.

#### Факторы переноса и транслокации

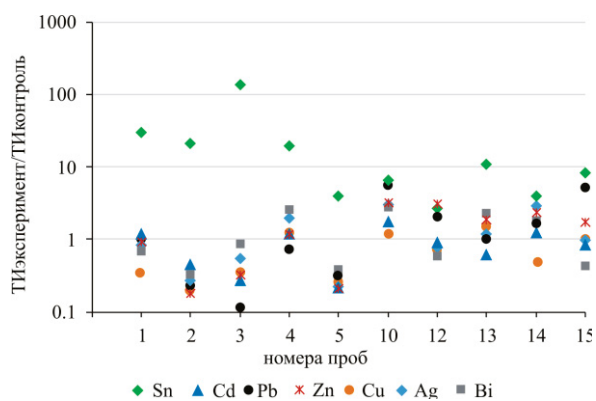
**Транслокационный индекс.** В контрольных образцах ТИ (формула (1)) для обсуждаемых элементов меньше 1 и варьирует в пределах 0,2–0,7, за исключением Mo, который легко проникает в надземную часть, его ТИ=0,89. В экспериментальных пробах для ряда элементов (Sn, Zn, Ni, Mo, Hg) ТИ оказался зна-

чимо выше 1 или близок к этому значению. Наиболее высоки значения ТИ были для Sn, для остальных перечисленных элементов он заметно ниже. Однако в сравнении с ТИ контрольных проб можно увидеть, что проникание многих элементов из техногенных субстратов, кроме вышеперечисленных, в надземные части идет более интенсивно: Ag, Bi, Cd, Co, Cu, Pb, Sb, Si, Al (рис. 13). Следовательно, в некоторых случаях проявляется ослабление корневых механизмов связывания Ni, Zn, Sn, Mo, Au, Hg, что обеспечивает безбарьерный транзит металлов в надземную часть и их накопление в форме внеклеточных металл-связывающих соединений (хелаторов), или запасание в участках, нечувствительных к металлу, например, таких как вакуоли.



**Рис. 12.** Сравнение концентраций элементов в водных вытяжках экспериментальных проб и их содержания в растении (Сопыт/Сконтроль). По оси X – отдельные пробы, расположенные в порядке снижения концентраций элемента в водных вытяжках

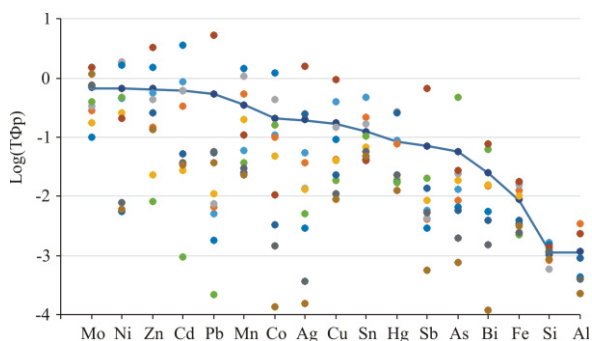
**Fig. 12.** Comparison of the concentrations of elements in water extracts of experimental samples and their content in the plant (Stest/Scontrol). Along the X axis, individual samples arranged in order of decreasing concentrations of the element in water leaching solution



**Рис. 13.** Сравнение ТИ некоторых элементов в экспериментальных растениях с контрольными

**Fig. 13.** Comparison of translocation (TF) values of some elements in experimental oat with control ones

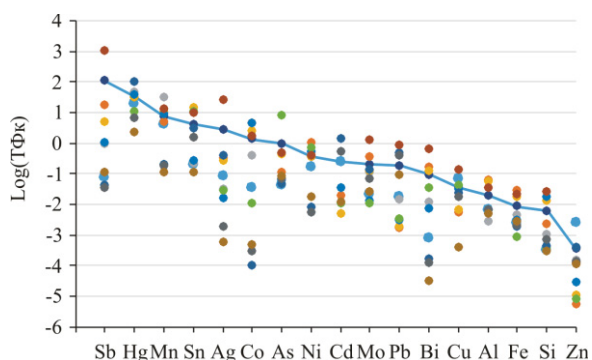
**Транслокационный фактор.** Для надземной части овса посевного минимальные значения ТФ (формула (2)) определены для породообразующих элементов, составляющих основную часть вещества: Fe, Si, Al, максимальные – для металлов Mo, Ni, Zn, Cd, Mn, Co, Ag, Cu (рис. 14). В отдельных пробах ТФ этих элементов достигает значения >1. Металлоиды Sb, As, Bi занимают промежуточную позицию. Отмечается закономерность снижения ТФ в пробах с нейтральной-субщелочной средой по сравнению с кислой-слабокислой. Например, в пробе с рН пасты=2,47 наблюдается активный перенос Cd из корнеобитаемого слоя почвы в растение, что свидетельствует об ослаблении участия корневых хелаторов овса (органических кислот, аминокислот, фенолов и др.) в связывании кадмия, а основную роль в его аккумуляции играют, по-видимому, хелатирующие соединения цитозоля, из которых ионы металла транспортируются в вакуоли.



**Рис. 14.** Значения ТФр элементов в ростках овса. Здесь и далее: кружки разного цвета означают показатель в разных пробах; синяя линия – среднее

**Fig. 14.** Translocation (TF) values of elements for aerial part of oat. Hereinafter: circles of different colors mean the indicator in different samples; blue line – average

Для подземной части овса посевного значения транслокационного фактора (формула (3)) оказались выше, чем для надземных частей. Элементы Sb, Hg, Mn, Sn, Ag, Co в среднем имеют коэффициент больше 1 (рис. 15).

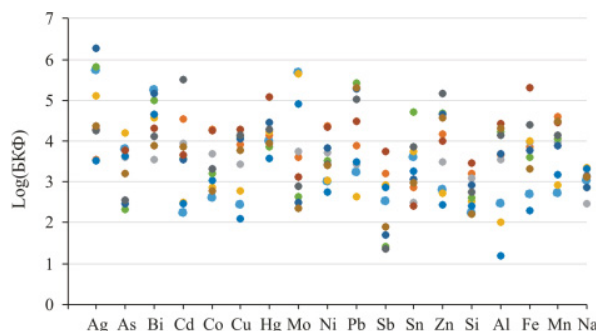


**Рис. 15.** Значения ТФк элементов в корнях овса

**Fig. 15.** Translocation (TF) values of elements for roots of oat

**Биоконцентрационный фактор.** Элементы Ag, Bi, Hg во всех пробах характеризуются значениями БКФ > 1000 (формула (4)), что означает их высокую аккумуляцию из водной фазы вещества с разным составом (рис. 16). Для остальных элементов в некоторых случаях относительно низкие значения БКФ (< 1000), видимо, обусловлены достижением предела их накопления в растениях из минерализованных растворов, как, например, мышьяк в Хову-Аксинских отходах, медь, цинк, алюминий, железо в Талмовских Песках и Берикольском отвале. Только для сурьмы и кремния в большинстве проб БКФ существенно ниже 1000, видимо, эти элементы извлекаются из растворов растениями в небольшой степени. Следует отметить, As, Bi, Hg, Pb, Cd не являются жизненно необходимыми для овса, как и для большинства растений. Высокие значения БКФ – это результат безбарьерного накопления элементов, характерного для фазы проростков, когда нет дифференциации надземных ча-

стей на различные органы [36]. Безбарьерный тип накопления проявляется и в заключительные фазы вегетации, а также в период зимнего покоя, когда оно сопровождается выделением избыточных количеств химических элементов.



**Рис. 16.** Биоконцентрационный фактор элементов в эксперименте

**Fig. 16.** Bioconcentration factor (BCF) of elements for oat

### Выводы

В результате экспериментов по проращиванию овса посевного (*Avena sativa*) на веществе отходов с широким диапазоном кислотности и концентраций химических элементов определены области физико-химических параметров и минерализации жидкой фазы, соответствующие трём условиям прорастания: 1) полностью непригодные для жизнедеятельности овса; 2) пригодные, но угнетающие рост; 3) благоприятные для зарастания овсом.

Экспериментальным путём доказано, что овёс посевной (*Avena sativa*) на ранних стадиях развития проявляет разные механизмы связывания металлов и металлоидов: корневого и цитозольного.

Высокие концентрации Cd в корнеобитаемом слое овса посевного не оказали губительного воздействия на проростки, что обусловлено, по-видимому, присутствием корневых хелаторов.

Транслокационный индекс указывает на то, что многие металлы в эксперименте аккумулировались не в корнях, а в надземных органах, поэтому овёс посевной (*Avena sativa*) можно отнести к видам-накопителям металлов.

Высокие значения БКФ для большинства элементов означают детоксикацию поллютантов с участием растения и позволяют рассматривать овёс посевной в качестве возможного участника фиторемедиации.

На аккумуляцию большинства элементов кислотность среды не оказывала влияния, их накопление в подземных и в надземных частях зависело от содержания их растворимых форм. Для мышьяка и висмута прослеживается повышение их содержания в проростках овса с повышением pH водной вытяжки.

*Работа выполнена в рамках проектов ИНГГ СО РАН № 0266-2022-0028 и ИПА СО РАН № 1210311700316-9 и при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-05-00336).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pilon-Smits E., LeDuc D.L. Phytoremediation of selenium using transgenic plants // *Current Opinion in Biotechnology*. – 2009. – V. 20. – P. 207–212. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19269806/#:~:text=Owing%20to%20the%20similarity%20of,pollution%20and%20as%20fortified%20foods> (дата обращения 15.08.2022).
2. Ecological potential of plants for phytoremediation and ecorestoration of fly ash deposits and mine wastes / G. Gajić, L. Djurdjević, O. Kostić, S. Jarić, M. Mitrović, P. Pavlović // *Frontiers in Environmental Science*. – 2018. – V. 6. – P. 124. URL: [https://www.researchgate.net/publication/328907776\\_Ecological\\_Potential\\_of\\_Plants\\_for\\_Phytoremediation\\_and\\_Ecorestoration\\_of\\_Fly\\_Ash\\_Deposits\\_and\\_Mine\\_Wastes](https://www.researchgate.net/publication/328907776_Ecological_Potential_of_Plants_for_Phytoremediation_and_Ecorestoration_of_Fly_Ash_Deposits_and_Mine_Wastes) (дата обращения 15.08.2022).
3. Raskin I., Smith R.D., Salt D.E. Phytoremediation of metals: using plants to remove pollutants from the environment // *Current Opinion in Biotechnology*. – 1997. – V. 8. – P. 22–26. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958166997801061> (дата обращения 15.08.2022).
4. Ernst W.H. Phytoextraction of mine wastes – options and impossibilities // *Chemie der Erde – Geochemistry*. – 2005. – V. 65. – P. 29–42. URL: [https://www.researchgate.net/publication/223774756\\_Phytoextraction\\_of\\_Mine\\_Wastes\\_-\\_Options\\_and\\_Impossibilities](https://www.researchgate.net/publication/223774756_Phytoextraction_of_Mine_Wastes_-_Options_and_Impossibilities) (дата обращения 15.08.2022).
5. Marques A.P., Rangel A.O., Castro P.M. Remediation of heavy metal contaminated soils: phytoremediation as a potentially promising clean-up technology // *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. – 2009. – V. 39. – P. 622–654. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10643380701798272> (дата обращения 15.08.2022).
6. Emelyanova E.V. Effect of cultivation conditions on the growth of the basidiomycete *Coriolus hirsutus* in a medium with pentose wood hydrolysate // *Process Biochemistry*. – 2005. – V. 40. – № 3–4. – P. 1119–1124. URL: [https://www.researchgate.net/publication/229188403\\_Effects\\_of\\_cultivation\\_conditions\\_on\\_the\\_growth\\_of\\_the\\_basidiomycete\\_Coriolus\\_hirsutus\\_in\\_a\\_medium\\_with\\_pentose\\_wood\\_hydrolysate](https://www.researchgate.net/publication/229188403_Effects_of_cultivation_conditions_on_the_growth_of_the_basidiomycete_Coriolus_hirsutus_in_a_medium_with_pentose_wood_hydrolysate) (дата обращения 15.08.2022).
7. Душенков В., Раскин И. Фиторемедиация – зеленая революция в экологии // *Химия и Жизнь* 21 век. – 1999. – № 11–12. – P. 48–49. URL: <http://www.chem.msu.ru/rus/journals/chemlife/fito.html> (дата обращения 15.08.2022).
8. Rai P.K. Heavy metals/metalloids remediation from wastewater using free floating macrophytes of a natural wetland // *Environmental Technology & Innovation*. – 2019. – V. 15. – P. 100393. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352186418306151> (дата обращения 15.08.2022).
9. Meagher R.B. Phytoremediation of toxic elemental and organic pollutants // *Current Opinion in Plant Biology*. – 2000. – V. 3. – P. 153–162. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10712958/> (дата обращения 15.08.2022).
10. A global database for plants that hyperaccumulate metal and metalloids trace elements / R.D. Reeves, A.J. Baker, T. Jaffré, P.D. Erskine, G. Echevarria, A. van der Ent // *New Phytologist*. – 2018. – V. 218. – № 2. – P. 407–411. URL: <https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/nph.14907> (дата обращения 15.08.2022).
11. Ali H., Khan E., Sajad M.A. Phytoremediation of heavy metals-concepts and applications // *Chemosphere*. – 2013. – V. 91. – P. 869–881. URL: [https://www.researchgate.net/publication/235880244\\_Phytoremediation\\_of\\_heavy\\_metals-Concepts\\_and\\_applications](https://www.researchgate.net/publication/235880244_Phytoremediation_of_heavy_metals-Concepts_and_applications) (дата обращения 15.08.2022).
12. Heavy metal pollutions: state of the art and innovation in phytoremediation / G. DalCorso, E. Fasani, A. Manara, G. Visioli, A. Furini // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2019. – V. 20. – P. 3412. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6679171/> (дата обращения 15.08.2022).
13. Aken B.V., Correa P.A., Schnoor J.L. Phytoremediation of polychlorinated biphenyls: new trends and promises // *Environmental Science & Technology*. – 2009. – V. 44. – P. 2767–2776. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3025541/> (дата обращения 15.08.2022).
14. Wuana R.A., Okieimen F.E. Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation // *Isrn Ecology*. – 2011. – P. 402647. URL: <https://www.hindawi.com/journals/isrn/2011/402647/> (дата обращения 15.08.2022).
15. Biological approaches to tackle heavy metal pollution: a survey of literature / J.M. Jacob, C. Karthik, R.G. Saratale, S.S. Kumar, D. Prabakar, K. Kadirvelu // *The Journal of Environmental Management*. – 2018. – V. 217. – P. 56–70. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29597108/> (дата обращения 15.08.2022).
16. Rhizoremediation potential of spontaneous grown *Typha latifolia* on fly ash basins: study from the field / V.C. Pandey, N. Singh, R.P. Singh, D.P. Singh // *Ecological Engineering*. – 2014. – V. 71. – P. 722–727.
17. Gajic G., Pavlović P. The role of vascular plants in the «phytoremediation of fly ash deposits» // *Phytoremediation: Methods, Management and Assessment* / ed. by V. Matichekov. – New York, NY: Nova Science Publishers, Inc., 2018. – P. 151–236.
18. Study of uptake of Pb and Cd by three nutritionally important Indian vegetables grown in artificially contaminated soils of Mumbai, India / S.S. Rangnekar, S.K. Sahu, G.G. Pandit, V.B. Gaikwad // *International Research Journal of Environmental Sciences*. – 2013. – V. 2. – P. 1–5. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Study-of-Uptake-of-Pb-and-Cd-by-Three-Nutritionally-Rangnekar-Pandit/00f69bb62d87e01a814a49822654aeb043558bde> (дата обращения 15.08.2022).
19. Accumulation and translocation of nickel and cobalt in nutritionally important Indian vegetables grown in artificially contaminated soil of Mumbai, India // S.S. Rangnekar, S.K. Sahu, G.G. Pandit, V.B. Gaikwad // *Research Journal of Agricultural and Forest Sciences*. – 2013. – V. 1. – P. 15–21. URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.1078.3247&rep=rep1&type=pdf> (дата обращения 15.08.2022).
20. Lazareva E.V. Peculiarities of mineral association in oxidized zone of polystage Salair deposit (Pb-Zn-Cu-Au-Ag) (West Siberia) // *Abstracts I CAM'96*. – Warsaw, Poland, 1996. – P. 162.
21. Mineralogical forms of precious metals in oxidized ores of the Salair mine, West Siberia, and their importance in the metallurgical treatment / S.B. Bortnikova, A.A. Airijants, E.V. Lasareva, S.B. Karlova // *Process Mineralogy XIII: Applications to Beneficiation Problems, Pyrometallurgical Products, Advanced Mineralogical Techniques and Other Industrial Problems*. – Rolla: Missouri, 1995. – P. 213–223.
22. Бортникова С.Б., Гаськова О.Л., Айрияц А.А. Техногенные озера. – Новосибирск: Академ. Изд-во «Гео», 2003. – 120 с. URL: [https://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o\\_60747](https://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_60747) (дата обращения 15.08.2022).
23. Mechanisms of low-temperature vapor-gas streams formation from sulfide mine waste / S. Bortnikova, N. Yurkevich, A. Devyatova, O. Saeva, O. Shuvaeva, A. Makas, M. Troshkov, N. Abrosimova, M. Kirillov, T. Korneeva, N. Kremleva, N. Fefilov, G. Shigabaeva // *Science of the Total Environment*. – 2019. – V. 647. – P. 411–419. URL: [https://www.researchgate.net/publication/326807664\\_Mechanisms\\_of\\_low-temperature\\_vapor-gas\\_streams\\_formation\\_from\\_sulfide\\_mine\\_waste](https://www.researchgate.net/publication/326807664_Mechanisms_of_low-temperature_vapor-gas_streams_formation_from_sulfide_mine_waste) (дата обращения 15.08.2022).
24. Лебедев В.И. Хову-Аксынское месторождение арсенидных кобальтовых руд (Республика Тыва, Россия): новые взгляды на проблему возобновления добычи и переработки // *Геология рудных месторождений*. – 2021. – Т. 63. – № 3. – С. 236–264. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46120198> (дата обращения 15.08.2022).
25. Field and laboratory methods applicable to overburden and mine soils, US EPA 600/2-78-054 / A.A. Sobek, W.A. Schuller, J.R. Freeman, R.M. Smith. – 1978. URL: <https://nepis.epa.gov/Exec/QueryNET.exe/91017FGB.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=1976+Thru+1980&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5Czfiles%5CIndex%20Data%5C76thru80%5CTxt%5C00000025%5C91017FGB.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C-&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpfr&DefSeek>

- Page=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&SeekPage=x&ZyPURL (дата обращения 15.08.2022).
26. Transfer of heavy metals from soils to vegetables and associated human health risks at selected sites in Pakistan / U. Rehman, S. Khan, M.T. Shah, M.L. Brusseau, S.A. Khan, J. Mainhagu // *Pedosphere*. – 2018. – V. 28. – № 4. – P. 666–679. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6527332/> (дата обращения 15.08.2022).
  27. Bioaccumulation and translocation efficacy of heavy metals by *Rhizophora mucronata* from tropical mangrove ecosystem, Southeast coast of India / A. Ganeshkumar, G. Arun, S. Vinothkumar, R. Rajaram // *Ecology & Hydrobiology*. – 2019. – V. 19. – № 1. – P. 66–74. URL: [https://www.researchgate.net/publication/328835165\\_Bioaccumulation\\_and\\_translocation\\_efficiency\\_of\\_heavy\\_metals\\_by\\_Rhizophora\\_mucronata\\_from\\_tropical\\_mangrove\\_ecosystem\\_Southeast\\_coast\\_of\\_India](https://www.researchgate.net/publication/328835165_Bioaccumulation_and_translocation_efficiency_of_heavy_metals_by_Rhizophora_mucronata_from_tropical_mangrove_ecosystem_Southeast_coast_of_India) (дата обращения 15.08.2022).
  28. Trace metals in soil and leaves of *Jacaranda mimosifolia* in Tshwane area / J.O. Olowoyo, E. Van Heerden, J.L. Fischer, C. Baker // *South Africa Atmospheric Environment*. – 2010. – V. 44. – P. 1826–1830. URL: [https://www.researchgate.net/publication/229421613\\_Trace\\_metals\\_in\\_soil\\_and\\_leaves\\_of\\_Jacaranda\\_mimosifolia\\_in\\_Tshwane\\_area\\_South\\_Africa](https://www.researchgate.net/publication/229421613_Trace_metals_in_soil_and_leaves_of_Jacaranda_mimosifolia_in_Tshwane_area_South_Africa) (дата обращения 15.08.2022).
  29. Chandra R., Yadav S., Yadav S. Phytoextraction potential of heavy metals by native wetland plants growing on chlorolignin containing sludge of pulp and paper industry // *Journal of Ecological Engineering*. – 2017. – V. 98. – P. 134–145. URL: [https://www.researchgate.net/publication/309545962\\_Phytoextraction\\_potential\\_of\\_heavy\\_metals\\_by\\_native\\_wetland\\_plants\\_growing\\_on\\_chlorolignin\\_containing\\_sludge\\_of\\_pulp\\_and\\_paper\\_industry](https://www.researchgate.net/publication/309545962_Phytoextraction_potential_of_heavy_metals_by_native_wetland_plants_growing_on_chlorolignin_containing_sludge_of_pulp_and_paper_industry) (дата обращения 15.08.2022).
  30. Effects of compost and technosol amendments on metal concentrations in a mine soil planted with *Brassica Juncea* / L.R. Forján, A. Rodríguez-Vila, B. Cerqueira, E.F. Covelo // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2018. – V. 25. – P. 19713–19727. URL: [https://www.researchgate.net/publication/325003592\\_Effects\\_of\\_compost\\_and\\_technosol\\_amendments\\_on\\_metal\\_concentrations\\_in\\_a\\_mine\\_soil\\_planted\\_with\\_Brassica\\_juncea](https://www.researchgate.net/publication/325003592_Effects_of_compost_and_technosol_amendments_on_metal_concentrations_in_a_mine_soil_planted_with_Brassica_juncea) (дата обращения 15.08.2022).
  31. Alleviation of cadmium (Cd) toxicity and minimizing its uptake in wheat (*Triticum aestivum*) by using organic carbon sources in Cd-spiked soil / M.Z. Rehman, M. Rizwan, A. Hussain, M. Saqib, S. Ali, M.I. Sohail // *Environmental Pollution*. – 2018. – V. 241. – P. 557–565. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29885626/> (дата обращения 15.08.2022).
  32. Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site / J. Yoon, X. Cao, Q. Zhou, L.Q. Ma // *Science of the total environment*. – 2006. – V. 368. – № (2–3). – P. 456–464. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16600337/> (дата обращения 15.08.2022).
  33. Титов А.Ф., Казнина Н.М., Таланова В.В. Устойчивость растений к кадмию (на примере семейства злаков). – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2012. – 55 с. URL: <http://elibrary.krc.karelia.ru/394/> (дата обращения 15.08.2022).
  34. Accumulation of Pb and Cd and its effect on Ca distribution in maize seedlings (*Zea mays* L.) / E. Małkowski, R. Kurtyka, A. Kita, W. Karcz // *Polish Journal of Environmental Studies*. – 2005. – V. 14. – № 2. – P. 203. URL: <http://www.pjoes.com/Accumulation-of-Pb-and-Cd-and-its-Effect-on-Ca-Distribution-in-Maize-Seedlings-Zea,87749,0,2.html> (дата обращения 15.08.2022).
  35. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях / Перевод с английского. – М.: Мир, 1989. – 439 с. URL: [https://www.studmed.ru/kabata-pendias-a-pendias-x-mikroelementy-v-pochvah-i-rasteniyah\\_44c0b3dae34.html](https://www.studmed.ru/kabata-pendias-a-pendias-x-mikroelementy-v-pochvah-i-rasteniyah_44c0b3dae34.html) (дата обращения 15.08.2022).
  36. Ковалевский А.Л. Биогеохимия растений. – Новосибирск: Наука, 1991. – 294 с. URL: <https://www.biosoil.ru/files/publications/00015321.pdf> (дата обращения 15.08.2022).

Поступила 05.09.2022 г.

Прошла рецензирование 27.09.2022 г.

#### Информация об авторах

**Бортникова С.Б.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующая лабораторией геоэлектрoхимии, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

**Артамонова В.С.**, доктор биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт почвоведения и агрохимии СО РАН.

**Абросимова Н.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

**Юркевич Н.В.**, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

**Хвощевская А.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, заведующая лабораторией гидрогеохимии Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 550.47:550.73

## RESULTS OF PHYTOREMEDIATION EXPERIMENTS WITH SOWING OATS (*AVENA SATIVA*) ON DIFFERENT TYPES OF MINE TAILINGS

**Svetlana B. Bortnikova**<sup>1</sup>,  
BortnikovaSB@ipgg.sbras.ru

**Valentina S. Artamonova**<sup>2</sup>,  
artamonovavs@yandex.ru; artamonova@issa-siberia.ru

**Natalya A. Abrosimova**<sup>1</sup>,  
AbrosimovaSB@ipgg.sbras.ru

**Nataliya V. Yurkevich**<sup>1</sup>,  
YurkevichNV@ipgg.sbras.ru

**Albina A. Khvachevskaya**<sup>3</sup>,  
unpc\_voda@mail.ru

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

<sup>2</sup> Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 8/2, Lavrentyev avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

<sup>3</sup> National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance.** The increase in concentrations of metals and metalloids in terrestrial ecosystems as a result of the activities of the mining and metallurgical industries is a serious problem for the environment – it leads to the accumulation of elements in soils, wild and agricultural plants and accompanies the pollution of food chains.

**The main aim** of this study is to determine and evaluate the phytoremediation ability of oats *Avena sativa* to accumulate metals and metalloids from tailings with different physicochemical parameters.

**Objects** of the study are the material of tailings (Dyukov Log, Talmovskiy Sands, Khovu-Aksy) and waste heaps (Ursk, Beloklyuch, Berikul).

**Methods.** Root and shoot samples were analyzed for the content of a wide range of elements by ICP-MS on a NexION 300D mass spectrometer (PerkinElmer, USA) (PNL «Voda» GGC ISHPR TPU). The selection of solid samples was carried out in accordance with generally accepted methods. The solid samples were analyzed for the content of oxides of the silicate group by XRF on an X-ray fluorescence spectrometer ARL-9900-XP (Thermo Electron Corporation) at the Laboratory of X-ray Spectral Analysis Methods of the Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; analysis of trace elements concentration was carried out by ICP-MS on an ELAN-9000 DRC-e instrument, Perkin Elmer, USA (HAC Plasma).

**Results.** Experiments were carried out with the germination of seeds of a monocotyledonous plant – oats (*Avena sativa*) on the substrates of tailings located in Western Siberia and the Republic of Tuva. This plant belongs to the list of hosted tests of phytotoxicity and green manure, but its development on the presented technogenic objects has not been studied before. It is shown for the first time that on average, the concentration of metals and metalloids in oat seedlings exceeded the concentration of these elements in all samples compared to the control. The effect of acidity/alkalinity of tailings on the extraction of elements by plants was evaluated. It was shown that oat seeds did not germinate in samples with the addition of a substance that gives an acidic environment (pH<2) or high mineralization of the liquid phase. In the tailings with a pH range of 2–5 (acidic and slightly acidic environments), the seeds germinated, but the mass of seedlings was significantly less than in the material with a neutral-subalkaline environment (pH 6–8). Germination is not affected by the ratio of aluminosilicates minerals/pyrite, the main is the presence of carbonates and the degree of oxidation. In an acidic medium, at relatively high concentrations of metals (Fe, Mn, Cu, Zn) in the liquid phase, their proportion absorbed by plants was significantly lower than in a neutral subalkaline medium. The acidity of the environment did not affect the accumulation of most elements, their accumulation in the underground and above-ground parts depended on the content of their soluble forms. For arsenic and Bi, there is an increase in their content in oat seedlings with an increase in the pH of the aqueous extract. The influence of high concentrations of elements in the plant nutrition environment is ambiguous. For example, for a substance with a high content of mobile forms of Cd, Pb, Zn, the biomass and root length of oat seedlings were higher than for oats grown on another substance. The translocation index indicates that the accumulation of most metals and metalloids is higher in the roots than in the aerial parts of oats.

### Key words:

Tailings, metals and metalloids, mobile forms of elements, phytoremediation, oats (*Avena sativa*).

The work was carried out within the framework of projects no. 0266-2022-0028 of the IPGG SB RAS, no. 1210311700316-9 of the IPA SB RAS and with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (grant no. 20-05-00336).

## REFERENES

- Pilon-Smiths E., LeDuc D.L. Phytoremediation of selenium using transgenic plants. *Current Opinion in Biotechnology*, 2009, vol. 20, pp. 207–212. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19269806/#:~:text=Owing%20to%20the%20similarity%20of,pollution%20and%20as%20fortified%20foods> (accessed 15 August 2022).
- Gajić G., Djurdjević L., Kostić O., Jarić S., Mitrović M., Pavlović P. Ecological potential of plants for phytoremediation and ecorestoration of fly ash deposits and mine wastes. *Frontiers in Environmental Science*, 2018, vol. 6, pp. 124. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/328907776\\_Ecological\\_Potential\\_of\\_Plants\\_for\\_Phytoremediation\\_and\\_Ecorestoration\\_of\\_Fly\\_Ash\\_Deposits\\_and\\_Mine\\_Wastes](https://www.researchgate.net/publication/328907776_Ecological_Potential_of_Plants_for_Phytoremediation_and_Ecorestoration_of_Fly_Ash_Deposits_and_Mine_Wastes) (accessed 15 August 2022).
- Raskin I., Smith R.D., Salt D.E. Phytoremediation of metals: using plants to remove pollutants from the environment. *Current Opinion in Biotechnology*, 1997, vol. 8, pp. 22–26. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958166997801061> (accessed 15 August 2022).
- Ernst W.H. Phytoextraction of mine wastes—options and impossibilities. *Chemie der Erde – Geochemistry*, 2005, vol. 65, pp. 29–42. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/223774756\\_Phytoextraction\\_of\\_Mine\\_Wastes\\_-\\_Options\\_and\\_Impossibilities](https://www.researchgate.net/publication/223774756_Phytoextraction_of_Mine_Wastes_-_Options_and_Impossibilities) (accessed 15 August 2022).
- Marques A.P., Rangel A.O., Castro P.M. Remediation of heavy metal contaminated soils: phytoremediation as a potentially promising clean-up technology. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2009, vol. 39, pp. 622–654. Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10643380701798272> (accessed 15 August 2022).
- Emelyanova E.V. Effect of cultivation conditions on the growth of the basidiomycete *Coriolus hirsutus* in a medium with pentose wood hydrolysate. *Process Biochemistry*, 2005, vol. 40, no. 3–4, pp. 1119–1124. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/229188403\\_Effects\\_of\\_cultivation\\_conditions\\_on\\_the\\_growth\\_of\\_the\\_basidiomycete\\_Coriolus\\_hirsutus\\_in\\_a\\_medium\\_with\\_pentose\\_wood\\_hydrolyzate](https://www.researchgate.net/publication/229188403_Effects_of_cultivation_conditions_on_the_growth_of_the_basidiomycete_Coriolus_hirsutus_in_a_medium_with_pentose_wood_hydrolyzate) (accessed 15 August 2022).
- Dushenkov V., Raskin I. Fitoremediatsiya – zelenaya revolyutsiya v ekologii [Phytoremediation – green revolution in ecology]. *Chemistry and Life 21st century*, 1999, no. 11–12, pp. 48–49. Available at: <http://www.chem.msu.ru/rus/journals/chemlife/fito.html> (accessed 15 August 2022).
- Rai P.K. Heavy metals/metalloids remediation from wastewater using free floating macrophytes of a natural wetland. *Environmental Technology & Innovation*, 2019, vol. 15, pp. 100393. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352186418306151> (accessed 15 August 2022).
- Meagher R.B. Phytoremediation of toxic elemental and organic pollutants. *Current Opinion in Plant Biology*, 2000, vol. 3, pp. 153–162. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10712958/> (accessed 15 August 2022).
- Reeves R.D., Baker A.J., Jaffré T., Erskine P.D., Echevarria G., Van der Ent A. A global database for plants that hyperaccumulate metal and metalloid trace elements. *New Phytologist*, 2018, vol. 218, no. 2, pp. 407–411. Available at: <https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/nph.14907> (accessed 15 August 2022).
- Ali H., Khan E., Sajad M.A. Phytoremediation of heavy metals—concepts and applications. *Chemosphere*, 2013, vol. 91, pp. 869–881. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/235880244\\_Phytoremediation\\_of\\_heavy\\_metals-Concepts\\_and\\_applications](https://www.researchgate.net/publication/235880244_Phytoremediation_of_heavy_metals-Concepts_and_applications) (accessed 15 August 2022).
- DalCorso G., Fasani E., Manara A., Visioli G., Furini A. Heavy metal pollutions: state of the art and innovation in phytoremediation. *International Journal of Molecular Sciences*, 2019, vol. 20, pp. 3412. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6679171/> (accessed 15 August 2022).
- Aken B.V., Correa P.A., Schnoor J.L. Phytoremediation of polychlorinated biphenyls: new trends and promises. *Environmental Science & Technology*, 2009, vol. 44, pp. 2767–2776. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3025541/> (accessed 15 August 2022).
- Wuana R.A., Okieimen F.E. Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. *Isrn Ecology*, 2011, pp. 402647. Available at: <https://www.hindawi.com/journals/isrn/2011/402647/> (accessed 15 August 2022).
- Jacob J.M., Karthik C., Saratale R.G., Kumar S.S., Prabakar D., Kadirvelu K. Biological approaches to tackle heavy metal pollution: a survey of literature. *The Journal of Environmental Management*, 2018, vol. 217, pp. 56–70. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29597108/> (accessed 15 August 2022).
- Pandey V.C., Singh N., Singh R.P., Singh D.P. Rhizoremediation potential of spontaneous grown *Typha latifolia* on fly ash basins: study from the field. *Ecological Engineering*, 2014, vol. 71, pp. 722–727.
- Gajić G., Pavlović P. The role of vascular plants in the «phytoremediation of fly ash deposits». *Phytoremediation: Methods, Management and Assessment*. Ed. by V. Matichekov. New York, NY, Nova Science Publishers, Inc., 2018. pp. 151–236.
- Rangnekar S.S., Sahu S.K., Pandit G.G., Gaikwad V.B. Study of uptake of Pb and Cd by three nutritionally important Indian vegetables grown in artificially contaminated soils of Mumbai, India. *International Research Journal of Environmental Sciences*, 2013, vol. 2, pp. 1–5. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Study-of-Uptake-of-Pb-and-Cd-by-Three-Nutritionally-Rangnekar-Pandit/00f69bb62d87e01a814a4922654aeb043558bde> (accessed 15 August 2022).
- Rangnekar S.S., Sahu S.K., Pandit G.G., Gaikwad V.B. Accumulation and translocation of nickel and cobalt in nutritionally important Indian vegetables grown in artificially contaminated soil of Mumbai, India. *Research Journal of Agricultural and Forest Sciences*, 2013, vol. 1, pp. 15–21. Available at: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.1078.3247&rep=rep1&type=pdf> (accessed 15 August 2022).
- Lazareva E.V. Peculiarities of mineral association in oxidized zone of polystage Salair deposit (Pb-Zn-Cu-Au-Ag) (West Siberia). *Abstracts I CAM'96*. Warsaw, Poland, 1996. pp. 162.
- Bortnikova S.B., Airijants A.A., Lasareva E. V., Karlova S.B. Mineralogical forms of precious metals in oxidized ores of the Salair mine, West Siberia, and their importance in the metallurgical treatment. *Process Mineralogy XIII: Applications to Beneficiation Problems, Pyrometallurgical Products, Advanced Mineralogical Techniques and Other Industrial Problems*. Rolla, Missouri, 1995. pp. 213–223.
- Bortnikova S.B., Gaskova O.L., Ayriyants A.A. *Tekhnogennye ozera* [Technogenic lakes]. Novosibirsk, Geo Academ. Publ. house, 2003. 120 p. Available at: [https://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o\\_60747](https://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_60747) (accessed 15 August 2022).
- Bortnikova S., Yurkevich N., Devyatova A., Saeva O., Shuvaeva O., Makas A., Troshkov M., Abrosimova N., Kirillov M., Korneeva T., Kremleva T., Fefilov N., Shigabaeva G. Mechanisms of low-temperature vapor-gas streams formation from sulfide mine waste. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 647, pp. 411–419. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/326807664\\_Mechanisms\\_of\\_low-temperature\\_vapor-gas\\_streams\\_formation\\_from\\_sulfide\\_mine\\_waste](https://www.researchgate.net/publication/326807664_Mechanisms_of_low-temperature_vapor-gas_streams_formation_from_sulfide_mine_waste) (accessed 15 August 2022).
- Lebedev V.I. Khovu-Aksynskoe mestorozhdenie arsenidnykh kobaltovykh rud (Respublika Tyva, Rossiya): novye vzglyady na problem vozobnovleniya dobychi i pererabotki [Khovu-Aksy deposit of arsenide cobalt ores (Tuva Republic, Russia): new views on the problem of renewal of mining and processing]. *Geology of Ore Deposits*, 2021, vol. 63, no. 3, pp. 236–264. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46120198> (accessed 15 August 2022).
- Sobek A.A., Schuller W.A., Freeman J.R., Smith R.M. *Field and laboratory methods applicable to overburden and mine soils*, US EPA 600/2-78-054. Available at: <https://nepis.epa.gov/Exec/Query/ZyNET.exe/91017FGB.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EP&Index=1976+Thru+1980&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5Czyfiles%5CInd ex%20Data%5C76thru80%5CTxt%5C00000025%5C91017FGB.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%67C-&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&SeekPage=x&ZyPURL> (accessed 15 August 2022).
- Rehman U., Khan S., Shah M.T., Brusseau M.L., Khan S.A., Mainhagu J. Transfer of heavy metals from soils to vegetables and

- associated human health risks at selected sites in Pakistan. *Pe-dosphere*, 2018, vol. 28, no. 4, pp. 666–679. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6527332/> (accessed 15 August 2022).
27. Ganeshkumar A., Arun G., Vinothkumar S., Rajaram R. Bioaccumulation and translocation efficacy of heavy metals by *Rhizophora mucronata* from tropical mangrove ecosystem, Southeast coast of India. *Ecology & Hydrobiology*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 66–74. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/328835165\\_Bioaccumulation\\_and\\_translocation\\_efficacy\\_of\\_heavy\\_metals\\_by\\_Rhizophora\\_mucronata\\_from\\_tropical\\_mangrove\\_ecosystem\\_Southeast\\_coast\\_of\\_India](https://www.researchgate.net/publication/328835165_Bioaccumulation_and_translocation_efficacy_of_heavy_metals_by_Rhizophora_mucronata_from_tropical_mangrove_ecosystem_Southeast_coast_of_India) (accessed 15 August 2022).
  28. Olowoyo J.O., Van Heerden E., Fischer J.L., Baker C. Trace metals in soil and leaves of *Jacaranda mimosifolia* in Tshwane area. *South Africa Atmospheric Environment*, 2010, vol. 44, pp. 1826–1830. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/229421613\\_Trace\\_metals\\_in\\_soil\\_and\\_leaves\\_of\\_Jacaranda\\_mimosifolia\\_in\\_Tshwane\\_area\\_South\\_Africa](https://www.researchgate.net/publication/229421613_Trace_metals_in_soil_and_leaves_of_Jacaranda_mimosifolia_in_Tshwane_area_South_Africa) (accessed 15 August 2022).
  29. Chandra R., Yadav S., Yadav S. Phytoextraction potential of heavy metals by native wetland plants growing on chlorolignin containing sludge of pulp and paper industry. *Journal of Ecological Engineering*, 2017, vol. 98, pp. 134–145. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/309545962\\_Phytoextract\\_potential\\_of\\_heavy\\_metals\\_by\\_native\\_wetland\\_plants\\_growing\\_on\\_chlorolignin\\_containing\\_sludge\\_of\\_pulp\\_and\\_paper\\_industry](https://www.researchgate.net/publication/309545962_Phytoextract_potential_of_heavy_metals_by_native_wetland_plants_growing_on_chlorolignin_containing_sludge_of_pulp_and_paper_industry) (accessed 15 August 2022).
  30. Forján L.R., Rodríguez-Vila A., Cerqueira B., Covelo E.F. Effects of compost and technosol amendments on metal concentrations in a mine soil planted with *Brassica juncea*. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, vol. 25, pp. 19713–19727. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/325003592\\_Effects\\_of\\_compost\\_and\\_technosol\\_amendments\\_on\\_metal\\_concentrations\\_in\\_a\\_mine\\_soil\\_planted\\_with\\_Brassica\\_juncea\\_L](https://www.researchgate.net/publication/325003592_Effects_of_compost_and_technosol_amendments_on_metal_concentrations_in_a_mine_soil_planted_with_Brassica_juncea_L) (accessed 15 August 2022).
  31. Rehman M.Z., Rizwan M., Hussain A., Saqib M., Ali S., Sohail M.I. Alleviation of cadmium (Cd) toxicity and minimizing its uptake in wheat (*Triticum aestivum*) by using organic carbon sources in Cd-spiked soil. *Environmental Pollution*, 2018, vol. 241, pp. 557–565. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29885626/> (accessed 15 August 2022).
  32. Yoon J., Cao X., Zhou Q., Ma L.Q. Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. *Science of the total environment*, 2006, vol. 368, no. (2–3), pp. 456–464. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16600337/> (accessed 15 August 2022).
  33. Titov A.F., Kaznina N.M., Talanova V.V. *Ustoychivost rasteny k kadmiyu (na primere semeystva zlakov)* [Plant resistance to cadmium (on the example of the cereal family)]. Petrozavodsk, Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences Publ., 2012. 55 p. Available at: <http://elibrary.krc.karelia.ru/394/> (accessed 15 August 2022).
  34. Malkowski E., Kurtyka R., Kita A., Karcz W. Accumulation of Pb and Cd and its effect on Ca distribution in maize seedlings (*Zea mays L.*). *Polish Journal of Environmental Studies*, 2005, vol. 1, no. 2, pp. 203. Available at: <http://www.pjoes.com/Accumulation-of-Pb-and-Cd-and-its-Effect-on-Ca-Distribution-in-Maize-Seedlings-Zea.87749,0,2.html> (accessed 15 August 2022).
  35. Kabata-Pendias A., Pendias H. *Mikroelementy v pochvakh i rasteniyakh* [Trace elements in soils and plants]. Translated from English. Moscow, Mir Publ., 1989. 439 p. Available at: [https://www.studmed.ru/kabata-pendias-a-pendias-x-mikroelementy-v-pochvah-i-rasteniyah\\_44c0b3dae34.html](https://www.studmed.ru/kabata-pendias-a-pendias-x-mikroelementy-v-pochvah-i-rasteniyah_44c0b3dae34.html) (accessed 15 August 2022).
  36. Kovalevsky A.L. *Biogeokhimiya rasteny* [Biogeochemistry of plants]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1991. 294 p. Available at: <https://www.biosoil.ru/files/publications/00015321.pdf> (accessed 15 August 2022).

Received: 5 September 2022.

Reviewed: 27 September 2022.

#### Information about the authors

**Svetlana B. Bortnikova**, Dr. Sc., professor, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

**Valentina S. Artamonova**, Dr. Sc., associate professor, leading researcher, Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

**Natalya A. Abrosimova**, Cand. Sc., researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

**Nataliya V. Yurkevich**, Cand. Sc., leading researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

**Albina A. Khvachevskaya**, Cand. Sc., associate professor, head of the laboratory, National Research Tomsk Polytechnic University.



УДК 544.576: 546.62: 544.038: 54-145.15: 546.62'226

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ СИНТЕЗА ФОСФАТА АЛЮМИНИЯ И ВОДОРОДА ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО ЛОМА

Новиков Александр Станиславович<sup>1</sup>,  
asn36@tpu.ru

Мостовщиков Андрей Владимирович<sup>1,2</sup>,  
avmost@tpu.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

<sup>2</sup> Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью разработки новых методик получения сырья из алюминиевого лома. Данное направление при применении различных интенсифицирующих воздействий позволяет реализовать процесс синтеза сырья из металлолома в ресурсосберегающем режиме, минимизирующем объемы затрат на подготовку исходного сырья, последующие переработку и производство.

**Цель:** изучить физико-химические закономерности процесса переработки алюминиевых отходов в поле ультразвука в кислотной среде, предложить механизм этого процесса и на основании установленных закономерностей и предложенного механизма разработать методику переработки алюминиевых отходов с получением востребованных в промышленности продуктов реакции.

**Объекты:** образцы алюминиевых отходов в виде пластинок и стружки.

**Методы:** волюмометрия, сонохимический синтез, оценка и анализ кинетических кривых процесса при разных температурах, рентгенофазовый анализ.

**Результаты.** Проведен анализ кинетических кривых, рассчитаны константы скоростей процесса при различных температурах, определен порядок химической реакции. По рассчитанной энергии активации процесса дана характеристика кинетической области процесса. Согласно полученным данным, воздействие на систему ультразвуком способствовало увеличению скорости химического процесса на 90 % при 303 К; на 5 % при 313 К. Сам процесс начинался в течение 10...30 секунд и завершился в течение нескольких минут, что подтверждает возможность переработки алюминиевых отходов с помощью кислотных растворов при невысоких температурах. Полученный водород можно использовать в водородной энергетике, поскольку он является единственным газообразным продуктом реакции, что снимает необходимость в его очистке перед транспортировкой. Синтезированный в ходе реакции раствор хлорида алюминия можно использовать при очистке сточных вод, обработке древесины, производстве антиперспирантов, а также перевести в фосфат или гидроксид алюминия и использовать в керамической промышленности.

### Ключевые слова:

Сонохимия, утилизация отходов, получение водорода, получение хлорида алюминия, получение фосфата алюминия, волюмометрия, изучение кинетики, рентгенофазовый анализ.

### Введение

Утилизация металлических отходов является одной из важнейших задач металлургии, которая позволяет решать экологические проблемы по переработке накопленного металлолома. Переплавка металлолома является энергозатратным процессом, так как требует предварительной очистки металлолома, перевода металла в жидкое состояние, отливки слитков и т. п. Вместе с тем, используя комплексные физико-химические подходы к переработке лома, можно получать целевые химические продукты, минуя стадию выплавки. Несомненным преимуществом такого подхода является возможность проведения данной переработки в условиях дефицита энергоресурсов, в частности, в условиях Крайнего севера, Арктики. Например, с помощью неё возможна переработка алюминиевого лома, что позволит получать водород, который может быть использован для производства тепла и электроэнергии, а в качестве твердого остатка – различные соединения алюминия, которые можно использовать при производстве строительных материала-

лов. Преимуществом этого подхода является возможность использования сырья-лома без его предварительной очистки или сложной пробоподготовки ввиду отсутствия жестких требований к чистоте конечных продуктов синтеза.

С конца XIX в. в мире произведено около 1 млрд т алюминия и около 75 % от всего этого объема используется до сих пор. Согласно данным Международного алюминиевого института (International Aluminium Institute), треть этого алюминия используется в автомобилестроении и авиации, треть – в электрических кабелях и электрооборудовании и треть – в различных зданиях и сооружениях [1].

Алюминий является одним из самых распространенных металлов на Земле (от 7,45 до 8,14 %) [1], а также одним из самых активных ( $\varphi = -1,67$  В). Вследствие его высокой химической активности в чистом виде он не встречается, при этом его нельзя выделить непосредственно выплавкой, как это происходит с Ag, Fe, Cu и другими металлами. Данный процесс значительно сложнее и требует для своей реализации

больших объёмов электроэнергии, что делает ресурсозатратной термическую переработку алюминиевого лома вдали от крупных энергогенерирующих объектов [2].

Следствием широкого использования алюминиевых изделий является образование больших объёмов его отходов. Согласно оценкам [3], 1 кг перерабатываемого алюминиевого лома позволяет сэкономить до 8 кг бокситной руды, ~4 кг фторидов, используемых в электролизе расплавов, и 14 кВт/ч электроэнергии. Вместе с тем при переработке алюминиевого лома в образцах рециркулируемых материалов накапливаются примеси, которые создают значительный композиционный барьер для использования переработанного алюминия в электронике или других отраслях, требующих применения алюминия высокой чистоты [2]. Алюминиевая стружка, в отличие от других типов алюминиевых отходов, содержит в себе алюминий, оксид алюминия, а также около 40 % различных примесей металлургических производств [4], в том числе и следы машинного масла, что не позволяет эффективно переработать её классическим способом – переплавкой. В случае, если такой загрязнённый примесями лом использовать для производства водорода, как топлива, а также соединений алюминия-сырья для строительных материалов, указанные выше проблемы примесей не являются существенными.

Алюминий является одним из активнейших металлов, химические реакции с которым зачастую являются экзотермическими. Одной из экзотермических реакций с участием алюминия является его химическое взаимодействие с кислотными растворами, например с раствором соляной кислоты. В результате данной химической реакции из одного килограмма алюминия выделяется ~1,2 м<sup>3</sup> газообразного водорода, а также ~15 МДж тепла [4]. Полученную энергию можно использовать как внутри производства по переработке алюминия, так и для обеспечения теплом других потребителей, что особенно актуально при реализации процесса в условиях дефицита энергоресурсов.

Продуктами реакции являются хлорид алюминия и водород, который является единственным газообразным продуктом реакции, что позволяет использовать его для нужд водородной энергетики без использования дополнительного оборудования для очистки или его выделения из газовых смесей. Раствор хлорида алюминия можно использовать при очистке сточных вод, обработке древесины, производстве антиперспирантов. К сожалению, перевозка растворов хлорида алюминия крайне затратная, поэтому целесообразнее выделить алюминий из раствора в виде другого полезного соединения в твёрдой форме.

При протекании в растворе реакции между хлоридом алюминия и фосфатами натрия (калия) образуется фосфат алюминия в виде геля  $AlPO_4 \cdot nH_2O$ , а сами реакции являются экзотермическими. Получаемый гель не токсичен и безвреден: используется в качестве основы для получения медицинских препаратов. Ортофосфат алюминия образуется с высоким выходом (85–90 мас. %) и находит применение в качестве катализатора дегидратации спиртов в органическом

синтезе, для весового определения алюминия в неорганической химии и т. п. Высокая температура плавления ортофосфата алюминия (2000 °С) позволяет использовать его при производстве строительных материалов: термостойких связующих, стекол и т. п. [5].

Для интенсификации протекания химических реакций при переработке алюминиевого лома возможно использование различных физико-химических методов: введение катализатора, нагрев, повышенное давление, ультрафиолетовое, микроволновое и ультразвуковое воздействие [6]. В частности, ультразвук вследствие его комплексного воздействия применяют для множества технологических процессов, начиная от очистки металлических поверхностей, синтеза полимеров, разложения различных загрязнителей и изготовления наночастиц до биомедицинского применения и применения в пищевой промышленности вследствие влияния на химические реакции [7–21].

Таким образом, химическая переработка алюминиевых отходов, интенсифицированных ультразвуковым излучением, является альтернативой действующим физическим способам переработки, поскольку они менее затратные, чем переплавка алюминия, при температурах начиная с 933 К [2]. Ранее была разработана методика по щелочной переработке алюминиевых отходов в поле ультразвука. Согласно полученным результатам, ультразвук ускорял процесс на 25–44 % [4], что делает перспективным использование ультразвука при разработке иных методик химической переработки алюминиевого лома.

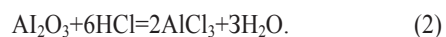
Цель данной работы заключалась в том, чтобы изучить физико-химические закономерности процесса кислотной переработки алюминиевых отходов в поле ультразвука, предложить механизм этого процесса и на основании выявленных закономерностей разработать методику кислотной переработки алюминиевых отходов с дальнейшим выделением продуктов реакции в виде ортофосфата алюминия.

#### Методики, оборудование и объекты исследования

Алюминий, являясь крайне активным металлом ( $\varphi = -1,67$  В), способен вытеснить водород из растворов соляной кислоты в ходе химической реакции, продуктами которой являются газообразный хлорид алюминия и водород:

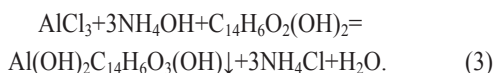


Помимо этого, из-за высокой активности на воздухе он быстро покрывается оксидной пленкой. В связи с этим для осуществления химической реакции (1) необходимо учитывать дополнительную стадию – химическое растворение оксида алюминия с внешней поверхности образца раствором неорганической кислоты [22]. Химическая реакция на примере взаимодействия с соляной кислотой выглядит следующим образом (2):

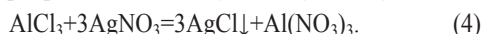


В качестве объектов исследования использовали отходы алюминия в виде стружки. Исследованные в работе образцы алюминиевых отходов металлургии представляют собой стружку длиной не более 1 см и

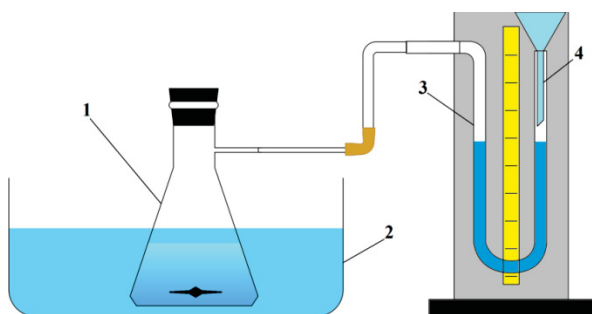
толщиной не более 2 мм. Массовое содержание Al в образцах, а также кинетику реакции (1) изучали волюмометрическим методом, с помощью установки, представленной на рис. 1 [22]. Продукты реакции определяли по результатам качественных реакций. Ионы алюминия – реакция с 0,1 % раствором ализарина и 5 % раствором гидроксида аммония, дающая ярко-красный осадок (3):



Хлорид ион определяли реакцией с 5 % раствором нитрата серебра по выпавшему белому осадку (4):



Содержание чистого алюминия в образцах по данным волюмометрического анализа составляет 60...71 (мас. %), оставшееся приходится на оксид алюминия и примеси.



**Рис. 1.** Схема волюмометрической установки: 1 – круглодонная колба с анализируемым образцом; 2 – ультразвуковая ванна; 3 – градуированная бюретка; 4 – воронка

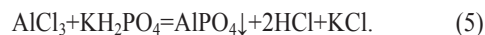
**Fig. 1.** Scheme of the volumetric installation: 1 – round-bottom flask with the analyzed sample; 2 – ultrasonic bath; 3 – graduated burette; 4 – funnel

Навеску алюминиевых отходов массой  $30 \pm 2$  мг помещали в колбу (1) со  $100 \text{ см}^3$  10 % раствора соляной кислоты, закрепленную с помощью штатива в ультразвуковой ванне «ПСБ-Галс 8035-05» (2). Колба была присоединена к градуированной бюретке (4), заполненной водным раствором натрия хлористого. Изменения температуры регистрировали с помощью монитора на ультразвуковой ванне (3).

Данные эксперименты проводили в диапазоне температур 303–323 К. Вначале была рассчитана кинетика химической реакции, без акустического воздействия, затем, после введения в систему ультразвука с частотой 35 кГц, была рассчитана кинетика целевого сонохимического процесса.

В ходе химической реакции через равные временные промежутки с помощью градуированной бюретки (4) фиксировался выделившийся объем водорода. Перед началом каждого опыта фиксировалась температура и давление в помещении.

После окончания химической реакции раствор фильтровали от примесей, которые не участвовали в реакции, а затем к полученному раствору хлорида алюминия добавляли 10 % раствор дигидрофосфата калия с целью получения осадка фосфата алюминия:



Так как фосфат алюминия растворим и в минеральных кислотах, и в щелочах, контроль pH является важным фактором успешного синтеза. Часть соляной кислоты, не вступившей в реакцию (1), а также образованная в ходе протекания реакции (5), требует нейтрализации, поскольку фосфат алюминия растворим в кислой среде. Для приведения pH к значениям 6,5–7,5 по каплям добавлялся 10 % раствор гидроксида калия, в ходе чего протекала реакция (6):



В результате был получен гель, содержащий в себе смесь фосфата алюминия и хлорида калия. Раствор пропускали через фильтр «Синяя лента», гель высушивали в течение суток. Поскольку фосфат алюминия обладает высокой сорбционной активностью, вместе с ним осаждаются и побочные продукты реакций [5]. Поэтому высушенный осадок промывали на фильтре горячей дистиллированной водой с целью вымывания хлорида калия до тех пор, пока качественная реакция отфильтрованного раствора на хлориды (4) не давала отрицательного результата. Состав полученного осадка анализировали с помощью рентгенофазового анализа.

### Результаты и обсуждение

Граница раздела фаз твердое тело – жидкость – область протекания химической реакции между алюминиевым ломом и кислотной средой. Локальная кавитация на поверхности твердой фазы (частиц алюминиевого лома) при схлопывании пузырьков приводит к формированию гидроударов по поверхности, что вызывает точечную эрозию поверхности и ускоряет разрушение пассивирующей оболочки на поверхности. Данные физико-химические эффекты также приводят к появлению дополнительных реакционных участков, что в свою очередь увеличивает скорость химической реакции.

На рис. 2 представлены кинетические кривые при различных температурах.

Согласно полученным зависимостям кислотную переработку алюминиевого лома можно представить в виде трёх стадий:

- 1) химическое растворение 10 % кислотным раствором оксидной пленки с активной поверхности образца – индукционный период основной химической реакции (1);
- 2) химическая реакция (1), протекающая до степени превращения алюминия 80 % – кинетическая кривая процесса близка к линейной форме;
- 3) завершение химического процесса – по мере уменьшения активной площади взаимодействия образца наблюдается плавное снижение скорости процесса.

Графическим способом был определен порядок химической реакции (1) – численные значения объемов выделенного водорода в различные временные промежутки подставлялись в уравнения нулевого, первого и второго порядков реакций, в ходе чего было выявлено, что данный химический процесс подчиняется уравнению нулевого порядка, так как зависимость принимала линейный вид, с квадратичным от-

клонением, близким к 1, именно при использовании уравнения (7) [23]:

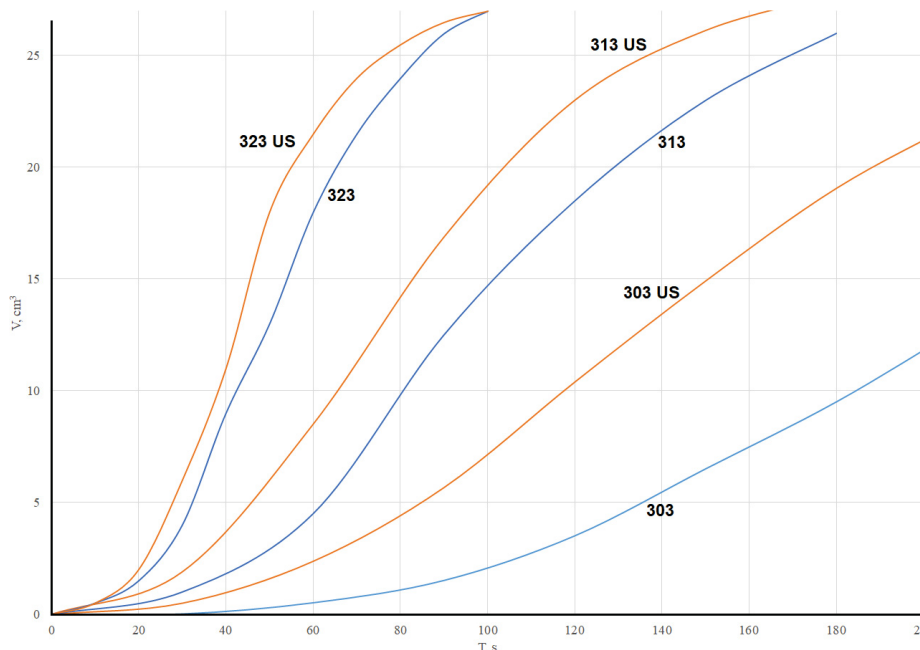
$$v = -\frac{dC_A}{dt} = K, \quad (7)$$

где  $v$  – скорость реакции;  $C_A$  – концентрация исходного реагента;  $t$  – время химической реакции;  $K$  – константа скорости химической реакции при заданной температуре.

По уравнению Вант–Гоффа (8) рассчитывали температурный коэффициент для данного диапазона температур:

$$K_{T_2} = K_{T_1} \cdot \gamma^{\frac{T_2 - T_1}{10}}, \quad (8)$$

где  $K_{T_2}, K_{T_1}$  – константы скоростей при соответствующих температурах;  $\gamma$  – температурный коэффициент химической реакции.



**Рис. 2.** Кинетические кривые при температурах 303, 313 и 323 К. Синие линии – кинетические кривые без УЗ воздействия, оранжевые – с УЗ воздействием

**Fig. 2.** Kinetic curves at 303, 313 and 323 K. Blue lines are kinetic curves without US exposure, orange lines are with US exposure

Преобразованное уравнение (9) позволяет рассчитать температурный коэффициент химической реакции:

$$\gamma = \left(\frac{K_2}{K_1}\right)^{\frac{10}{T_2 - T_1}}. \quad (9)$$

Температурный коэффициент в данном диапазоне температур составил 2,25.

Эффективная энергия активации процесса, рассчитанная по уравнению Аррениуса (10):

$$E_a = \frac{RT_2 T_1}{T_2 - T_1} \cdot \ln \frac{k_2}{k_1}, \quad (10)$$

составила  $66,1 \pm 1$  кДж/моль.

Данное значение энергии активации, а также дробное значение температурного коэффициента, находящегося между границ значений диффузионной и кинетической области:  $1,2 < 2,25 < 3-4$ , показывают, что реакция протекает в переходной внешнедиффузионно-кинетической области. Согласно особенностям данной кинетической области, скорость химической реакции и скорость диффузии соизмеримы, соответственно, и интенсифицирующие воздействия для диффузионной среды (акустическое перемешивание и кавитация) и для кинетической (повышение темпера-

туры) будут практически в равной степени ускорять протекание реакции [23].

Полученные кинетические характеристики в интервале температур 303...323 К приведены в таблице.

**Таблица.** Экспериментальные результаты  
**Table.** Experimental results

Характеристика Characteristic	Без УЗ Without US	С УЗ With US	Изменения, % Changes, %
Константа скорости при 303 К, с <sup>-1</sup> Rate constant at 303 K, s <sup>-1</sup>	0,0677	0,1285	89,8
Константа скорости при 313 К, с <sup>-1</sup> Rate constant at 313 K, s <sup>-1</sup>	0,1707	0,1792	5
Константа скорости при 323 К, с <sup>-1</sup> Rate constant at 323 K, s <sup>-1</sup>	0,3414	0,3431	0
Индукционный период, с Induction period, s	20...40	10...20	100

Воздействие на систему ультразвуком способствовало увеличению скорости химического процесса на 89,8 % при 303 К; на 5 % при 313 К. При дальнейшем увеличении температуры (до 323 К) роста значений скоростей обнаружено не было, длительность индукционного периода снизилась в 2 раза – с 20...40 до 10...20 с.

Увеличение скорости химического процесса при обработке реакционной смеси ультразвуком отчасти можно объяснить ультразвуковым перемешиванием реагентов и кавитационным разрушением пассивирующей алюминиевой оболочки. Также установлено, что при ультразвуковом воздействии происходил незначительный разогрев: в ходе экспериментов температура дополнительно увеличивалась на 3 К при начальной температуре обработки ультразвуком 303 К, а также на 1 К при начальной температуре 313 К, при 323 К дальнейшего роста температуры не наблюдалось. Константа скорости реакции при 303 К и облучении ультразвуком больше константы скорости при 303 К без ультразвука на ~90 %, при других температурах существенного изменения скорости реакции не обнаружено.

Возможный физико-химический механизм протекания процессов представляет собой последовательность следующих стадий:

1. После появления в системе ультразвукового излучения возникают механические эффекты, ускоряющие химический процесс: перемешивание (сопряженное с турбулентностью и массопереносом), соударение частиц лома между собой и т. п., вследствие чего происходит постепенный нагрев реакционной смеси.
2. После добавления в раствор образца алюминиевой стружки начинается химическое растворение внешнего слоя образца (оксидной пленки) – химическая реакция (2).
3. Одновременно с этапом 2, при наличии ультразвука, на границе жидкость – твердое тело начинается процесс локальной сонохимической кавитации на оксидной поверхности: сначала происходит зарождение пузырьков, их рост, а затем, после достижения пузырьками критических размеров, их микровзрывы. Известно [19], что это генерирует потоки жидкости, ударяющие по поверхности образца, что приводит к точечной эрозии пассивирующей лом оксидной оболочки, поскольку температура этих потоков может достигать 5000 К, а давление – 1000 атм. Это приводит к появлению новых реакционных участков на поверхности алюминиевого лома с раствором соляной кислоты раньше, чем без наличия ультразвука (уменьшается инкубационный период).
4. За короткое время оксидная пленка полностью разрушается вследствие взаимодействия с кислотой.
5. Затем, в процессе акустического перемешивания, образец постепенно растворяется в растворе HCl, количество активной поверхности образца уменьшается, что приводит к снижению скорости выделения водорода.

Конечный продукт – ортофосфат алюминия, полученный согласно методике, приведенной выше, анализировали с помощью рентгенофазового анализа (рис. 3). Согласно данным рентгенофазового анализа наиболее интенсивные дифракционные максимумы соответствуют кристаллической решетке  $AlPO_4$ .

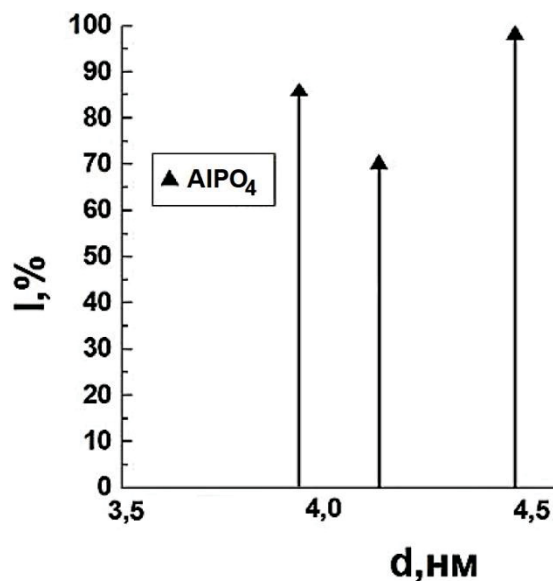


Рис. 3. Рентгенограмма  $AlPO_4$

Fig. 3.  $AlPO_4$  radiograph

Отсутствие дифракционных максимумов KCl на рентгенограмме у полученного по описанной выше методике фосфата алюминия подтверждает его чистоту и качество предлагаемой методики. Кроме того, использование данной методики позволяет получить и оксид алюминия. После получения раствора хлорида алюминия к нему добавляли 10 % раствор KOH, получая при этом гидроксид алюминия, который затем прокаливался при температуре 450–500 °С в течение часа.

#### Заключение

В результате проведенного исследования были изучены физико-химические особенности процесса переработки алюминиевого лома в кислотной среде при воздействии ультразвука. Установлено, что при небольшом нагреве (10 градусов относительно комнатной температуры) ультразвук способен увеличивать скорость химической переработки алюминиевых отходов до 90 %, при этом снижая индукционный период вдвое. Предложен механизм, согласно которому интенсифицирующее воздействие ультразвука объясняется сонохимической кавитацией пузырьков воздуха на поверхности частиц лома, перемешиванием реакционной среды и повышением температуры.

На основании полученных результатов предложена методика химической утилизации алюминиевых отходов, которая включает в себя химическую реакцию между водным 10 % раствором соляной кислоты и алюминиевой стружкой в ультразвуковом поле. Продуктами реакции являются водород и раствор хлорида алюминия, который может быть переведен в ортофосфат или оксид алюминия.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Минобрнауки РФ, проект FEMN-2022-0003.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Brooke J. A circularity case for aluminium compared with glass and plastic // *International Aluminium*. – 2022. – V. 2. – P. 1–4.
2. Митина Н.Н., Гнегов В.М. Утилизация промышленных отходов в России и в мире: проблемы и решения // «Neftegaz.RU». – 2020. – № 3. – С. 1–20.
3. Aljanabi Z., Carrere J., Cruz C. Opportunities for aluminium in a post-Covid economy // *International Aluminium*. – 2022. – V. 3. – P. 1–8.
4. Новиков А.С., Мостовщиков А. В. Влияние ультразвукового излучения на кинетику процесса щелочной переработки алюминиевых отходов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 3. – С. 49–56.
5. Вохидов Э.А., Джалилов А.Т., Саидов С.С. Получение высокотемпературного стойкого фосфата алюминия и дериватографический анализ // *Universum: технические науки* – 2020. – № 7. – С. 25–28.
6. Кардашев Г.А. Физические методы интенсификации процессов химической технологии. – М.: Изд-во «Химия», 1990. – 208 с.
7. A comprehensive numerical analysis of heat and mass transfer phenomena during cavitation sono-process / A. Dehane, S. Merouani, O. Hamdaoui, A. Alghyamah // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2021. – V. 73. – 105498.
8. Assessment of the olive oil extraction plant layout implementing a high-power ultrasound machine / A. Tamborrino, A. Taticchi, R. Romaniello, C. Perone, S. Esposto, A. Leone, M. Servili // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2021. – V. 73. – 105505.
9. Electron paramagnetic resonance of sonicated powder suspensions in organic solvents / H. Laajimi, M. Mattia, R.S. Stein, C.L. Bianchi, D.C. Boffito // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2021. – V. 73. – 105544.
10. Jonnalagadda U.S., Su X., Kwan J.J. Nanostructured TiO<sub>2</sub> cavitation agents for dual-modal sonophotocatalysis with pulsed ultrasound // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2021. – V. 73. – 105530.
11. Recent advances in the application of ultrasound in dairy products: Effect on functional, physical, chemical, microbiological and sensory properties / L.M. Carrillo-Lopez, I.A. Garcia-Galicia, J.M. Tirado-Gallegos, R. Sanchez-Vega, M. Huerta-Jimenez, M. Ashokkumar, A.D. Alarcon-Rojo // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2021. – V. 73. – 105467.
12. Self-cleaning of SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> coating: effect of sonochemical synthetic parameters on the morphological, mechanical, and photocatalytic properties of the films / A. Rosales, L. Ortiz-Frade, I.E. Medina-Ramirez, L.A. Godínez, K. Esquivel // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2021. – V. 73. – 105483.
13. Ruiz-Baltazar A.J. Sonochemical activation-assisted biosynthesis of Au/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles and sonocatalytic degradation of methyl orange // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2021. – V. 73. – 105530.
14. Synergistic inactivation of bacteria based on a combination of low frequency, low intensity ultrasound and a food grade antioxidant / C.N. Huua, R. Raia, X. Yanga, R. Tikekarb, N. Nitina // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2021. – V. 74. – 105567.
15. Sonochemical effect and pore structure tuning of silica xerogel by ultrasonic irradiation of semi-solid hydrogel / Y. Maeda, Y. Hayashi, J. Fukushima, H. Takizawa // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2021. – V. 73. – 105476.
16. Pradhan S.R., Colmenares-Quintero R.F., Quintero J.C. Designing microflowreactors for photocatalysis using sonochemistry: a systematic review article // *Molecules*. – 2019. – V. 24. – 3315.
17. A review on recent advances in hydrogen energy, fuel cell, biofuel and fuel refining via ultrasound process intensification / U.K. Zore, S.G. Yedire, N. Pandi, S. Manickam, S.H. Sonawane // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2021. – V. 73. – 105536.
18. Kerboua K., Hamdaoui O., Alghyamah A. Energy balance of high-energy stable acoustic cavitation within dual-frequency sonochemical reactor // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2021. – V. 73. – 105471.
19. Suslick K.S. *Sonochemistry* // *Science*. – 1990. – V. 247. – P. 1493–1445.
20. Margulis M.A. Sonochemistry as a new promising area of high energy chemistry // *High Energy Chemistry*. – 2004. – V. 38. – P. 135–142.
21. Годымчук А.Ю., Ильин А.П., Астанкова А.П. Окисление нанопорошка алюминия в жидкой воде при нагревании // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2007. – Т. 310. – № 1. – С. 102–104.
22. Макрокинетика взаимодействия электровзрывных нанопорошков алюминия с водой и водными растворами / А.В. Коршунов, Е.Б. Голушкова, Д.О. Перевезенцева, А.П. Ильин // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2008. – Т. 312. – № 3. – С. 5–10.
23. Колпакова Н.А., Романенко С.В., Колпаков В.А. Сборник задач по химической кинетике. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 280 с.

Поступила 03.08.2022 г.

Прошла рецензирование 30.09.2022 г.

## Информация об авторах

**Новиков А.С.**, аспирант отделения естественных наук Школы базовой инженерной подготовки Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Мостовщиков А.В.**, доктор технических наук, профессор отделения естественных наук Школы базовой инженерной подготовки Национального исследовательского Томского политехнического университета; профессор кафедры физической электроники Факультета электронной техники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

UDC 544.576: 546.62: 544.038: 54-145.15: 546.62'226

## DEVELOPMENT OF A METHOD FOR SYNTHESIS OF ALUMINUM PHOSPHATE AND HYDROGEN FROM ALUMINUM PRODUCTION WASTES

Alexander S. Novikov<sup>1</sup>,  
asn36@tpu.ru

Andrey V. Mostovshchikov<sup>1,2</sup>,  
avmost@tpu.ru

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic university,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

<sup>2</sup> Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,  
40, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance** of the study is caused by the need to develop new methods for the disposal of metal waste. This direction, with the participation of various intensifying effects, refers to resource-saving, technological, minimizing the volume of capital costs for raw materials, production and subsequent sales.

**Purpose:** to study the physical and chemical laws of aluminum waste acid processing in the field of ultrasound, propose a mechanism for this process, and, based on the established laws and the proposed mechanism, develop a method for aluminum waste acid processing to obtain reaction products that are in demand in the industry.

**Objects:** samples of aluminum waste in the form of plates and shavings.

**Methods:** volumetry, differential thermal analysis, evaluation and analysis of the kinetic curves of the process at different temperatures.

**Results.** The kinetic curves were analyzed, the rate constants of the process at different temperatures were calculated, and the order of the chemical reaction was found. Based on the calculated activation energy of the process, a characteristic was given about the kinetic region of the process. The mass content of aluminum in the samples was found. According to the data obtained, exposure of the system to ultrasound contributed to an increase in the rate of the chemical process by 90 % at 303 K; by 5 % at 313 K. The process itself began within 10...30 seconds and completed within a few minutes, which confirms the possibility of recycling aluminum waste using acid solutions at low temperatures. The resulting hydrogen can be used in hydrogen energy, since it is the only gaseous product of the reaction, which eliminates the need for its purification before transportation. The aluminum chloride solution synthesized during the reaction can be used in wastewater treatment, wood processing, production of antiperspirants, as well as precipitated aluminum phosphate and used in the ceramic industry.

### Key words:

Sonochemistry, waste disposal, hydrogen production, aluminum chloride production, aluminum phosphate production, volumetry, kinetics study, X-ray phase analysis.

The research was partially financially supported by the Ministry of Education and Science of the FR, project FEMN-2022-0003.

### REFERENCES

- Brooke J. A circularity case for aluminium compared with glass and plastic. *International Aluminium*, 2022, vol. 2, pp. 1–4.
- Mitina N.N., Gnetov V.M. Utilization of industrial waste in Russia and in the world: problems and solutions. *Neftegaz.RU*, 2020, no. 2, pp. 1–20. In Rus.
- Aljanabi Z., Carrere J., Cruz C. Opportunities for aluminium in a post-Covid economy. *International Aluminium*, 2022, vol. 3, pp. 1–8.
- Novikov A.S., Mostovshchikov A.V. Influence of ultrasonic radiation on the kinetics of the process of alkaline processing of aluminum waste. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 3, pp. 49–56. In Rus.
- Vokhidov E.A., Dzhililov A.T., Saidov S.S. Obtaining a high temperature resistant aluminum phosphate and derivative analysis] *Universum: tekhnicheskie nauki*, 2020, no. 7, pp. 25–28. In Rus.
- Kardashev G.A. *Fizicheskie metody intensivatsii protsessov khimicheskoy tekhnologii* [Physical methods of intensification of chemical technology processes]. Moscow, Khimiya Publ., 1990. 208 p.
- Dehane A., Merouani S., Hamdaoui O., Alghyamah A. A comprehensive numerical analysis of heat and mass transfer phenomena during cavitation sono-process. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, vol. 73, 105498.
- Tamborrino A., Taticchi A., Romaniello R., Perone C., Esposto S., Leone A., Servili M. Assessment of the olive oil extraction plant layout implementing a high-power ultrasound machine. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, vol. 73, 105505.
- Laajimi H., Mattia M., Stein R.S., Bianchi C.L., Boffito D.C. Electron paramagnetic resonance of sonicated powder suspensions in organic solvents. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, vol. 73, 105544.
- Jonnalagadda U.S., Su X., Kwan J.J. Nanostructured TiO<sub>2</sub> cavitation agents for dual-modal sonophotocatalysis with pulsed ultrasound. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, vol. 73, 105530.
- Carrillo-Lopez L.M., Garcia-Galicia I.A., Tirado-Gallegos J.M., Sanchez-Vega R., Huerta-Jimenez M., Ashokkumar M., Alarcon-Rojo A.D. Recent advances in the application of ultrasound in dairy products: Effect on functional, physical, chemical, microbiological and sensory properties. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, vol. 73, 105467.
- Rosales A., Ortiz-Frade L., Medina-Ramirez I.E., Godínez L.A., Esquivel K. Self-cleaning of SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> coating: effect of sonochemical synthetic parameters on the morphological, mechanical, and photocatalytic properties of the films. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, vol. 73, 105483.
- Ruiz-Baltazar A.J. Sonochemical activation-assisted biosynthesis of Au/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles and sonocatalytic degradation of methyl orange. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, vol. 73, 105530.
- Hua C.N., Raia R., Yanga X., Tikekarb R., Nitina N. Synergistic inactivation of bacteria based on a combination of low frequency, lowintensity ultrasound and a food grade antioxidant. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, vol. 74, 105567.

15. Maeda Y., Hayashi Y., Fukushima J., Takizawa H. Sonochemical effect and pore structure tuning of silica xerogel by ultrasonic irradiation of semi-solid hydrogel. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, vol. 73, 105476.
16. Pradhan S.R., Colmenares-Quintero R.F., Quintero J.C. Designing microflowreactors for photocatalysis using sonochemistry: a systematic review article. *Molecules*, 2019, vol. 24, 3315.
17. Zore U.K., Yedire S.G., Pandi N., Manickam S., Sonawane S.H. A review on recent advances in hydrogen energy, fuel cell, biofuel and fuel refining via ultrasound process intensification. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, vol. 73, 105536.
18. Kerboua K., Hamdaoui O., Alghyamah A. Energy balance of high-energy stable acoustic cavitation within dual-frequency sonochemical reactor. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, vol. 73, 105471.
19. Suslick K.S. Sonochemistry. *Science*, 1990, vol. 247, pp. 1493–1445.
20. Margulis M.A. Sonochemistry as a new promising area of high energy chemistry. *High Energy Chemistry*, 2004, vol. 38, pp. 135–142.
21. Godymchuk A.Yu., Ilin A.P., Astankova A.P. Oxidation of aluminum nanopowder in liquid water during heating. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2007, vol. 310, no. 1. pp. 102–104. In Rus.
22. Korshunov A.V., Golushkova E.B., Perevezentseva D.O., Ilin A.P. Macrokinetics of interaction of electroexplosive aluminum nanopowders with water and aqueous solutions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2008, vol. 312, no. 3. pp. 5–10. In Rus.
23. Kolpakova N.A., Romanenko S.V., Kolpakov V.A. *Sbornik zadach po khimicheskoy kinetike* [Collection of problems in chemical kinetics]. Tomsk, TPU Publ. house, 2009. 280 p.

Received: 3 August 2022.  
Reviewed: 30 September 2022.

#### Information about the authors

**Alexander S. Novikov**, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Andrey V. Mostovshchikov**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University; professor, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.



УДК 66.074

## ВЛИЯНИЕ ТЕРМОБАРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА ПОДГОТОВКИ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Лиинтин Илья Алексеевич<sup>1</sup>,  
quw\_06@mail.ru

Ерофеев Владимир Иванович<sup>1</sup>,  
erofeevvi@mail.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность.** В последние годы кроме непосредственной добычи природного или попутных нефтяных газов из недр их потом необходимо подготовить, обеспечить товарное качество, в частности, удалить влагу, высшие углеводороды  $C_{2+}$  и другие побочные не углеводородные газы, которые отрицательно и пагубно влияют на технико-экономические показатели работы установок и способствуют образованию кристаллогидратов. В связи с высокими требованиями к качеству подготовленного природного газа и с ростом влагосодержания в газе из-за высокой степени обводненности нефтяных и газовых месторождений, для повышения рентабельности добычи газа, технологии подготовки газа постоянно совершенствуются и обновляются, в том числе и абсорбционный метод осушки природного газа от примесей воды.

**Цель:** обосновать эффективность применения триэтиленгликоля в качестве абсорбента при подготовке природного газа абсорбционным методом на действующей комплексной установке подготовки природного газа.

**Объект:** установка комплексной подготовки природного газа.

**Метод:** моделирование процессов абсорбции влаги из природного газа в программном комплексе «UniSim Design».

**Результаты.** Исследовано влияние технологических параметров давления и температуры, а также двух абсорбентов: диэтиленгликоля и триэтиленгликоля, на эффективность процессов подготовки газа на модели установки подготовки природного газа действующего газового промысла. Установлены оптимальные температура и давление, при которых процесс абсорбции влаги из природного газа будет наиболее эффективно проходить и при снижающемся давлении входного сырья. Показано, что при использовании триэтиленгликоля в качестве абсорбента для осушки природного газа от воды значительно уменьшаются энергозатраты на компримирование газа, его охлаждение перед абсорбером и расход осушителя по сравнению с диэтиленгликолем.

### Ключевые слова:

абсорбционная осушка газа, температура точки росы, установка комплексной подготовки газа, природный газ, триэтиленгликоль, диэтиленгликоль.

### Введение

В настоящее время подготовка природного газа на установках комплексной подготовки газа (УКПГ), используемых газодобывающими предприятиями на месторождениях Крайнего Севера, проводится абсорбционным методом [1].

Данный метод очень распространен на газовых месторождениях Российской Федерации.

На сегодняшний день большинство газовых месторождений Российской Федерации находится на стадии падающей добычи. При падении пластовых давлений значительно увеличивается влагосодержание в газе. В связи с этим остро стоит вопрос о повышении эффективности процесса подготовки газа.

Повышение эффективности эксплуатации установки абсорбционной осушки газа может быть обеспечено в той или иной степени за счет изменения термобарических параметров, а также за счет выбора осушителя.

В работах [2, 3] приведены реальные примеры успешного использования триэтиленгликоля (ТЭГ) по сравнению с диэтиленгликолем (ДЭГ) для осушки природного газа. Рассмотрены разные модификации оборудования по осушке природного газа с помощью ТЭГ и различные методы регенерации абсорбента, которые позволяют достигать наилучшего результата с точки зрения его концентрации.

### Методика проведения исследования

Моделирование процесса абсорбционной осушки природного газа проводилось с помощью программного комплекса технологического моделирования «Honeywell UniSim Design».

Технологическими параметрами установки абсорбционной осушки газа являются: давление, температура. В результате будут подобраны оптимальные термобарические параметры для получения товарного осушенного газа, который соответствует отраслевому стандарту Газпрома [4], главные из них – это точка росы по влаге (ТТРв) и точка росы по углеводородам (ТТРу).

В качестве «базовых» параметров схемы в процессе моделирования выбраны реальные технологические параметры УКПГ (табл. 1).

Состав газа, поступающего на УКПГ, представлен в табл. 2. Содержание влаги в сыром газе составляло  $2 \text{ г/м}^3$ .

Для оценки эффективности абсорбентов использованы следующие показатели: давление газа, контактная температура, температура точки росы (ТТР) по воде и по углеводородам [5–9].

Параметры абсорбера: диаметр 1,9 м, высота 14,5 м, состоит из трех функциональных секций [10]:

- сепарационная, где происходит отделение газа от конденсата и пластовой воды;

- массообменная, где происходит поглощение компонентов из газовых смесей жидким поглотителем (абсорбентом);
- фильтрующая, где происходит очистка газа от абсорбента, уносимого из массообменной секции.

Таблица 1. Базовые параметры для моделирования

Table 1. Basic parameters for simulation

Концентрация гликолей, % мас. Concentration of glycols, wt. %	Температура контакта газ-гликоль, °C Gas-glycol contact temperature, °C	Давление осушаемого газа перед абсорбером, МПа Drying gas pressure before the absorber, MPa	Давление в абсорбере, МПа Pressure in the absorber, MPa	Расход гликоля, м <sup>3</sup> /ч Glycol flow, m <sup>3</sup> /h	Расход осушаемого газа, тыс. м <sup>3</sup> /ч Dried gas flow, thous. m <sup>3</sup> /h
99	18	4	4	3	300

Таблица 2. Исходный состав газа

Table 2. Initial gas composition

Компонент Component	% объемные % vol.
CH <sub>4</sub>	97,9
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,43
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,38
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,018
CO <sub>2</sub>	0,039
N <sub>2</sub>	1,26
He	0,013
H <sub>2</sub>	0,026

В программной среде UniSim Design Suite была построена модель процесса абсорбционной осушки газа, представленная на рис. 1, рассчитано количество абсорбента, которое необходимо для осушки газа и определены температуры точки росы по влаге для конечного продукта.

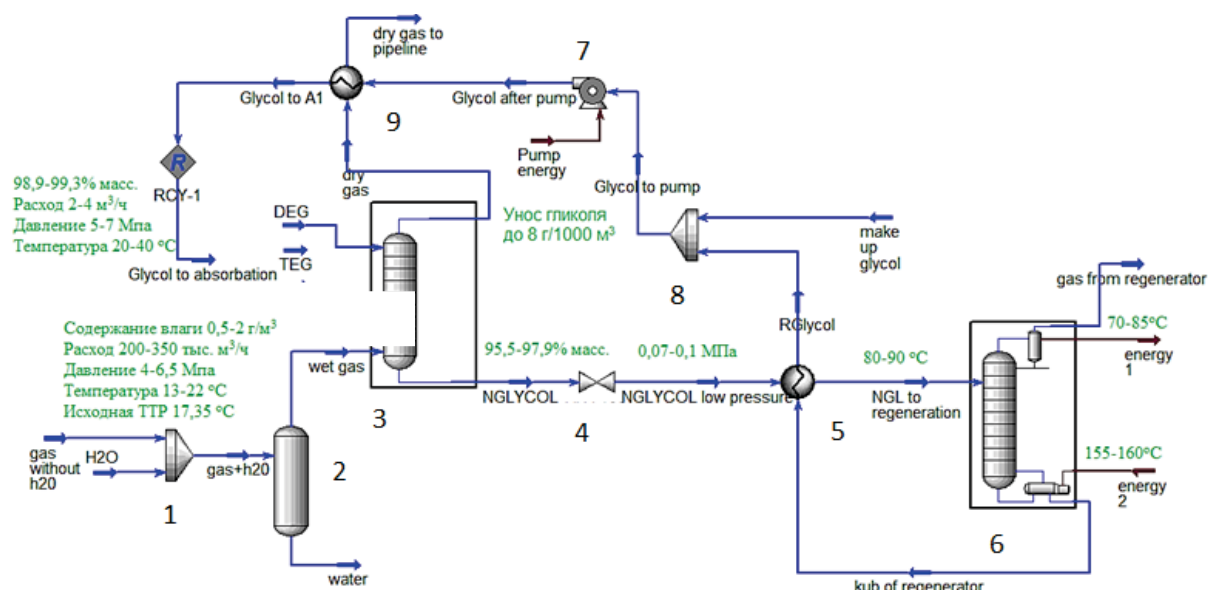


Рис. 1. Принципиальная схема абсорбционной осушки природного газа в программе «UniSim Design»: 1 – миксер для смешивания потоков газа и воды с целью получения сырого газа; 2 – сепаратор; 3 – абсорбер; 4 – регулирующий клапан; 5 – печь для подогрева насыщенного ДЭГ; 6 – колонна для регенерации ДЭГ (ректификационная колонна); 7 – насос; 8 – миксер для смешивания регенерированного ДЭГ и ДЭГ с большей концентрацией; 9 – теплообменник

Fig. 1. Schematic diagram of absorption dehydration of natural gas in the «UniSim Design»: 1 – mixer for mixing gas and water flows in order to obtain raw gas; 2 – separator; 3 – absorber; 4 – control valve; 5 – furnace for heating saturated DEG; 6 – column for DEG regeneration (rectification column); 7 – pump; 8 – mixer for mixing regenerated DEG and DEG with a higher concentration; 9 – heat exchanger

При заданных параметрах были определены следующие значения основных показателей: точка росы осушенного газа минус 20,78 °C; унос ДЭГ с осушенным газом в абсорбере 0,46 кг/ч, или 1,53 г/1000 м<sup>3</sup>; установлены массовые концентрации насыщенного ДЭГ (НДЭГ) – 95,2 %.

Сравнение гликолей проводилось при следующих параметрах: давление газа, контактная температура. Построены зависимости температуры точки росы газа и уноса гликоля от давления и температуры точки росы газа и уноса гликоля от температуры контакта.

Далее рассмотрим влияние давления и температуры на процесс абсорбционной осушки природного газа.

Влияние давления (рис. 2). При увеличении давления ТТР осушаемого газа снижается, то есть наблюдается обратно пропорциональная зависимость, что соответствует теоретическим данным [11, 12].

ДЭГ обеспечивает ТТР до минус 20 °C при давлении 4 МПа, ТЭГ при 3,5 МПа, что способствует экономии энергии и ресурсов, потребляемых ДКС при компримировании газа.

До 4,5 МПа преимущество ТЭГ над ДЭГ легко прослеживается, разница ТТР на этом участке составляет от 2 до 13,5 °C при прочих равных условиях. При давлении 4,5 МПа и выше ТЭГ теряет свое преимущество, сначала температуры точек росы сравни-

ваются, а потом ДЭГ начинает осушать газ до более низких температур точек росы [13–15].

Количество уносимого гликоля тоже зависит от изменения давления. Наблюдается обратно пропорциональная зависимость: при увеличении давления потеря гликолей уменьшается, как и в случае с точкой росы газа. При этом на всем промежутке унос ТЭГ меньше примерно в два раза, чем ДЭГ [16–18].

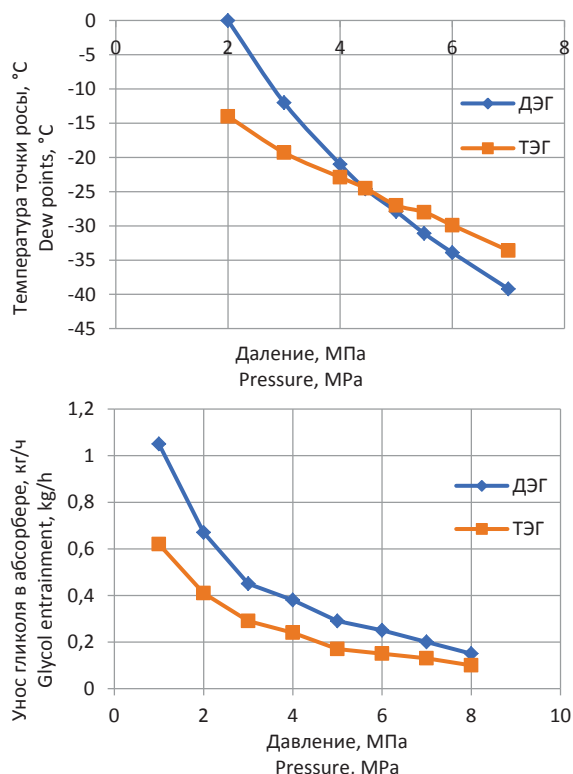


Рис. 2. Зависимость температуры точки росы газа и уноса гликоля от давления

Fig. 2. Pressure dependence of gas dew point temperature and glycol entrainment

Влияние температуры (рис. 3). При росте температуры контакта ТТР увеличивается, что негативно сказывается на качестве подготовленного газа [11, 12]. ТЭГ при температурах более 15 °С обеспечивает более низкую точку росы, а при температурах ниже 15 °С его преимущество перед ДЭГ теряется – это является одной из причин выбора ДЭГ при проектировании газовых промыслов северных месторождений России [19, 20].

Точка росы ниже минус 20 °С при осушке ТЭГ достигается при температуре контакта ниже 21 °С, в то время как ДЭГ осушает газ до регламентируемой точки росы при температуре контакта 19 °С и ниже.

Повышение температуры контакта влияет также на унос гликоля [21]. При 30 °С унос ДЭГ составляет 1,29 кг/ч, или 4,3 г/1000 м<sup>3</sup>, при 40 °С – 2,73 кг/ч, или 9,1 г/1000 м<sup>3</sup>. Таким образом, унос ДЭГ больше регламентируемого значения в 8 г/1000 м<sup>3</sup> наблюдается при температуре выше 35 °С. Потери ТЭГ находятся в рамках регламента даже при температуре 40 °С, составляя 1,56 кг/ч, или 5,2 г/1000 м<sup>3</sup>.

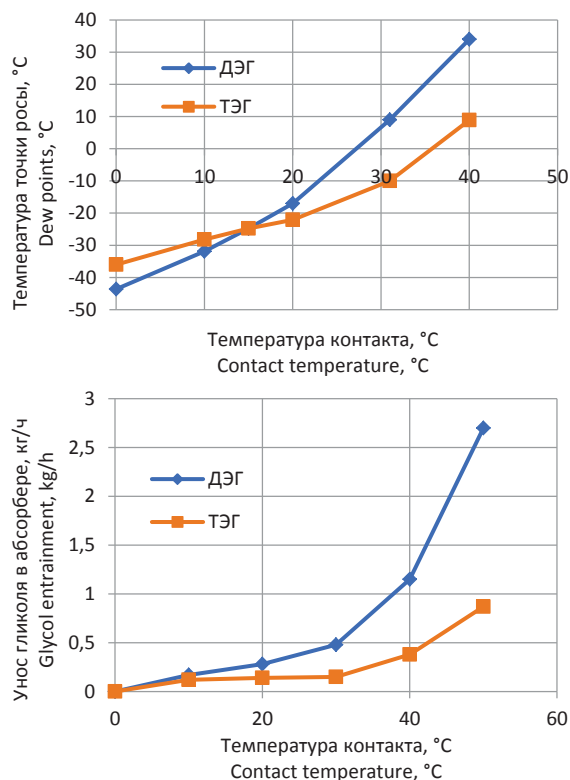


Рис. 3. Зависимость температуры точки росы газа и уноса гликоля от температуры контакта

Fig. 3. Dependence of gas dew point temperature and glycol entrainment on contact temperature

В работах [19, 22] рассмотрены технологии осушки природного газа с помощью триэтиленгликоля, описаны все его преимущества и недостатки. При использовании данного абсорбента в качестве осушителя природного газа достигается более низкая температура точки росы. Также показано, что энергозатраты на использование дополнительного оборудования будут значительно меньше, чем с использованием диэтиленгликоля.

### Заключение

На основе полученных результатов моделирования технологического процесса абсорбционной осушки природного газа от влаги в среде программного комплекса Unisim Design установлено, что при увеличении давления потока газа на входе в абсорбер его точка росы уменьшается, как и унос гликоля.

Внедрение ТЭГ в качестве абсорбента для осушки природного газа от влаги может быть целесообразно при дальнейшем падении пластовых давлений. При увеличении температуры контакта точка росы осушенного газа повышается, что негативно сказывается на его качестве. Для осушки газа в условиях газового промысла северных месторождений до необходимой точки росы минус 20 °С при использовании ТЭГ необходимо создать температуру контакта до 21 °С, при использовании ДЭГ до 17 °С.

Показано, что при использовании триэтиленгликоля в качестве абсорбента при осушке природного газа от влаги значительно уменьшаются энергозатра-

ты на компримирование газа, его охлаждение перед абсорбером и расход осушителя по сравнению с диэтиленгликолем.

Также установлены оптимальные параметры (табл. 3) работы абсорбционной установки осушки природного газа при концентрации гликолей 99 % мас. и расходе сырого природного газа 350 тыс. м<sup>3</sup>/ч.

В табл. 3 представлены оптимальные технологические параметры по осушке природного газа от влаги с помощью абсорбентов: диэтиленгликоля и триэтиленгликоля, на установке комплексной подготовки природного газа.

**Таблица 3.** Оптимальные параметры работы установки комплексной подготовки газа

**Table 3.** Optimum operating parameters of the gas treatment unit

Осушитель Absorbent	Давление потока, МПа Flow stream pressure, MPa	Температура контакта, °C Contact temperature, °C	Температура точки росы осушителя, °C Dry gas dew point temperature, °C	Расход осушителя, м <sup>3</sup> /ч Absorbent flow, m <sup>3</sup> /h
ДЭГ/DEG	4	15	-25,47	3200
ТЭГ/TEG	3,5	17	-21,37	3000

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Сбор и промысловая подготовка газа на северных месторождениях России / А.И. Грищенко, В.А. Истомин, А.Н. Кульков, Р.С. Сулейманов. – М.: Недра, 1999. – 473 с.
- Al Ani Z.A., Gujarathi A.M. Simultaneous energy and environment-based optimization and retrofit of TEG dehydration process: An industrial case study // Process Safety and Environment Protection. – 2021. – V. 147. – P. 972–984.
- Development of a techno-economic framework for natural gas dehydration via absorption using tri-ethylene glycol: a comparative study between DRIZO and other dehydration processes / Z.Y. Konga, X.J. Melvin Wee, A.Yu. Mahmouda // South African journal of Chemical engineering. – 2020. – V. 31. – P. 17–24.
- СТО Газпром 089-2010. «Газ горючий природный, поставляемый и транспортируемый по магистральным газопроводам. Технические условия». – М.: ОАО «Газпром», 2010. – 19 с.
- Kidnay A.J., Parrish W.R., McCartney D.G., Fundamentals of natural gas processing. – Boca Raton: CRC Press publishing, 2014. – 574 p.
- Бриков А.В., Магадова Л.А. Основные факторы, влияющие на деградацию гликолей в условиях нефтепромысловых систем // Технология нефти и газа. – 2018. – № 6 (119). – С. 3–7.
- Netusil M., Diti P. Comparison of three methods for natural gas dehydration // Journal of Natural Gas Chemistry. – 2011. – V. 20. – P. 471–476.
- Carroll J., Natural gas hydrates: a guide for engineer. – United Kingdom: Gulf Professional Publishing, 2020. – 340 p.
- Kidnay A.J., Parrish W.R., McCartney D.G. Fundamentals of natural gas processing. – Boca Raton, USA: CRC Press publishing, 2012. – 574 p.
- Ланчаков Г.А., Кульков А.Н., Зиберт Г.К. Технологические процессы подготовки природного газа и методы расчета оборудования. – М.: Недра-Бизнесцентр, 2000. – 279 с.
- Bahadori A., Vuthaluru H. Simple methodology for sizing of absorbers for TEG gas dehydration systems // Energy. – 2009. – V. 34. – P. 1910–1916.
- Neagu M., Cursaru D. Technical and economic evaluations of the triethylene glycol regeneration processes in natural gas dehydration plants // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2017. – V. 37. – P. 326–339.
- Energy separation and condensation effects in pressure energy recovery process of natural gas supersonic dehydration / Yang Liu, Xuewen Cao, Jian Yang, Yuxuan Li, Jiang Bian // Energy Conversion and Management. – 2021. – V. 245. – P. 557–572.
- Perry R., Green D.W. Perry's chemical engineers' handbook. – New York: McGRAW-HILL, 2008. – 2403 p.
- Natural gas dehydration by desiccant materials / A.A. Farag Hassan, M.M. Ezzat, H. Amer, A.W. Nashed // Alexandria Engineering Journal. – 2011. – V. 50. – P. 431–439.
- Chebbi R., Qasim M., Jabbar N.A. Optimization of triethylene glycol dehydration of natural gas // Energy Reports. – 2019. – V. 5. – P. 723–732.
- Kamin, Z., Bono A., Leong L. Simulation and optimization of the utilization of triethylene glycol in a natural gas dehydration process // Chemical Product and Process Modeling. – 2017. – V. 12. – P. 27–35.
- Ghiase M., Zendejboudi A.D. Estimation of triethylene glycol (TEG) purity in natural gas dehydration units using fuzzy neural network // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2015. – V. 17. – P. 26–32.
- Kong Z.Y., Mahmoud A. Revamping existing glycol technologies in natural gas dehydration to improve the purity and absorption efficiency: Available methods and recent developments // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2018. – V. 56. – P. 486–503.
- Isa M.A., Eldemerdash U. Evaluation of potassium formate as a potential modifier of TEG for high performance natural gas dehydration process // Chemical Engineering Research and Design. – 2013. – V. 91. – P. 1731–1738.
- Лиинтин И.А., Ерофеев В.И., Джалилова С.Н. Особенности промышленной подготовки природного газа // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 6. – С. 96–102.
- Khan M., Atiquezzaman M., Maruf A. Optimizing effective absorption during wet natural gas dehydration by tri ethylene glycol // Journal of Applied Chemistry. – 2016. – V. 2. – P. 01–06.

Поступила 03.09.2022 г.

Прошла рецензирование 03.10.2022 г.

#### Информация об авторах

**Лиинтин И.А.**, аспирант отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Ерофеев В.И.**, доктор технических наук, профессор отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 66.074

## INFLUENCE OF TEMPERATURE AND PRESSURE CONDITIONS ON THE EFFICIENCY OF NATURAL GAS PREPARATION

**Iliia A. Liintin**<sup>1</sup>,  
quw\_06@mail.ru

**Vladimir I. Erofeev**<sup>1</sup>,  
erofeevvi@mail.ru

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance.** In recent years, in addition to the direct extraction of natural or associated petroleum gases from the subsoil, it is necessary to prepare them, ensure commercial quality, in particular, remove moisture, higher C<sub>2+</sub> hydrocarbons and other by-product gases that adversely affect the technical and economic performance of plants and contribute to the formation of crystalline hydrates. Due to the high quality requirements for treated natural gas and moisture content growth to increase the profitability of production, gas treatment technologies are constantly being improved and updated, including the absorption method of natural gas drying.

**Purpose:** to substantiate the effectiveness of the use of triethylene glycol as an absorbent in natural gas preparation by the absorption method at the existing integrated natural gas treatment plant.

**Object:** complex natural gas treatment unit.

**Method:** simulation of moisture absorption from natural gas in the UniSim Design software package.

**Results.** The influence of pressure and temperature, two absorbents: diethylene glycol and triethylene glycol, on the efficiency of gas treatment on the model of a natural gas treatment plant, an operating gas field, has been studied. The optimal temperature and pressure are selected, at which moisture absorption from gas will most effectively take place at decreasing pressure of the input raw material. It is shown that when triethylene glycol is used as an absorbent, the energy consumption for gas compression, its cooling before the absorber, and the consumption of the desiccant are significantly reduced compared to diethylene glycol.

### Key words:

absorption gas dehydration, dew point temperature, complex gas treatment plant, natural gas, triethylene glycol, diethylene glycol.

### REFERENCES

- Gritsenko A.I., Istomin V.A., Kulkov A.N., Suleimanov R.S. *Sbor i promyslovaya podgotovka gaza na severnykh mestorozhdeniyakh Ros-sii* [Gathering and conditioning of gas on the northern gas fields of Russia]. Moscow, Nedra Publ., 1999. 472 p.
- Al Ani Z.A., Gujarathi A.M. Simultaneous energy and environment-based optimization and retrofit of TEG dehydration process: an industrial case study. *Process Safety and Environment Protection*, 2021, vol. 147, pp. 972–984.
- Konga Z.Y., Melvin Wee X.J., Mahmouda A., Yu A. Development of a techno-economic framework for natural gas dehydration via absorption using tri-ethylene glycol: a comparative study between DRIZO and other dehydration processes. *South African journal of Chemical engineering*, 2020, vol. 31, pp. 17–24.
- STO Gazprom 089–2010. *Gaz goryuchiy prirodny, postavlyаемы i transportiruemы po magistralnym gazoprovodam. Tekhnicheskie usloviya* [Natural gas, supplied and transported through main gas pipelines. Technical conditions]. Moscow, OAO Gazprom Publ., 2010. 15 p.
- Kidnay A.J., Parrish W.R., McCartney D.G. *Fundamentals of natural gas processing*. Boca Raton, USA, CRC Press, 2014. 574 p.
- Brikov A.V., Magadova L.A. Major aspects of degradation of glycols used in oilfield systems. *Oil and Gas Journal*, 2018, vol. 119, no. 6, pp. 3–7. In Rus.
- Netusil M., Dittl P. Comparison of three methods for natural gas dehydration. *Journal of Natural Gas Chemistry*, 2011, vol. 20, pp. 471–476.
- Carroll J. *Natural gas hydrates: a guide for engineer*. Burlington, Gulf Professional Publishing, 2020. 400 p.
- Kidnay A.J., Parrish W.R., McCartney D.G. *Fundamentals of natural gas processing*. Boca Raton, USA, CRC Press publishing, 2012. 574 p.
- Lanchakov G.A., Kulkov A.N., Zibert G.K. *Tekhnologicheskie protsessы podgotovki prirodnogo gaza i metody rascheta oborudovaniya* [Technological processes of natural gas preparation and methods of equipment calculation]. Moscow, Nedra Publ., 2000. 279 p.
- Bahadori A., Vuthaluru H. Simple methodology for sizing of absorbers for TEG gas dehydration systems. *Energy*, 2009, vol. 34, pp. 1910–1916.
- Neagu M., Cursaru D. Technical and economic evaluations of the triethylene glycol regeneration processes in natural gas dehydration plants. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2017, vol. 37, pp. 326–339.
- Yang Liu, Xuewen Cao, Jian Yang, Yuxuan Li, Jiang Bian. Energy separation and condensation effects in pressure energy recovery process of natural gas supersonic dehydration. *Energy Conversion and Management*, 2021, vol. 245, pp. 557–572.
- Perry R., Green D.W. *Perry's chemical engineers' handbook*. New York, McGRAW-HILL, 2008. 2403 p.
- Farag Hassan A.A., Ezzat M.M., Amer H., Nashed A.W. Natural gas dehydration by desiccant materials. *Alexandria Engineering Journal*, 2011, vol. 50, pp. 431–439.
- Chebby R., Qasim M., Jabbar N.A. Optimization of triethylene glycol dehydration of natural gas. *Energy Reports*, 2019, vol. 5, pp. 723–732.
- Kamin Z., Bono A., Leong L. Simulation and optimization of the utilization of triethylene glycol in a natural gas dehydration process. *Chemical Product and Process Modeling*, 2017, vol. 12, pp. 27–35.
- Ghiase M., Zendejboudi A.D. Estimation of triethylene glycol (TEG) purity in natural gas dehydration units using fuzzy neural network. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, vol. 17, pp. 26–32.
- Kong Z.Y., Mahmoud A. Revamping existing glycol technologies in natural gas dehydration to improve the purity and absorption efficiency: available methods and recent developments. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, vol. 56, pp. 486–503.
- Isa M.A., Eldemerdash U. Evaluation of potassium formate as a potential modifier of TEG for high performance natural gas dehydration process. *Chemical Engineering Research and Design*, 2013, vol. 91, pp. 1731–1738.
- Liintin I.A., Erofeev V.I., Dzhililova S.N. Features of commercial treatment of natural gas. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 6, pp. 96–102. In Rus.
- Khan M., Atiquezzaman M., Maruf A. Optimizing effective absorption during wet natural gas dehydration by tri ethylene glycol. *Journal of Applied Chemistry*, 2016, vol. 2, pp. 01–06.

Received: 3 September 2022.

Reviewed: 3 October 2022.

### Information about the authors

**Iliia A. Liintin**, post-graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Vladimir I. Erofeev**, Dr. Sc., academician of RANS, professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 624.131

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СКАЛЬНО-ОБВАЛЬНЫХ УЧАСТКОВ НА ПЕРЕГОНЕ МУГУЛЕ-МУКУНГА ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Сахаровский Александр Владимирович<sup>1</sup>,  
sakharovskiy\_sgt@bk.ru

Строкова Людмила Александровна<sup>2</sup>,  
sla@tpu.ru

<sup>1</sup> ООО «НПП Инженерная защита»,  
Россия, 630091 г. Новосибирск, ул. Советская, 52, оф. 310.

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность** изучения гравитационных процессов заключается в том, что они приводят к чрезвычайным ситуациям с угрозой разрушения сооружений, использования земель, безопасности людей. Особые трудности при изучении скально-обвальных склонов вызывает вопрос о достоверном количественном прогнозе их устойчивости.

**Целью** данного исследования является оценка инженерно-геологических и гидрогеологических условий опасных склонов и расчет их устойчивости.

**Объектом** исследования является геологическая среда района трассы железной дороги. Рассмотрены основные факторы, влияющие на развитие гравитационных процессов: геоморфологические и тектонические условия; литологический состав; физико-механические свойства пород, мерзлотные, гидрогеологические и гидрогеологические условия района.

**Методы:** краткий обзор соответствующей литературы; анализ данных инженерно-геологических изысканий; расчеты устойчивости склонов.

**Результаты.** Дана характеристика основных факторов оползневой процессу данной территории, приведены результаты расчета устойчивости склонов по опасным сечениям различными методами. Согласно проведенным расчетам устойчивости, рассматриваемые скальные откосы в статическом состоянии и при проектной сейсмической ситуации являются устойчивыми по всем сечениям. Согласно результатам обследования с проведенными замерами трещиноватости на эталонных площадках, предполагаемая мощность потенциального захвата блоков породы при возможном возникновении обвалов составляет 2,0 м. Она определена в полевых условиях по результатам измерения степени трещиноватости массива.

**Выводы.** Основными причинами деформаций являются: крутизна и экспозиция склонов; слабобитуминозные юрские песчаники, слагающие весь склон, и характер их трещиноватости; подрезка крутых склонов в нижней части дорогой. Предложены мероприятия по защите железнодорожных путей.

### Ключевые слова:

инженерно-геологические условия, региональные факторы, грунт, оползень, расчет устойчивости склона, расчетная модель.

### Введение

Выявление участков, угрожающих обвалами и вывалами, оценка степени их угрозы для дорог занимают одно из центральных мест при их проектировании, строительстве и эксплуатации. Оценка устойчивости склонов является сложной задачей из-за трудностей установления формы и положения потенциальной поверхности скольжения, распределения нормальных и касательных сил в грунтовой массе, выбора адекватной математической модели, интерпретации геологического строения и распределения свойств грунтов в склоновом массиве. Изучением гравитационных склоновых процессов на протяжении длительного времени занимались многие знаменитые инженеры-геологи: А.П. Павлов (1903, 1935), А.Н. Семихатов (1914), Н.Ф. Погребов (1915), М.И. Декабрун и П.П. Быков (1926), Л.Н. Бернацкий (1935) [1], Г.С. Золотарев (1949–1959) [2], Е.П. Емельянова (1972) [3]. Изучению основных закономерностей формирования оползней, их пространственного распределения в связи с гидрометеорологическими условиями посвящены работы [4–10], моделированию их активности – [10–15], роли техногенных факторов в развитии и активизации оползней,

контролю их состояния и разработки защитных мероприятий – [11–29]. Для расчета устойчивости откосов к настоящему времени разработано более 100 способов, приемов и схем [30].

Целью данного исследования является анализ инженерно-геологических и гидрогеологических условий скально-обвального участка железной дороги в Верхнебуреинском районе Хабаровского края и прогноз развития смещения грунтов.

### Методы исследования

Исследование включало анализ литературных и фондовых материалов, полученных при инженерно-геологических изысканиях, проведенных летом 2021 г. [31]; оценку напряженно-деформированного состояния грунтового массива, выяснение механизма, факторов и закономерностей развития скально-обвальных участков, проведенные весной 2022 г. в отделении геологии ТПУ.

В ходе инженерно-геологических изысканий выполнены следующие виды работ:

1. Инженерно-геологическая съемка с оценкой степени опасности возникновения деформаций отко-

сов, оценка трещиноватости массива, определение местоположения расчетных сечений, проведение опытов по сбрасыванию камней для установки траектории, скорости их падения и величины «отскока» на двух скально-обвальных участках.

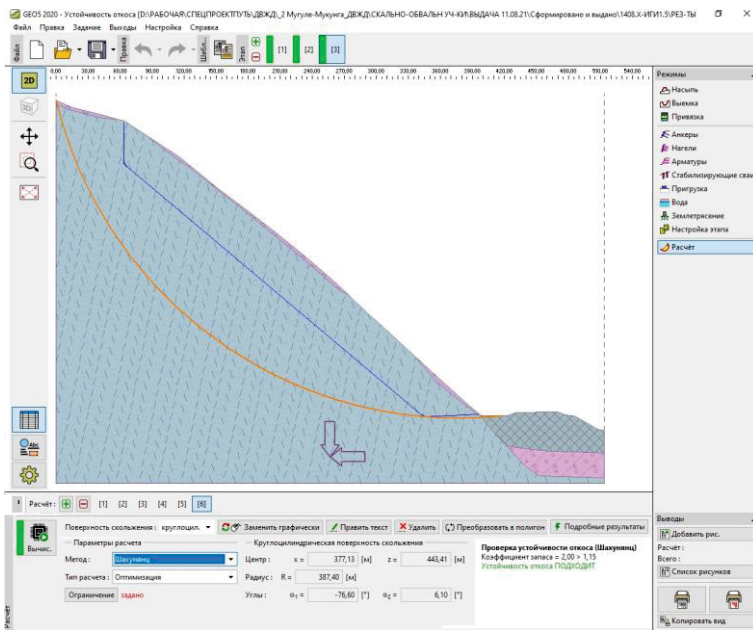
2. Буровые работы для изучения условий залегания скальных грунтов и подземных вод, отбора проб

для определения состава, состояния и физико-механических характеристик грунтов. Бурение скважин глубиной до 6 м проводилось в труднодоступных местах диаметром до 160 мм самоходными буровыми установками, а также переносными буровыми установками типа УКБ 12/25, «ХИЛТИ DD 200» (рис. 1, а).

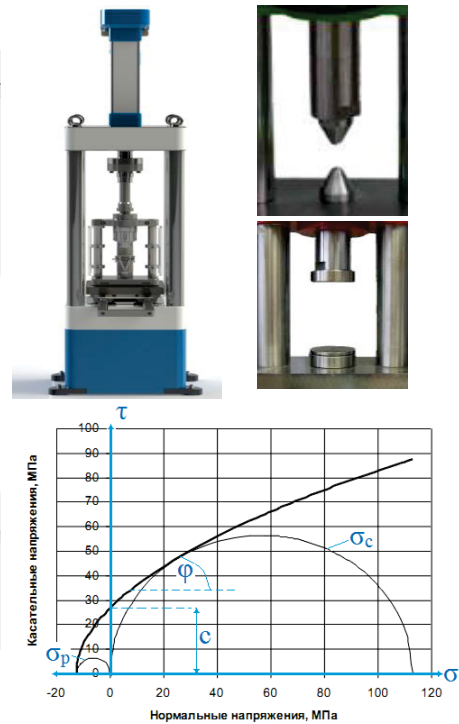


а/а

б/б



в/с



г/д

Рис. 1. Методы исследования: а) буровые работы переносной установкой алмазного бурения; б) сейсморазведочные работы; в) расчет устойчивости откоса в программе GEO5; г) лабораторные работы по определению физико-механических свойств песчаников и диаграмма О.Х. Мора с линейной аппроксимацией паспорта прочности

Fig. 1. Methods of research: а) drilling operations with a portable diamond drilling rig; б) seismic exploration; в) calculation of slope stability in the GEO5 program; д) laboratory work to determine the physical and mechanical properties of sandstones and the O.C. Mohr diagram with a linear approximation of the strength data

3. Опробование и лабораторные исследования образцов грунтов и воды. Был выполнен 31 комплекс определений физических свойств и механической прочности скальных пород и 28 прочностных испытаний скального грунта на одноосное сжатие  $\sigma_c$  и растяжение  $\sigma_r$  горной породы с построением диаграммы Мора-Кулона (рис. 1, з). На диаграмме показаны круги одноосного сжатия и растяжения, а также касательная к обоим кругам, по последней определялись величина удельного сцепления породы (с) и угол внутреннего трения (ф). Испытания горных пород проводились в соответствии нормативными документами [32, 33].
4. Сейсмические исследования. Использовалась сейсморазведочная коса с 24-ми выводами на сейсмоприемники (рис. 1, б). Шаг пунктов приема составил 2 м. Возбуждение упругих волн производилось ударами кувалды по титановой плашке. Шаг пунктов возбуждения составил 2 м. Каждое физическое наблюдение выполнялось с накоплением 8–12 воздействий в зависимости от качества сигнала. Длина записи составила 1 с, шаг дискретизации – 0,125 мс. Для регистрации упругих волн применялись одиночные сейсмоприемники электродинамического типа марки GS-One (4,5 Гц), позволяющие принимать упругие волны в диапазоне 1–250 Гц. Наблюдения проводились путем поочередной регистрации: Р-волн при вертикально направленных ударах и приеме на вертикальных сейсмоприемниках; S-волн при горизонтально направленных перпендикулярно линии профиля встречных ударах и приеме на геофоны горизонтального исполнения. Определение прочностных характеристик по данным сейсмических исследований проводилось в соответствии с методическими указаниями [34].
5. Расчёты устойчивости склонов по 6 сечениям. Расчёты выполнялись для двух различных расчётных схем дестабилизации откосов: потенциально неустойчивых и подверженных разрушению скальных откосов. Расчеты устойчивости скальных откосов выполнялись в программе GEO5 2020 «Устойчивость откоса» (рис. 1, в).
6. Выяснение морфометрических особенностей склона, вклада инженерно-геологических условий в степень оползневой опасности. Выполнено в ТПУ с использованием программного комплекса ArcGIS 10.8.2 исходя из рекомендаций [35–40].

#### **Характеристика инженерно-геологических условий объекта**

В административном отношении объект исследований располагается в Верхнебуреинском районе Хабаровского края на участке Ургал–Комсомольск-на-Амуре Дальневосточной железной дороги. Географическое положение – центральная часть Хингано-Буреинского нагорья, охватывающая большую часть бассейна р. Буреи. Рассматриваемая территория расположена в таежной зоне. Леса здесь занимают до 85 % поверхности [31].

*Геоморфологические особенности.* Основным крупным орографическим элементом является водораздельный Буреинский хребет, разделяющий верхнюю и нижнюю части бассейна Амура, представляющий собой горную систему, состоящую из отдельных хребтов и горных групп. Водораздельная часть хребта имеет общее северо-восточное направление. Его максимальная высота 2071 м. Склоны спускаются в долины под углом от 25° до 45°. Сложен хребет из сланцев, песчаников, гнейсов, прорванных гранитами. Вершины хребта куполообразные с гольцовыми террасами. Основной особенностью рельефа является сочетание высоких горных хребтов и сопок с речными долинами, занятыми аккумулятивными террасами и развитыми поймами, по которым текут ручьи и реки Буреинского бассейна, такие как Ургал, Чегдомын, Солони и др. Морфометрические характеристики территории представлены на рис. 2.

В *тектоническом* плане рассматриваемая территория относится к прогибу, занимающему окраинное положение на Буреинском массиве. Сводовое поднятие Буреинского массива – крупная глыба поздних байкалитид, испытавшая в позднем палеозое и мезозое явления тектономагматической активизации. В позднем палеозое явление активизации выразилось во внедрении по крупным разломам огромных масс гранитоидов. С позднемезозойскими движениями связаны поднятия, активный вулканизм и формирование вдоль глубинных разломов наложенных прогибов. Буреинский прогиб вытянут в меридиональном направлении, расположен между Туранским блоком и Чегдомыньским выступом. Углы падения слоев на восточном борту прогиба достигают 40°, в центральной и западной частях колеблются в пределах 5...15°.

*Геологическое строение верхней части разреза.* Четвертичные отложения распространены практически повсеместно. На изучаемой территории они представлены делювиально-солифлюкционными, десерпционно-делювиальными, аллювиальными отложениями поймы, техногенными грунтами.

*Склоновые делювиальные образования* ( $dQ_{III-N}$ ) почти сплошным чехлом мощностью до 10 м покрывают склоны гор. Это преимущественно глыбовые грунты и щебенистые грунты с супесчаным заполнителем, реже дресвяные грунты с суглинистым заполнителем и суглинки дресвяные.

*Делювиально-солифлюкционные отложения* ( $d,sQ_{III-N}$ ) распространены преимущественно в северо-западной части изучаемого участка в наиболее низкогорной части рельефа, где занимают выположенные части склонов речных долин. Сложены суглинками, супесями с примесью дресвы и щебня, сформировавшиеся на участках развития сезонной и многолетней мерзлоты под воздействием криогенных факторов и сил тяжести в условиях переувлажненных грунтов. Сортировка обломочного материала обычно отсутствует или проявлена очень плохо. Поверхность отложений мелкобугристая с натечными террасами высотой до 1 м. Мощность отложений не превышает 2 м.



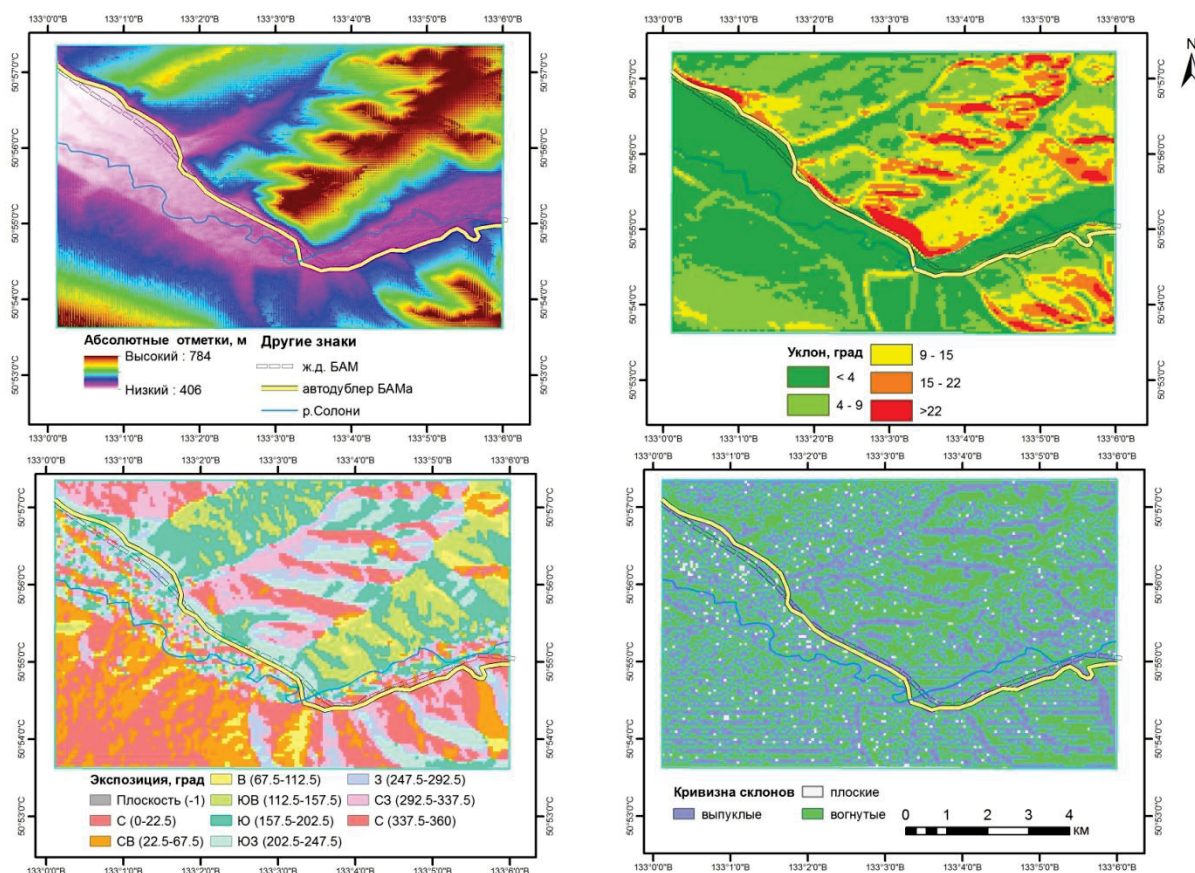


Рис. 2. Морфометрические характеристики территории

Fig. 2. Morphometric characteristics of the territory

Десертционно-делювиальные отложения ( $d, drQ_{III-H}$ ) широко распространены на выположенных склонах. Они представлены суглинками, супесями, дресвой и щебнем с редкими глыбами, сформировавшимися в результате денудации и перемещения обломочного материала по склонам под воздействием температурных, гидрогенных и криогенных факторов, а также гравитации. Мощность отложений составляет 1,5...2,0 м, но в основании склонов достигает 3...5 м. Основание разреза представлено гранитами Тырмобуреинского габброгранодиорит-гранитового комплекса ( $\gamma C_{2-3}t_1$ ).

Аллювиальные отложения ( $aQ_H$ ) слагают низкую и высокую поймы и русло рек. Аллювий характеризуется весьма грубым составом материала, невыдержанностью строения (небольшой протяженностью фаций, их быстрой сменой) и небольшой мощностью (3...10 м). Русловые фации представлены галечниками с супесчаным заполнителем, с примесью валунов, реже глыб и щебня.

Техногенные грунты ( $tQ_H$ ) представлены балластом щебеночным с песчаным и супесчаным заполнителем до 20 % и насыпным галечниковым грунтом с песчаным заполнителем до 30 %.

В гидрогеологическом отношении исследуемая территория относится к Амурской гидрогеологической складчатой области первого порядка Буреинской гидрогеологической области второго порядка. Для рассматриваемой территории характерно глубокое се-

зонное промерзание грунтов, что оказывает существенное влияние на формирование и циркуляцию подземных вод. В зависимости от соотношения с многолетнемерзлыми грунтами выделяются надмерзлотные, межмерзлотные и подмерзлотные воды.

Надмерзлотные воды, формирующиеся над толщей мерзлых пород, распространены повсеместно и связаны с водопроницаемыми пористыми (трещиноватыми) породами различного возраста и состава. Источником питания для них служат атмосферные осадки, поверхностные водотоки, реже подмерзлотные воды, проникающие через сквозные талики.

Характерной особенностью гидрогеологических условий района работ является развитие верховодки (вод приповерхностного стока), приуроченной к делювиальным супесям с щебнем и залегающей на глубинах 0,3...5 м. Образование верховодки связано с неглубоким просачиванием атмосферных осадков и наличием водоупора, в качестве водоупора могут выступать как водонепроницаемые тонкодисперсные литологические разности, так и многолетнемерзлые породы. Она проявляется лишь в летний период.

Выделяется водоносный горизонт четвертичных аллювиальных отложений, приуроченный к образованиям пойменных и надпойменных террас в долинах рек. Воды безнапорные и нередко связаны с подстилающими водоносными горизонтами, с которыми имеют единый уровень подземных вод. Водоупором служит сезонномерзлый слой.

Воды делювиальных и аллювиальных отложений пластово-поровые.

Межмерзлотные воды, находящиеся внутри криолитозоны, обычно формируются в обводненных линзах, трещинах и пустотах в толще промороженных пород и имеют локальный характер распространения. Подмерзлотные воды, залегающие под нижней поверхностью криолитозоны, широко распространены и в отличие от первых двух постоянно находятся в жидкой фазе и имеют напорный характер. Питание их происходит за счет атмосферных осадков и подземных вод, перетекающих из соседних структур.

Водоносный комплекс юрских и нижнемеловых отложений в пределах Буреинского артезианского бассейна наиболее водообильный. Воды этого комплекса напорные. В поймах рек в пределах сквозных таликовых зон воды безнапорные и имеют общий уровень с подземными водами аллювиальных отложений. Воды юрских и меловых осадочных пород пластово-трещинные. Подземные воды в пределах

изучаемых площадок не встречены. Грунтовый массив представляет собой активную зону аэрации и плоскостного смыва. Скорость фильтрации зоны аэрации проницаемой, хорошо дренируемой толщи составляет 20 м/сут.

*Геокриологические условия.* Район исследования приравняется к районам Крайнего Севера и относится к району островного распространения многолетнемерзлых грунтов.

Глубина залегания кровли многолетнемерзлых пород варьирует от 0,5 до 3,5 м. Геотермическими наблюдениями установлено, что температура пород многолетнемерзлой толщи колеблется от минус 0,2 до минус 1,6 °С. Мощность многолетнемерзлых грунтов в среднем около 30 м, но в отдельных случаях достигает 60, и даже 100 и более метров.

По *литологическому составу, генезису, физико-механическим свойствам* выделено 12 инженерно-геологических элементов (ИГЭ) и один слой. Их характеристика приведена в табл. 1.

**Таблица 1.** Сводная характеристика инженерно-геологических элементов

**Table 1.** Summary characteristics of engineering-geological units

Стратиграфо-генетический комплекс Stratigraphic-genetic complex	Средняя мощность ИГЭ, м Average thickness of the unit, m	Номер ИГЭ Unit number	Описание грунтов Soil description	Показатели характеристик грунтов для выделения инженерно-геологических элементов Indicators of soil characteristics for allocation of engineering and geological units	Расчетные значения характеристик грунтов, рекомендуемые для проектирования оснований и фундаментов Calculated values of soil characteristics recommended for the design of foundations
hQH	0,2	0	Почвенно-растительный слой с корнями трав, деревьев Soil-vegetable layer with roots of grasses, trees	–	–
tQH	0,3	t1ж	Дресвяный грунт с суглинистым твердым заполнителем, неоднородный, малой степени водонасыщения, непучинистый Silty fine gravel, well graded, low degree of water saturation, not-heaving	$\rho = 2,05 \text{ т/м}^3$ $W=0,11, e=0,461; Sr=0,64,$ у заполнителя $I_p=0,10, I_f = -0,59$	$\rho_i=2,05 \text{ т/м}^3, \rho_{II}=2,05 \text{ т/м}^3,$ $\gamma_i=19,89 \text{ кН/м}^3, \gamma_{II}=18,7 \text{ кН/м}^3,$ $c_i=25 \text{ кПа}, c_{II}=26 \text{ кПа},$ $\phi_i=25^\circ, \phi_{II}=27^\circ, E=34,8 \text{ МПа}$
bQ	1,5	tb36	Торф искусственно погребенный, средне-разложившийся, осушенный Peat artificially buried, medium-decomposed, drained	$\rho=1,12 \text{ т/м}^3$ $W=140 \%,$ $e=2,61, Sr=0,91$	$\rho_i=1,10 \text{ т/м}^3, \rho_{II}=1,11 \text{ т/м}^3,$ $\gamma_i=11,1 \text{ кН/м}^3, \gamma_{II}=11,1 \text{ кН/м}^3,$ $c_i=0 \text{ кПа}, c_{II}=0 \text{ кПа},$ $\phi_i=13,5^\circ, \phi_{II}=13,8^\circ, E=1,5 \text{ МПа}$
aQH	5	a19б	Галечниковый грунт неоднородный с текучим супесчаным заполнителем, со слабо выветрелыми обломками средней прочности, незасоленный, непучинистый Soft sandy silty cobbles with crushed stone, unsalted, not-heaving	$\rho=2,18 \text{ т/м}^3,$ $W=0,244, e=0,55, Sr=1,$ у заполнителя $I_p=0,055;$ $\Pi=1,3$	$\rho_i=2,17 \text{ т/м}^3, \rho_{II}=2,18 \text{ т/м}^3,$ $\gamma_i=25,77 \text{ кН/м}^3, \gamma_{II}=19,3 \text{ кН/м}^3,$ $c_i=0,001 \text{ кПа}, c_{II}=0,001 \text{ кПа},$ $\phi_i=31^\circ, \phi_{II}=32^\circ,$
dcQIII-H	0,85	dc2a	Глыбовой грунт с супесчаным твердым заполнителем, с щебнем до 20 % Sandy clayey boulders with crushed stone up to 20 %	$\rho=1,95 \text{ т/м}^3$ $W=0,12, e=0,557, Sr=0,58,$ у заполнителя $I_p=0,24,$ $\Pi=0,18$	$\rho_i=1,88 \text{ т/м}^3, \rho_{II}=1,90 \text{ т/м}^3,$ $\gamma_i=22,05 \text{ кН/м}^3, \gamma_{II}=18,6 \text{ кН/м}^3,$ $c_i=3 \text{ кПа}, \phi_i=28^\circ$
J3	3,4	21в	Песчаник слабовыветрелый, сильнотрещиноватый, средней прочности Sandstone weakly weathered, strongly fractured, of medium strength	$\rho=2,56 \text{ т/м}^3$	$\gamma_i=25,3 \text{ кН/м}^3,$ $c_i=90 \text{ кПа}, \phi_i=38^\circ$
	3,1	21г	Песчаник слабовыветрелый, сильнотрещиноватый прочный Sandstone weakly weathered, strongly fractured, strong	$\rho = 2,64 \text{ т/м}^3$	$\gamma_i=25,7 \text{ кН/м}^3,$ $c_i=163 \text{ кПа},$ $\phi_i=39^\circ$

*Геологические процессы и явления.* На участке отмечены следующие неблагоприятные природные

процессы: землетрясения; морозное пучение грунтов; эрозия плоскостная; склоновые процессы.

**Землетрясения.** С учетом комплекта карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации (ОСР-2015) вероятность возможного превышения интенсивности землетрясений в течение 50 лет составляет: 7 баллов – по карте А (10 %), 8 баллов – по карте В (5%) и 8 баллов – по карте С (1 %) (г. Чегдомын, Хабаровский край, СП 14.13330.2018).

**Морозное пучение.** Территория участка относится к району глубокого сезонного промерзания грунтов. При сезонном промерзании и оттаивании грунтов на участке проявляются мерзлотные деформации в основании сооружений.

В зону сезонного промерзания в пределах склоновой части попадают грунты ИГЭ-дс2а. Глыбовый грунт с супесчаным твёрдым заполнителем до 5–10 %, грунт слабопучинистый ( $D=1,1$ ).

**Эрозия** плоскостная развита на подходах к коренным склонам. За счет средних уклонов свыше  $45^\circ$  (1:1)

поверхностный сток хорошо обеспечен, преобладают гравитационные процессы.

На крутых склоновых участках в периоды обильных ливней и снеготаяния в большей мере наблюдается разгрузка по мелким и глубоким тальвегам, русла и борты которых сложены крупнообломочным материалом.

В процессе деятельности эрозионных процессов по откосам проходит приповерхностный плоскостной смыв с выносом из крупнообломочных грунтов глинистой и пылеватой фракции.

**Обвалы и осыпи.** По результатам инженерных изысканий выделено два опасных участка (рис. 3), представляющих собой скальные выемки с характерными признаками трещиноватости массива и, как следствие, возможного отчленения и перемещения отдельных глыб или группы обломочного материала с потенциальным перемещением его к подножью выемки на действующую линию однопутной железной дороги.



Рис. 3. Схема расположения объекта

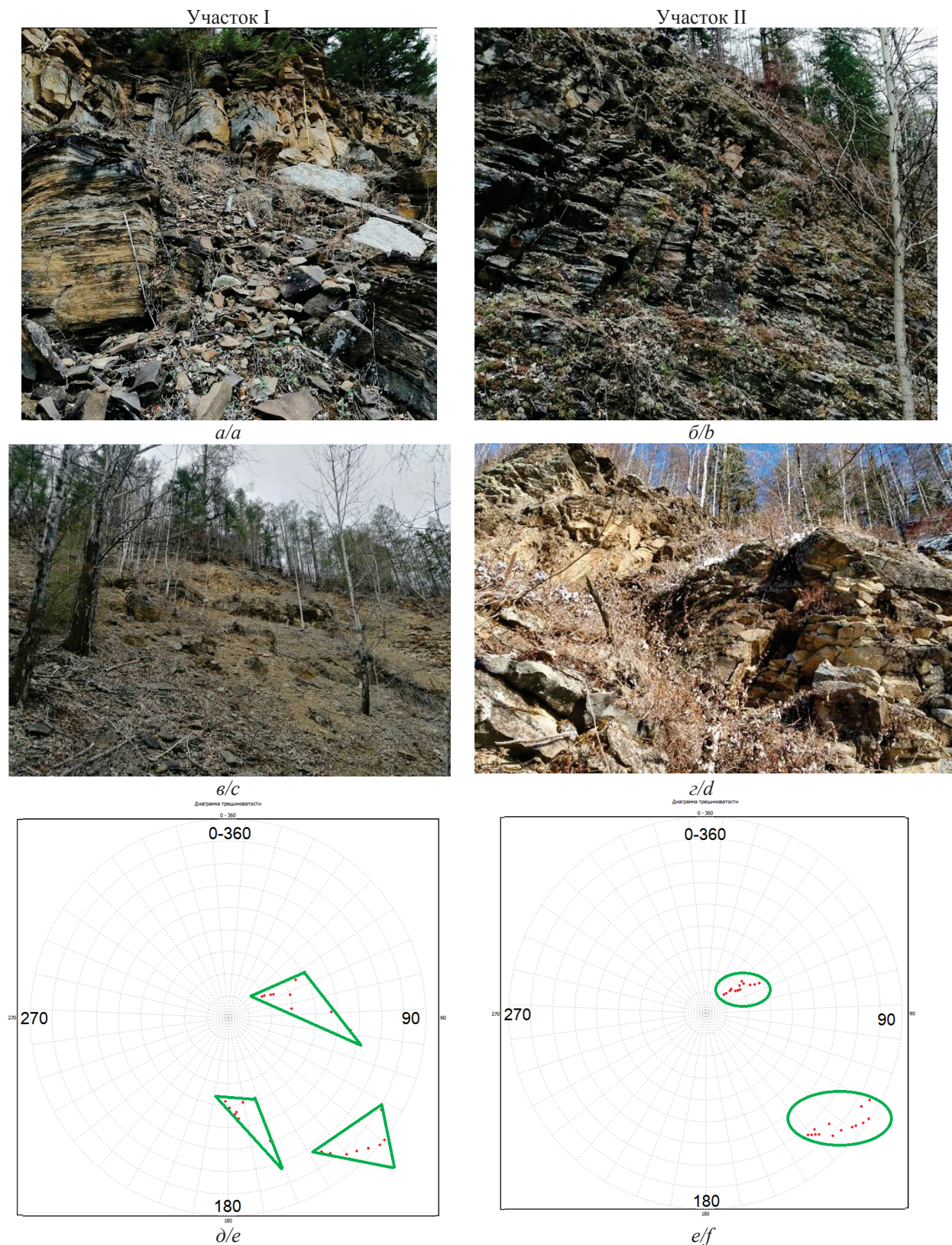
Fig. 3. Object location

**Участок I** длиной 150 м. Экспозиция склона юго-западная. Поверхностный сток хорошо обеспечен. Отмечаются отдельные выходы скальных пород, представленные песчаником слабыветрелым, средней прочности и прочным, сильнотрещиноватым (рис. 4, а). В толще песчаников отмечаются прослойки аргиллитов пониженной прочности, раздробленных, мощностью до 0,1...0,2 м.

На поверхности коренного массива отмечаются отдельные шлейфы глыбовых грунтов, а также конусы выноса обломочного материала на выположенных участках склона (рис. 4, в). Делювиально-колювиальный шлейф сложен глыбовым грунтом с супесчаным твёрдым заполнителем до 10...15 %. Преоб-

ладающая фракция (более 50 %) глыбового грунта составляет 200...250 мм. Площадь локальных шлейфов не превышает  $10 \text{ м}^2$ . Скальный массив интенсивно трещиноватый, среднее расстояние между трещинами около 200 мм. Выделены три системы трещиноватости, взаимно пересекающихся друг с другом, которые образуют плитчатые и остроугольные формы блоков (рис. 4, д). Почвенно-растительный слой с корнями растений развит фрагментарно, а также местами имеет мощность менее 3...4 см.

Ниже дана оценка состояния скальных склонов по приложению Г СП 116.13330.2012 в зависимости от их морфометрических и инженерно-геологических характеристик.



**Рис. 4.** Характеристики участков: состояние породного массива: а) I участка; б) II участка; в) вид коренного склона с делювиально-коллювиальными шлейфами обломочного материала; г) подготовка вывалов пород; диаграмма трещиноватости: д) I участка; е) II участка

**Fig. 4.** Characteristics of the plots: the state of the rock mass: a) site I; b) site II; c) type of the root slope with deluvial-colluvial plumes of detrital material; d) preparation of rock falls; fracture diagram: e) site I; e) site II

**Морфологическая характеристика участка:** высота откоса >12 м, 6 баллов; крутизна 30–45°, 2 балла; форма поверхности неровная и с выступами, 3 балла; расстояние от подошвы откоса до защищаемого объекта >4 м, 0 баллов; расстояние от поверхности уровня подошвы откоса до основания защищаемого объекта >1,5 м, 0 баллов.

**Инженерно-геологическая характеристика:** среднее количество трещин на 1 м 2–10, 1 балл; направление угла падения трещин по отношению к защищаемому объекту <20°, 0 баллов; ширина раскрытия трещин до 0,5 см, 1 балл; глубина трещин от 1,0...10 м, 2 балла; обводнённость трещин отсутствует, 0 баллов; заполнитель трещин (мелкозем) – лёгкие признаки, 1 балл; характер поверхности стенок трещин – неровные шероховатые, 0 баллов; прочность грунтов на сжатие – средней прочности, 2 балла; выветриваемость (группа грунтов) – II, согласно лабораторным данным 25 циклов попеременного высушивания и увлажнения, потеря образцов в массе при просеивании через сито диаметром 10 мм – 67 %, 1 балл; выветриваемость грунтов откоса в момент обследования – слабая степень выветрелости, 1 балл; объём обвально-осыпных явлений за год на 1 м длины выемки – нет, 0 баллов; сейсмичность в баллах – 8, 2 балла.

Итоговая оценка степени опасности нарушения устойчивости скальных откосов и склонов: 22 балла. Степень опасности – неопасные. Класс откоса по потенциальной опасности – III.

**Участок II** длиной 190 м. Участок коренного склона имеет среднюю крутизну около 45...50° (1:1 – 1:0,84) Экспозиция склона юго-западная. Поверхностный сток хорошо обеспечен. Обнажениями скальных пород покрыто до 25–30 % всего изучаемого участка. Выходы скальных пород представлены песчаником слабыветрелым, прочным и в меньшей степени средней прочности, сильнотрещиноватым, в отдельных обнажениях среднетрещиноватым (рис. 4, б). Среднее расстояние между трещинами всех систем около 200 мм. Отмечены локальные очаги подготовки к обвалу глыбового материала (рис. 4, з). Коренной склон имеет отдельные шлейфы и конусы выноса делюви-

ально-коллювиальных отложений, представленных глыбовым грунтом с супесчаным заполнителем до 5...10 % мощностью от 0,8 до 1,6 м. Формирование покровного чехла, представленного глыбовым грунтом, обусловлено прежде всего локальными зонами выколаживающихся участков. Выделены две системы трещиноватости, взаимно пересекающихся друг с другом, которые образуют преимущественно параллелепипедные формы блоков (рис. 4, е).

**Морфологическая характеристика:** высота откоса >12 м, 6 баллов; крутизна 45–60°, 4 балла; форма поверхности неровная и с выступами, 3 балла; расстояние от подошвы откоса до защищаемого объекта >4 м, 0 баллов; расстояние от поверхности уровня подошвы откоса до основания защищаемого объекта >1,5 м, 0 баллов.

**Инженерно-геологическая характеристика:** среднее количество трещин на 1 м 2–10, 1 балл; направление угла падения трещин по отношению к защищаемому объекту <20°, 0 баллов; ширина раскрытия трещин до 0,5 см, 1 балл; глубина трещин от 1,0–10 м, 2 балла; обводнённость трещин отсутствует, 0 баллов; заполнитель трещин (мелкозем) – лёгкие признаки, 1 балл; характер поверхности стенок трещин – неровные шероховатые, 0 баллов; прочность грунтов на сжатие – средней прочности, 2 балла; выветриваемость (группа грунтов) – II, согласно лабораторным данным 22 цикла попеременного высушивания и увлажнения, потеря образцов в массе при просеивании через сито диаметром 10 мм – 62 %, 1 балл; выветриваемость грунтов откоса в момент обследования – слабая степень выветрелости, 1 балл; объём обвально-осыпных явлений за год на 1 м длины выемки – нет, 0 баллов; сейсмичность в баллах – 8, 2 балла.

Итоговая оценка степени опасности нарушения устойчивости скальных откосов и склонов: 24 балла. Степень опасности – опасные. Класс откоса по потенциальной опасности – II.

На обоих участках обнажений рекомендуется уборка разрушенного массива на глубину (толщ скальной стены) до 2,0 м, а также укрепление скального массива анкерами и габионной сеткой.

**Таблица 2.** Результаты статистической обработки прочностных характеристик скальных грунтов, полученных в водонасыщенном состоянии

**Table 2.** Results of statistical processing of the strength characteristics of rocks obtained in a water-saturated state

Краткая характеристика скальных грунтов Description of rocks	Параметр Parameter	Обозначение Designation	Сцепление $C_{sat}$ , МПа Cohesion $C_{sat}$ , MPa	Угол внутреннего трения $\varphi_{sat}$ , град Internal friction angle, $\varphi_{sat}$ , degree
ИГЭ-21в Песчаник слабыветрелый, сильнотрещиноватый, средней прочности is Weakly matured, strongly fractured, sandstone of medium strength	Нормативное значение/Average value	Xn	10,25	38
	Среднеквадратичное отклонение Standard deviation	S	1,898	1,246
	Коэффициент вариации Coefficient of variation	v	0,19	0,03
	Количество определений Count of numbers	n	8	8
ИГЭ-21г Песчаник слабыветрелый, сильнотрещиноватый, прочный Weakly matured, strongly cracked, strong sandstone	Нормативное значение/Average value	Xn	17,52	39
	Среднеквадратичное отклонение Standard deviation	S	2,325	1,414
	Коэффициент вариации Coefficient of variation	v	0,13	0,04
	Количество определений Count of numbers	n	6	6

### Расчёты устойчивости грунтов

Расчёты устойчивости грунтов проводились в программном комплексе Geo5 «Скальный откос». Расчёты в программе GEO5 v.18 выполнены по заданной поверхности скольжения методами Бишопа, Феллениуса–Петерсона, Спенсера, Моргенштерна–Прайса, Янбу, Шахунянца. Для расчетов выбирались наиболее характерные разрезы по линиям максимального уклона поверхности склонов. Положение расчетных сечений устойчивости склонов приведены на рис. 3.

Для назначения исходных данных было выполнено сопоставление значений лабораторных показателей (табл. 2) и показателей свойств грунтов, полученных при сейсморазведке [30, 31]. Последние оказались выше показателей лабораторных данных, поэтому не использовались в расчетах.

Результаты расчетов устойчивости склонов различными методами по шести расчетным сечениям приведены в табл. 3.

**Таблица 3.** Расчетные значения коэффициента устойчивости различными методами

**Table 3.** Calculated values of the stability coefficient by different methods

Номер расчетного сечения Number of the section	Методы расчета устойчивости Methods of stability calculation	Сочетание нагрузок; Проектная ситуация Combination of loads; Project situation		
		Основное; Постоянная Basic; Permanent	Особое; Сейсмика 7 баллов Special; Seismics 7 points	Особое; Сейсмика 8 баллов Special; Seismics 8 points
1-1	Бишопа/Bishop	1,43	1,36	1,30
	Феллениуса–Петерсона Fellenius–Petterson	1,40	1,33	1,27
	Спенсера/Spencer	1,43	1,36	1,30
	Янбу/Janbu	1,43	1,36	1,30
	Моргенштерна–Прайса Morgenstern–Price	1,43	1,36	1,30
	Шахунянца/Shahunjanc	1,40	1,33	1,27
2-2	Бишопа/Bishop	2,30	2,19	2,09
	Феллениуса–Петерсона Fellenius–Petterson	2,17	2,06	1,97
	Спенсера/Spencer	2,30	2,19	2,09
	Янбу/Janbu	2,28	2,17	2,07
	Моргенштерна–Прайса Morgenstern–Price	2,33	2,22	2,13
	Шахунянца/Shahunjanc	2,24	2,11	2,00
3-3	Бишопа/Bishop	1,94	1,83	1,73
	Феллениуса–Петерсона Fellenius–Petterson	–	1,83	1,73
	Спенсера/Spencer	1,94	1,83	1,73
	Янбу/Janbu	1,95	1,83	1,73
	Моргенштерна–Прайса Morgenstern–Price	1,95	1,84	1,74
	Шахунянца/Shahunjanc	1,94	1,83	1,73
4-4	Бишопа/Bishop	5,52	4,47	3,72
	Феллениуса–Петерсона Fellenius–Petterson	5,53	4,57	3,89
	Спенсера/Spencer	–	–	–
	Янбу/Janbu	–	–	–
	Моргенштерна–Прайса Morgenstern–Price	–	–	–
	Шахунянца/Shahunjanc	5,56	5,31	5,09
5-5	Бишопа/Bishop	2,43	1,91	1,55
	Феллениуса–Петерсона Fellenius–Petterson	2,43	1,96	1,65
	Спенсера/Spencer	2,43	–	–
	Янбу/Janbu	2,43	–	–
	Моргенштерна–Прайса Morgenstern–Price	2,43	–	–
	Шахунянца/Shahunjanc	2,42	2,30	2,18
6-6	Бишопа/Bishop	5,58	4,58	3,73
	Феллениуса–Петерсона Fellenius–Petterson	5,87	4,65	3,85
	Спенсера/Spencer	5,88	–	–
	Янбу/Janbu	5,88	–	–
	Моргенштерна–Прайса Morgenstern–Price	5,88	–	–
	Шахунянца/Shahunjanc	5,86	5,55	5,28

Согласно проведенным расчетам устойчивости, рассматриваемые скальные откосы в статическом состоянии и при проектной сейсмической ситуации являются устойчивыми по всем сечениям. Согласно результатам обследования, с проведенными замерами трещиноватости на эталонных площадках, предполагаемая мощность потенциального захвата блоков породы, при возможном возникновении обвалов, составляет 2,0 м (определена в полевых условиях по результатам измерения степени трещиноватости массива).

Для защиты железной дороги предложены следующие варианты проектных решений: устройство покровных сеток; устройство улавливающих сетчатых барьеров; обрушение неустойчивых камней. По мере накопления осыпного материала под сеткой у подошвы скального откоса (полки террасы) необходимо выполнять расчистку осыпи. Очистку скальных склонов от неустойчивых в обвальном отношении обломков горных пород следует производить поэтапно в зависимости от степени опасности, которая выявляется в результате предварительного осмотра склонов. В условиях интенсивного движения поездов на Байка-

ло-Амурской магистрали эти меры сыграют существенную роль в безопасности движения поездов.

#### Выводы

1. В статье приведена инженерно-геологическая оценка территории, расчеты устойчивости склонов. Выявлены механизм, динамика, факторы и закономерности развития скально-обвальных участков, что учитывалось при разработке защитных мероприятий на этом перегоне железной дороги.
2. Основными причинами деформаций являются: крутизна и экспозиция склонов; слаболитифицированные юрские песчаники с прослойками аргиллитов, слагающие весь склон, и характер их трещиноватости; подрезка крутых склонов в нижней части дорогой.
3. Для участка предложены мероприятия по защите железнодорожных путей.

*Исследование выполнено в Томском политехническом университете в рамках программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета (средства ВИУ).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оползни и устойчивость склонов. Библиографический указатель. – М.: ЗАО «Геоинформарк», 2010. – 528 с.
2. Золотарев Г.С. Генетические типы оползней, их развитие и изучение // Матер. сов. по изучению оползней и мер борьбы с ними. – Киев: Изд-во КГУ, 1964. – С. 165–170.
3. Емельянова Е.П. Основные закономерности оползневых процессов. – М.: Недра, 1972. – 310 с.
4. Строкова Л.А., Надеждина Ю.Ю. Природные и антропогенные факторы, обуславливающие активность склоновых процессов территории проектируемой железной дороги Элегест-Кызыл-Курагино // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 11. – С. 170–181.
5. Леонова А.В., Строкова Л.А., Никитенков А.Н. Оценка оползневых процессов на территории г. Томска с использованием ГИС-технологий // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2021. – № 1. – С. 94–103.
6. Фи Х.Т., Строкова Л.А. Типизация грунтовых толщ территории города Ханой (Вьетнам) при изучении оседания земной поверхности из-за извлечения подземных вод // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 4. – С. 6–17.
7. Опыт инженерно-геологического районирования по несущей способности грунтов промплощадки Эльгинского ГОК в Якутии / Л.А. Строкова, С.А. Дмитриева, Н.В. Осьмушкина, А.В. Осьмушкин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 2. – С. 175–185.
8. Strokova L.A., Teterin E. A. Identification, diagnosis and ranking of risks of geohazard in pipeline and urbanized territories // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – V. 43. – 6 p. DOI: 10.1088/1755-1315/43/1/012051.
9. Karst hazard assessment in the design of the main gas pipeline (South Yakutia) / L.A. Strokova, E.M. Dutova, A.V. Ermolaeva, I.N. Alimova, A.B. Strelnikova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – V. 27. – 6 p. DOI: 10.1088/1755-1315/27/1/012032
10. Strokova L.A. Numerical model of surface subsidence during subway tunneling // Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 2009. – V. 46. – № 3. – С. 117–119.
11. Characteristics of rainfall-induced landslides in Miocene formations: a case study of the Shenmu watershed, Central Taiwan / S.-C. Chen, H.-T. Chou, S.-C. Chen, C.-H. Wu, B.-S. Lin // Engineering Geology. – 2014. – V. 169. – P. 133–146. DOI: 10.1016/j.enggeo.2013.11.020
12. Fan L., Lehmann P., Or D. Effects of soil spatial variability at the hillslope and catchment scales on characteristics of rainfall-induced landslides // Water Resources Research. – 2016. – V. 52 (3) – P. 1781–1799. URL: [http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/\(ISSN\)1944-7973](http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/(ISSN)1944-7973) (дата обращения 12.05.2022). DOI: 10.1002/2015WR017758.
13. Sensitivity of rainstorm-triggered shallow mass movements on gully slopes to topographical factors on the Chinese Loess Plateau / W.-Z. Guo, L. Luo, W.-L. Wang, Z.-Y. Liu, Z.-X. Chen, H.-L. Kang, B. Yang // Geomorphology. – 2019. – V. 337. – P. 69–78. URL: [www.elsevier.com/inca/publications/store/5/0/3/3/3/4/](http://www.elsevier.com/inca/publications/store/5/0/3/3/3/4/) (дата обращения 12.05.2022). DOI: 10.1016/j.geomorph.2019.04.006
14. Minder J.R., Roe G.H., Montgomery D.R. Spatial patterns of rainfall and shallow landslide susceptibility // Water Resources Research. – 2009. – V. 45 (4). – art. no. W04419. DOI: 10.1029/2008WR007027.
15. Cruden D.M., Varnes D.J. Landslide types and processes // Special Report – National Research Council, Transportation Research Board. – 1996. – V. 247. – P. 36–75.
16. Dai F.C., Lee C.F. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong // Geomorphology. – 2002. – V. 42 (3–4). – P. 213–228. URL: [www.elsevier.com/inca/publications/store/5/0/3/3/3/4/](http://www.elsevier.com/inca/publications/store/5/0/3/3/3/4/) (дата обращения 12.05.2022). DOI: 10.1016/S0169-555X(01)00087-3
17. Distribution of landslides in the Upper Tiber River basin, central Italy / F. Guzzetti, F. Ardizzone, M. Cardinali, M. Galli, P. Reichenbach, M. Rossi // Geomorphology. – 2008. – V. 96 (1–2). – P. 105–122. DOI: 10.1016/j.geomorph.2007.07.015.
18. Keefer D.K., Larsen M.C. Assessing landslide hazards // Science. – 2007. – V. 316 (5828). – P. 1136–1138. DOI: 10.1126/science.1143308.
19. Evaluating factors for controlling sediment connectivity of landslide materials: a flume experiment / H.S. Kharismalatri, Y. Ishikawa, T. Gomi, R.C. Sidle, K. Shiraki // Water (Switzerland). – 2017. – V. 11 (1). – art. no. 17. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/1/17/pdf> (дата обращения 12.05.2022). DOI: 10.3390/w11010017.
20. Landslides on the Loess Plateau of China: a latest statistics together with a close look / X.Z. Xu, W.Z. Guo, Y.K. Liu, J.Z. Ma, W.L. Wang, H.W. Zhang, H. Gao // Natural Hazards. – 2017. – V. 86 (3). – P. 1393–1403. URL: [www.wkap.nl/journalhome/0921-030X](http://www.wkap.nl/journalhome/0921-030X) (дата обращения 12.05.2022). DOI: 10.1007/s11069-016-2738-6.
21. Strokova L. Landslide susceptibility zoning in surface coal mining areas: a case study Elga field in Russia // Arabian Journal of Geosciences. – 2022. – V. 15. – art. no. 146. URL:

- <https://doi.org/10.1007/s12517-021-09314-2> (дата обращения 12.05.2022).
22. Experimental studies of soil base deformations under the mode of flexible bottom of steel vertical tanks / R.A. Mangushev, V.V. Konyushkov, R.A. Usmanov, V.M. Kirillov // *Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations: Proceedings of the International Conference.* – St-Petersburg, 2019. – P. 165–171.
  23. Конюшков В.В., Веселов А.А., Кондратьева Л.Н. Комплексный анализ результатов инженерных изысканий для проектирования, строительства и эксплуатации сооружений на территориях со склоновыми процессами // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* – 2017. – Т. 328. – № 11. – С. 111–125.
  24. Short-term forecast of landslide processes development using the method of engineering-geological analogy on the territory of Inopolis city (Russia) / N. Zharkova, A. Latypov, I. Nuriev, G. Cherniychuk // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM.* – 2015. – V. 2 (1). – P. 649–656.
  25. Ильин В.В., Сахаров В.А. Расчет устойчивости склонов на участках строительства объектов спортивно-туристического комплекса «Горный воздух» (гора Большевик, г. Южно-Сахалинск) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* – 2019. – Т. 330. – № 4. – С. 208–216.
  26. Кропоткин М.П. Гравитационные склоновые процессы – оценки опасности и проблемы нормирования расчетов // *Инженерные изыскания.* – 2017. – № 10. – С. 24–34. DOI: 10.25296/1997-8650-2017-10-24-34
  27. Кропоткин М.П. Гравитационные склоновые процессы – возможная общая классификация // *Инженерная геология.* – 2017. – № 4. – С. 28–39. DOI: 10.25296/1993-5056-2017-4-28-38
  28. Квашук С.В., Малеев Д.Ю., Федоренко Е.В. Оползневая опасность на Шуфанском плато для линейных объектов инфраструктуры (Приморский край) // *Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН.* – 2021. – № 1. – С. 40–49.
  29. Харченко С.В., Шварев С.В. Прогнозирование оползневой опасности в окрестностях Красной Поляны на основе линейного дискриминантного анализа. *Вестник Московского университета. Серия 5. География.* – 2020. – V. 3. – С. 22–33.
  30. Руководство по проектированию противооползневых и противообвальных защитных сооружений. – М.: МИНТРАНССТРОЙ, 1983. – 119 с.
  31. Сахаровский А.В. и др. Технический отчет по результатам дополнительных инженерно-геологических изысканий по скально-обвальным участкам для подготовки проектной документации по двухпутной вставке на перегоне Мугуле-Мукунга с примыканием к разьезду Мугуле Дальневосточной железной дороги. – Новосибирск: Сибгипротранспуть, 2021. – 371 с.
  32. ГОСТ 21153.3-85 Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 14 с.
  33. ГОСТ 21153.2-84 Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 9 с.
  34. Назаров Г.Н. Методические указания по комплексным сейсмологическим и инженерно-геологическим исследованиям с применением портативных сейсмозвездочных установок. – М.: Издание ВИА, 1969. – 123 с.
  35. The fault-controlled Chengtian landslide triggered by rainfall on 20 May 2021 in Songyang County, Zhejiang Province, China / F. Wang, Y. Chen, X. Peng, G. Zhu, K. Yan, Z. Ye // *Landslides.* – 2022. URL: <https://doi.org/10.1007/s10346-022-01891-x> (дата обращения 12.05.2022).
  36. A GIS-based tool for probabilistic physical modelling and prediction of landslides: GIS-FORM landslide susceptibility analysis in seismic areas / J. Ji, H. Cui, T. Zhang, J. Song, Y. Gao // *Landslides.* – 2022. URL: <https://doi.org/10.1007/s10346-022-01885-9> (дата обращения 12.05.2022).
  37. Landslide detection in the Himalayas using machine learning algorithms and U-Net / S.R. Meena, L.P. Soares, C.H. Grohmann, C. van Westen, K. Bhuyan, R.P. Singh, M. Floris, F. Catani // *Landslides.* – 2022. – V. 19. – P. 1209–1229. URL: <https://doi.org/10.1007/s10346-022-01861-3> (дата обращения 12.05.2022).
  38. Smoothed Particle Hydrodynamics for modelling landslide – water interaction problems / A. Mahalle, M. Roudane, A. Krimi, S.A. Gouri // *Landslides.* – 2022. – V. 19. – P. 1249–1263. URL: <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01807-1> (дата обращения 12.05.2022).
  39. Slope reliability analysis through Bayesian sequential updating integrating limited data from multiple estimation methods / W. Yao, C. Li, C. Yan, H. Zhan // *Landslides.* – 2022. – V. 19. – P. 1101–1117. URL: <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01812-4> (дата обращения 12.05.2022).
  40. Modelling discontinuity control on the development of Hell’s Mouth landslide / L. He, J. Coggan, D. Stead, M. Francioni, M. Eyre // *Landslides.* – 2022. – V. 19. – P. 277–295. URL: <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01813-3> (дата обращения 12.05.2022).

Поступила 20.05.2022 г.

Прошла рецензирование 06.10.2022 г.

#### Информация об авторах

**Сахаровский А.В.**, директор, ООО «НПП Инженерная защита».

**Строкова Л.А.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.



UDC 624.131

## DETERMINATION OF THE STABILITY OF ROCK-FALL SITES ON THE MUGULE-MUKUNGA STRETCH OF THE FAR EASTERN RAILWAY

**Aleksandr V. Sakharovskiy<sup>1</sup>,**  
sakharovskiy\_sgt@bk.ru

**Lyudmila A. Strokovaya<sup>2</sup>,**  
sla@tpu.ru

<sup>1</sup> LLC «Scientific and Production Enterprise Engineering Protection»,  
office 310, 52, Sovetskaya street, Novosibirsk, 630091, Russia.

<sup>2</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance** of studying gravitational processes lies in the fact that they lead to emergencies with the threat of destruction of structures, land use, and human safety. The question of a reliable quantitative forecast of their stability causes particular difficulties in the study of rock-collapse slopes.

**This study aims** to assess the engineering-geological and hydrogeological conditions of dangerous slopes and calculate their stability.

**The object** of the study is the geological environment of the railway route area. The main factors influencing the development of gravitational processes, geomorphological and tectonic conditions; lithological composition; physical and mechanical properties of rocks, permafrost, hydrological and hydrogeological conditions of the area are considered.

**Methods:** brief review of the relevant literature; analysis of engineering and geological survey data; calculations of slope stability.

**The results.** We considered the characteristics of the main factors of the landslide process of this territory, the results of calculating the stability of slopes along dangerous sections by various methods. We carried out the stability calculations; according to them the considered rock slopes in a static state and in a design seismic situation are stable across all sections. According to the results of the survey with the conducted measurements of fracturing at the reference sites, the estimated capacity of the potential capture of rock blocks, with the possible occurrence of collapses, is 2,0 m. It was determined in the field by measuring the degree of fracturing of the array.

**Summary.** The main causes of deformations are: the steepness and aspect of the slopes, weakly lithified Jurassic sandstones composing the entire slope, and the nature of their fracturing, cutting of steep slopes in the lower part of the road. We proposed the measures to protect railway tracks.

### Key words:

engineering and geological conditions, regional factors, soil, landslide, slope stability assessment, simulation model.

The research was carried out at Tomsk Polytechnic University within the Program of Tomsk Polytechnic University Competitiveness Enhancement (VIU funds).

### REFERENCES

- Opolzni i ustoychivost sklonov [Landslides and slope stability]. *Bibliograficheskiy ukazatel* [Bibliographic index]. Moscow, Geoinformmark Publ., 2010. 528 p.
- Zolotarev G.S. Geneticheskie tipy opolzney, ikh razvitiye i izucheniye [Genetic types of landslides, their development and study]. *Materialy soveshchaniya po izucheniyu opolzney i mer borby s nimi* [Proceedings of the meeting on the study of landslides and landslide control measures]. Kiev, KGU Publ., 1964. pp. 165–170.
- Emelyanova E.P. *Osnovnye zakonomernosti opolznevyykh protsessov* [The main regularities of landslide processes]. Moscow, Nedra Publ., 1972. 310 p.
- Strokovaya L.A., Nadezhdina Yu.Yu. The natural and anthropogenic factors related to activity of slope processes on the territory of the projected railway Egeest-Kyzyl-Kuragino. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 11, pp. 170–181. In Rus.
- Leonova A.V., Strokovaya L.A., Nikitenkov A. N. Assessment of landslide processes on the territory of Tomsk by using GIS technologies. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geography*, 2021, no. 1, pp. 94–103. In Rus.
- Phi H.T., Strokovaya L.A. Classification of soil types for Hanoi (Vietnam) when studying land subsidence at groundwater extraction. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 4, pp. 6–17. In Rus.
- Strokovaya L.A., Dmitrieva S.A. Osmushkina N.V., Osmushkin A.V. Experience of engineering-geological zoning on bearing capacity of soils of the industrial site of Elga coal-preparation plant in Yakutia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 2, pp. 175–185. In Rus.
- Strokovaya L.A., Teterin E.A. Identification, diagnosis and ranking of risks of geohazard in pipeline and urbanized territories. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43, no. 012051. DOI: 10.1088/1755-1315/43/1/012051.
- Strokovaya L.A., Dutova E.M., Ermolaeva A.V., Alimova I.N., Strelnikova A.B. Karst hazard assessment in the design of the main gas pipeline (South Yakutia). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 27, 012032. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/27/1/012032> (accessed 12 May 2022).
- Strokovaya L.A. Numerical model of surface subsidence during subway tunneling. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2009, vol. 46, no. 3, pp. 117–119.
- Chen S.-C., Chou H.-T., Chen S.-C., Wu C.-H., Lin B.-S. Characteristics of rainfall-induced landslides in Miocene formations: A case study of the Shenmu watershed, Central Taiwan. *Engineering Geology*, 2014, vol. 169, pp. 133–146. DOI: 10.1016/j.enggeo.2013.11.020
- Fan L., Lehmann P., Or D. Effects of soil spatial variability at the hillslope and catchment scales on characteristics of rainfall-induced landslides. *Water Resources Research*, 2016, vol. 52 (3), pp. 1781–1799. Available at: [http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/\(ISSN\)1944-7973](http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/(ISSN)1944-7973) (accessed: 12 May 2022). DOI: 10.1002/2015WR017758
- Guo W.-Z., Luo L., Wang W.-L., Liu Z.-Y., Chen Z.-X., Kang H.-L., Yang B. Sensitivity of rainstorm-triggered shallow mass move-

- ments on gully slopes to topographical factors on the Chinese Loess Plateau. *Geomorphology*, 2019, vol. 337, pp. 69–78. Available at: [www.elsevier.com/inca/publications/store/5/0/3/3/3/4/](http://www.elsevier.com/inca/publications/store/5/0/3/3/3/4/) (accessed: 12 May 2022). DOI: 10.1016/j.geomorph.2019.04.006
14. Minder J.R., Roe G.H., Montgomery D.R. Spatial patterns of rainfall and shallow landslide susceptibility. *Water Resources Research*, 2009, vol. 45 (4), art. no. W04419. DOI: 10.1029/2008WR007027
  15. Cruden D.M., Varnes D.J. Landslide types and processes. *Special Report – National Research Council, Transportation Research Board*, 1996, vol. 247, pp. 36–75.
  16. Dai F.C., Lee C.F. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, 2002, vol. 42 (3–4), pp. 213–228. Available at: [www.elsevier.com/inca/publications/store/5/0/3/3/3/4/](http://www.elsevier.com/inca/publications/store/5/0/3/3/3/4/) (accessed: 12 May 2022). DOI: 10.1016/S0169-555X(01)00087-3
  17. Guzzetti F., Ardizzone F., Cardinali M., Galli M., Reichenbach P., Rossi M. Distribution of landslides in the Upper Tiber River basin, central Italy. *Geomorphology*, 2008, vol. 96, no. 1–2, pp. 105–122. DOI: 10.1016/j.geomorph.2007.07.015
  18. Keefer D.K., Larsen M.C. Assessing landslide hazards. *Science*, 2007, vol. 316 (5828), pp. 1136–1138. DOI: 10.1126/science.1143308
  19. Kharismalatri H.S., Ishikawa Y., Gomi T., Sidle R.C., Shiraki K. Evaluating factors for controlling sediment connectivity of landslide materials: a flume experiment. *Water (Switzerland)*, 2018, vol. 11 (1), art. no. 17. Available at: <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/1/17/pdf> doi: 10.3390/w11010017 (accessed: 12 May 2022).
  20. Xu X.Z., Guo W.Z., Liu Y.K., Ma J.Z., Wang W.L., Zhang H.W., Gao H. Landslides on the Loess Plateau of China: a latest statistics together with a close look. *Natural Hazards*, 2017, vol. 86 (3), pp. 1393–1403. Available at: [www.wkap.nl/journalhome.htm/0921-030X](http://www.wkap.nl/journalhome.htm/0921-030X) (accessed: 12 May 2022). DOI: 10.1007/s11069-016-2738-6
  21. Strokova L. Landslide susceptibility zoning in surface coal mining areas: a case study Elga field in Russia. *Arabian Journal of Geosciences*, 2022, vol. 15, art. no. 146. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12517-021-09314-2> (accessed: 12 May 2022).
  22. Mangushev R.A., Konyushkov V.V., Usmanov R.A., Kirillov V.M. Experimental studies of soil base deformations under the mode of flexible bottom of steel vertical tanks. *Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations. Proceedings of the International Conference*. St-Petersburg, 2019. pp. 165–171.
  23. Konyushkov V.V., Veselov A.A., Kondratyeva L.N. Comprehensive analysis of the results of engineering surveys for design, construction and exploitation of structures in the areas with landslide processes. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 11, pp. 111–125. In Rus.
  24. Zharkova N., Latypov A., Nuriev I., Cherniyuchuk G. Short-term forecast of landslide processes development using the method of engineering-geological analogy on the territory of Innopolis city (Russia). *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management*, 2015, vol. 2, no. 1, pp. 649–656.
  25. Ilyin V.V., Sakharov V.A. Calculation of stability of slopes in the areas of construction of sports and tourist complex «Gorny Vozdukh» (Mountain Bolshevik, Yuzhno-Sakhalinsk). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 4, pp. 208–216. In Rus.
  26. Kropotkin M.P. Gravitational slope processes – hazard assessments and problems of rationing calculations. *Engineering Survey*, 2017, no. 10, pp. 24–34. In Rus. DOI: 10.25296/1997-8650-2017-10-24-34.
  27. Kropotkin M.P. Gravitational slope processes are a possible general classification. *Engineering Geology World*, 2017, no. 4, pp. 28–39. In Rus. DOI: 10.25296/1993-5056-2017-4-28-38
  28. Kvashuk S.V., Maleev D.Yu., Fedorenko E.V. Landslide hazard for linear infrastructure on the SHUFAN plateau (Primorsky Krai). *Bulletin of the North-East Scientific Center, Russia Academy of Sciences Far East Branch*, 2021, no. 1, pp. 40–49. In Rus.
  29. Kharchenko S.V., Shvarev S.V. Forecasting landslide hazards in the vicinity of Krasnaya Polyana basing on the linear discriminatory analysis. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya*, 2020, vol. 3, pp. 22–33. In Rus.
  30. *Rukovodstvo po proektirovaniyu protivopozhnykh i protivoovalnykh zashchitnykh sooruzheniy* [Guidelines for the design of anti-landslide and anti-avalanche protective structures]. Moscow, MINTRANSSTROY Publ., 1983. 119 p.
  31. Sakharovskiy A.V. *Tekhnicheskii otchet po rezultatam dopolnitelnykh inzhenerno-geologicheskikh izyskaniy po skalno-obvalnym uchastkam dlya podgotovki proektnoy dokumentatsii po dvukhputnoy vstavke na peregone Mugule-Mukunga s primykaniem k razyezdu Mugule Dalnevostochnoy zheleznoy dorogi* [Technical report on the results of additional engineering and geological surveys on rock-fall sites for the preparation of project documentation for a double-track insert on the Mugule-Mukunga stretch with an adjunction to the Mugule siding of the Far Eastern Railway]. Novosibirsk, Sibgiprotransport Publ., 2021. 371 p.
  32. GOST 21153.3-85 *Porody gornye. Metody opredeleniya predela prochnosti pri odnoosnom rastyazhenii* [State Standard 21153.3-85 Rocks. Methods for determining the tensile strength at uniaxial tension]. Moscow, Standards Publ., 1986. 14 p.
  33. GOST 21153.2-84 *Porody gornye. Metody opredeleniya predela prochnosti pri odnoosnom szhatii* [State Standard 21153.2-84 Rocks. Methods for determining the ultimate strength in uniaxial compression]. Moscow, Standards Publ., 1986. 9 p.
  34. Nazarov G.N. *Metodicheskie ukazaniya po kompleksnym seismologicheskim i inzhenerno-geologicheskim issledovaniyam s primeneniem portativnykh seysmorazvedochnykh ustanovok* [Methodological guidelines for complex seismological and engineering-geological studies using portable seismic exploration installations]. Moscow, VIA Publ., 1969. 123 p.
  35. Wang F., Chen Y., Peng X., Zhu G., Yan K., Ye Z. The fault-controlled Chengtian landslide triggered by rainfall on 20 May 2021 in Songyang County, Zhejiang Province, China. *Landslides*, 2022. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10346-022-01891-x> (accessed: 12 May 2022).
  36. Ji J., Cui H., Zhang T., Song J., Gao Y. A GIS-based tool for probabilistic physical modelling and prediction of landslides: GIS-FORM landslide susceptibility analysis in seismic areas. *Landslides*, 2022. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10346-022-01885-9> (accessed: 12 May 2022).
  37. Meena S.R., Soares L.P., Grohmann C.H., Van Westen C., Bhuyan K., Singh R.P., Floris M., Catani F. Landslide detection in the Himalayas using machine learning algorithms and U-Net. *Landslides*, 2022, vol. 19, pp. 1209–1229. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10346-022-01861-3> (accessed: 12 May 2022).
  38. Mahalle A., Roudane M., Krimi A., Gouri S.A. Smoothed Particle Hydrodynamics for modelling landslide–water interaction problems. *Landslides*, 2022, vol. 19, pp. 1249–1263. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01807-1> (accessed: 12 May 2022).
  39. Yao W., Li C., Yan C., Zhan H. Slope reliability analysis through Bayesian sequential updating integrating limited data from multiple estimation methods. *Landslides*, 2022, vol. 19, pp. 1101–1117. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01812-4> (accessed: 12 May 2022).
  40. He L., Coggan J., Stead D., Francioni M., Eyre M. Modelling discontinuity control on the development of Hell’s Mouth landslide. *Landslides*, 2022, vol. 19, pp. 277–295. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01813-3> (accessed: 12 May 2022).

Received: 20 May 2022.

Reviewed: 6 October 2022.

#### Information about the authors

**Aleksandr V. Sakharovskiy**, director, LLC «Scientific and Production Enterprise Engineering Protection».

**Lyudmila A. Strokova**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 621.181:519.876.5

## АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ЧИСЛЕННОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ГОРЕНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ

Пронин Александр Константинович<sup>1,2</sup>,  
pronix@tpu.ru

Гиль Андрей Владимирович<sup>1</sup>,  
andgil@tpu.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

<sup>2</sup> Тюменский государственный университет,  
Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью точного воспроизведения математическими моделями экспериментальных измерений, так как численное моделирование широко применяется как для разработки новых технологий сжигания твердого топлива, так и для модернизации существующих котельных агрегатов. А как известно, предсказанные численным моделированием параметры пылеугольного факела напрямую зависят от того, как моделируется химия горения в турбулентном потоке.

**Цель:** исследование точности воспроизведения экспериментальных измерений для четырех подходов к численному моделированию воспламенения и выгорания горючих компонентов пылеугольного топлива в турбулентном потоке.

**Объекты:** температуры, концентрации газовых компонентов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$  и  $\text{NO}_x$ ), аксиальные и тангенциальные компоненты скорости внутри топки IFRF 2,4 MWt.

**Методы:** сравнение экспериментально измеренных параметров пылеугольного факела и предсказанных численным моделированием. Численное моделирование выполнялось с использованием программного пакета ANSYS FLUENT. Горение угольной пыли в топке смоделировано как двухфазная турбулентная система течений, состоящая из газовой и дискретной фаз.

**Результаты.** Проведено численное моделирование горения пылеугольного топлива в турбулентном потоке четырьмя разными подходами: моделями равновесной химии с одной и двумя переменными смешения; моделью «обрыва вихря» и её комбинацией с кинетической моделью горения. Сравнительным анализом результатов моделирования с экспериментальными измеренными параметрами пылеугольного факела установлено, что все исследованные подходы к моделированию горения пылеугольного топлива в турбулентном потоке демонстрируют довольно хорошее совпадение с экспериментальными данными. Модель «обрыва вихря» в комбинации с кинетической моделью горения имеет преимущество в точности, а модель равновесной химии с одной переменной смешения имеет преимущество в скорости сходимости решения.

### Ключевые слова:

Пылевидный уголь, горение, численное моделирование, вихревая горелка, модель «обрыва вихря», химическая кинетика, модель равновесной химии, переменная смешения.

### Введение

В настоящее время порядка 37 % мировой электроэнергии вырабатывается за счет сжигания пылеугольного топлива [1]. Общественные организации и ученые во всем мире уделяют большое внимание выбросам загрязняющих веществ от сжигания угля, а также выбросам  $\text{CO}_2$ . Поэтому повышение эффективности и экологичности сжигания пылеугольного топлива является актуальной задачей.

В последние десятилетия численное моделирование широко применяется как для разработки новых технологий сжигания твердого топлива, так и для модернизации существующих котельных агрегатов. Сжигание твердого топлива в турбулентном потоке включает сложное взаимодействие физических и химических явлений, для моделирования которых разработано множество подходов. Можно выделить две группы подходов: модели равновесной химии и модели переноса компонентов [2, 3].

В моделях равновесной химии концентрации газовых компонентов определяются из переменной смешения с использованием предположения о химическом равновесии. С помощью таких моделей в расчет

могут быть включены эффекты промежуточных реакций и реакций диссоциации.

В практике моделирования горения пылеугольного топлива применяются следующие две разновидности моделей равновесной химии.

1. Модель с одной переменной смешения [4, 5], где состав топлива представляется укрупненно, как смесь летучих веществ и коксового остатка. Достоинство этого подхода – самая быстрая сходимость решения среди всех других подходов, так как для определения концентраций всех компонентов решается всего два уравнения: средней переменной смешения и её дисперсии.
2. Модель с двумя переменными смешения [6, 7], где летучие вещества и коксовый остаток представляются как отдельные топливные потоки. Этот подход требует значительно больших вычислительных затрат, однако дает более точный результат, чем подход с одной переменной смешения.

В моделях переноса компонентов для каждого компонента решается отдельное уравнение переноса, в котором учитываются конвекция, диффузия и источники от химических реакций. С помощью таких

моделей в расчет могут быть включены несколько одновременных химических реакций как в газовом объеме, так и на поверхностях частиц дискретной фазы. В газовой фазе химические реакции могут быть учтены по одностадийному (реагенты → продукт) или двухстадийному (реагенты → промежуточный продукт → продукт) глобальному механизму. Из-за большого количества уравнений переноса компонентов эти модели требуют больше вычислительных затрат, чем модели равновесной химии.

В практике моделирования горения пылеугольного топлива наиболее часто применяются следующие две разновидности моделей переноса компонентов.

1. Модель «обрыва вихря» [8, 9], где химические реакции в газовом объеме предполагаются мгновенными, как только произошло смешение топлива и окислителя. В этой модели никак не учитывается химическая кинетика, из-за чего эта модель склонна к завышению температур.
2. Комбинация кинетической модели горения с моделью «обрыва вихря» [10–13], где скорость химических реакций считается наименьшей из рассчитанных по кинетическим уравнениям реакций и модели «обрыва вихря». Таким образом, этот подход естественным образом применяет химическую кинетику при более низких температурах и использует турбулентное перемешивание за пределами определенной критической температуры. Также этот подход позволяет дополнительно

учесть реакции углерода с  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  на поверхности частиц дискретной фазы, однако требует наибольших вычислительных затрат среди всех перечисленных подходов из-за решения большого количества уравнений.

Одно из главных требований, предъявляемых к математическим моделям, это точность воспроизведения экспериментальных измерений. А как известно, предсказанные численным моделированием температуры, концентрации газовых компонентов и выбросы загрязняющих веществ напрямую зависят от того, как моделируется химия горения в турбулентном потоке [7].

Обоснованному выбору подхода к численному моделированию химии горения в турбулентном потоке способствует сравнительный анализ параметров пылеугольного факела: измеренных в эксперименте и предсказанных моделью.

#### Условия эксперимента и описание граничных условий

Для сравнительного анализа использованы экспериментальные данные международного фонда исследований пламени (IFRF) [14] по горению вихревого пылеугольного факела в топке мощностью 2,4 МВт (рис. 1, 2). Этот объект часто используется для тестирования математических моделей [14–16]. Интерес к этому эксперименту обусловлен наличием всесторонних экспериментальных данных по топочному объему и близости горелки по масштабу к промышленным образцам.

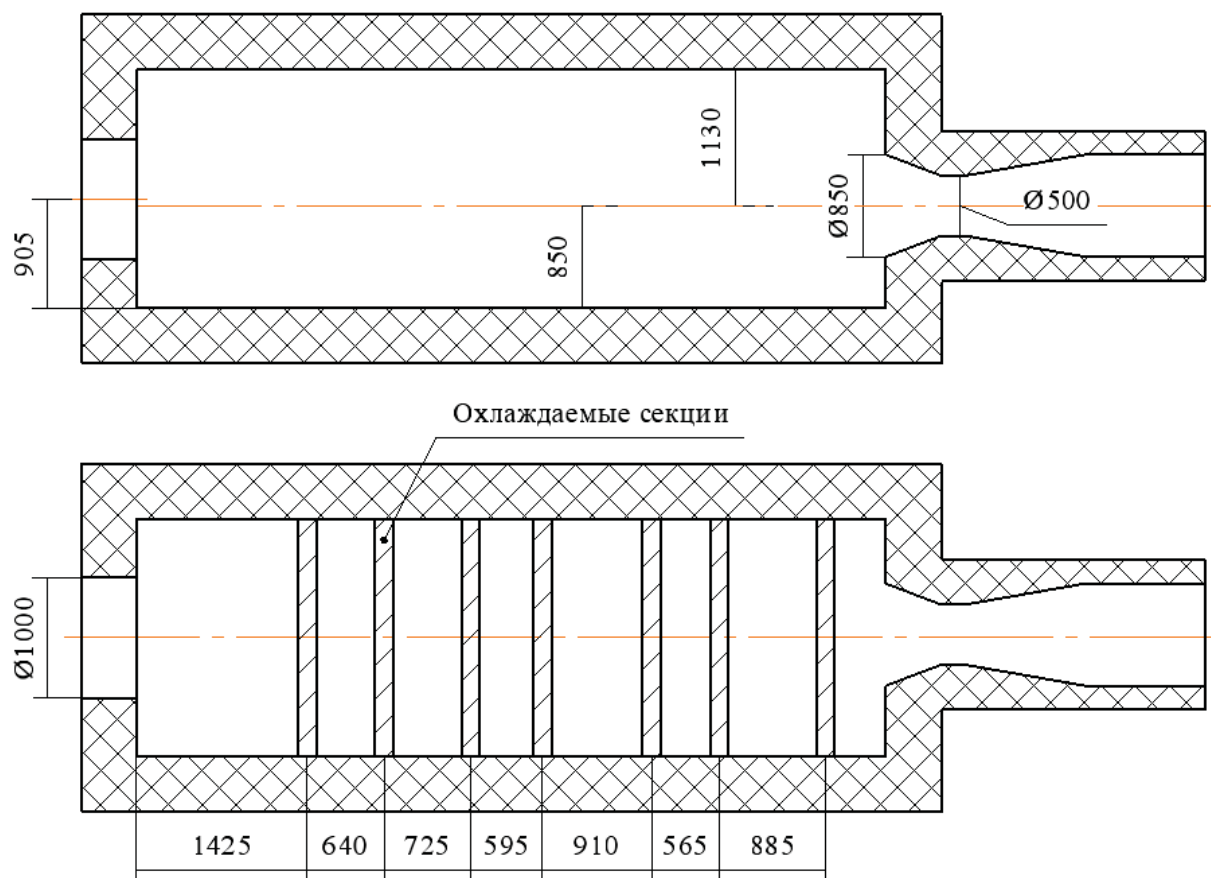


Рис. 1. Топка IFRF 2,4 МВт (размеры в мм)

Fig. 1. Furnace IFRF 2,4 MW (dimensions in mm)

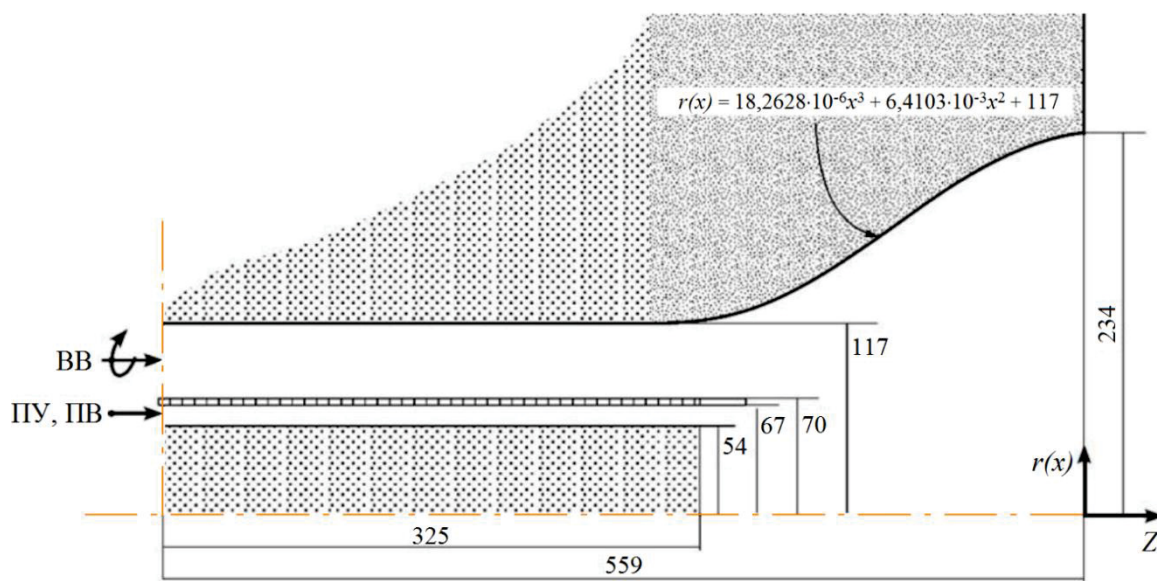


Рис. 2. Горелка топки IFRF 2,4 МВт. ВВ – вторичный воздух, ПВ – первичный воздух, ПУ – пылевидный уголь (размеры – в мм)

Fig. 2. Burner of furnace IFRF 2,4 MW. BB – secondary air, PB – primary air, PU – pulverized coal (dimensions are in mm)

Уголь в эксперименте поступал в топку сухим, его теплотехнические характеристики и характеристики входных потоков горелки представлены в табл. 1, 2 [14].

Таблица 1. Теплотехнические характеристики топлива  
 Table 1. Fuel thermotechnical characteristics

Технический состав (мас. %, для сухого состояния) Proximate analysis (wt. %, dry)	
Летучие вещества/Volatile matter	37,4
Связанный углерод/Fixed carbon	54,3
Зола/Ash	8,3
Химический состав (мас. %, для сухого беззольного состояния) Ultimate analysis (wt. %, dry ash free)	
Углерод/Carbon	80,36
Водород/Hydrogen	5,08
Азот/Nitrogen	1,45
Сера/Sulphur	0,94
Кислород/Oxygen	12,17
Нижшая теплота сгорания, МДж/кг/Low heating value, MJ/kg	32,32
Плотность, кг/м <sup>3</sup> /Density, kg/m <sup>3</sup>	1000
Теплоемкость, Дж/(кг К)/Specific heat, J/(kg K)	1100

Расчетная геометрия представляет собой одну четвертую часть топки IFRF и представлена на рис. 3 с указанием сечений, которые соответствуют местам проведения измерений в эксперименте. Измерения аксиальной и тангенциальной компонент скорости в эксперименте были выполнены вдоль радиуса топки на трех расстояниях от амбразуры горелки ( $Z=0,25$  м;  $Z=0,5$  м и  $Z=0,85$  м). А измерения температур и концентраций газовых компонентов были выполнены вдоль радиуса топки на пяти расстоя-

ниях от амбразуры горелки ( $Z=0,25$  м;  $Z=0,5$  м;  $Z=0,85$  м;  $Z=1,25$  м и  $Z=1,95$  м) и вдоль оси топки.

Таблица 2. Характеристики входных потоков горелки  
 Table 2. Burner inlet characteristics

Пылевидный уголь/Pulverized coal	
Расход, кг/с/Mass flow rate, kg/s	0,073
Распределение частиц по размерам Particle size distribution	Розина–Раммлера Rosin–Rammmler
Средний диаметр, мкм/Mean diameter, $\mu\text{m}$	45
Минимальный диаметр, мкм Minimum diameter, $\mu\text{m}$	1
Максимальный диаметр, мкм Maximum diameter, $\mu\text{m}$	300
Индекс однородности/Spread parameter	1,36
Первичный воздух/Primary air	
Средняя осевая скорость, м/с Mean axial velocity, m/s	23,02
Интенсивность турбулентности, % Turbulent intensity, %	10
Гидравлический диаметр, мм Hydraulic diameter, mm	13
Температура/Temperature, K	343,15
Вторичный воздух/Secondary air	
Средняя осевая скорость, м/с Mean axial velocity, m/s	43,83
Средняя тангенциальная скорость, м/с Mean tangential velocity, m/s	49,42
Интенсивность турбулентности, % Turbulent intensity, %	20
Гидравлический диаметр, мм Hydraulic diameter, mm	47
Температура/Temperature, K	573,15

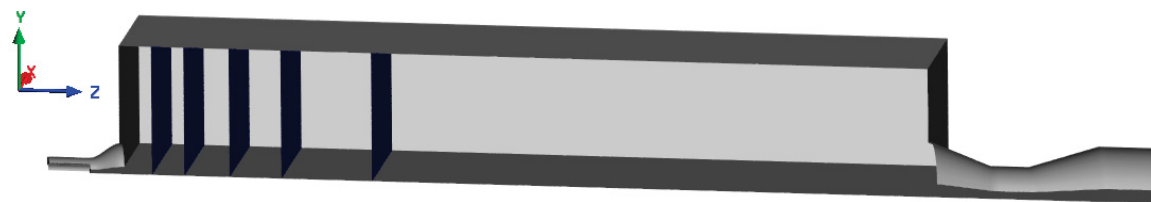


Рис. 3. Геометрическая модель топки IFRF

Fig. 3. Geometrical model of the furnace IFRF

Тепловые граничные условия на границах модели заданы как температура (рис. 4) и степень черноты

[14]. Степень черноты на поверхностях, ограничивающих горелку, принята 0,6, а на остальных – 0,5.

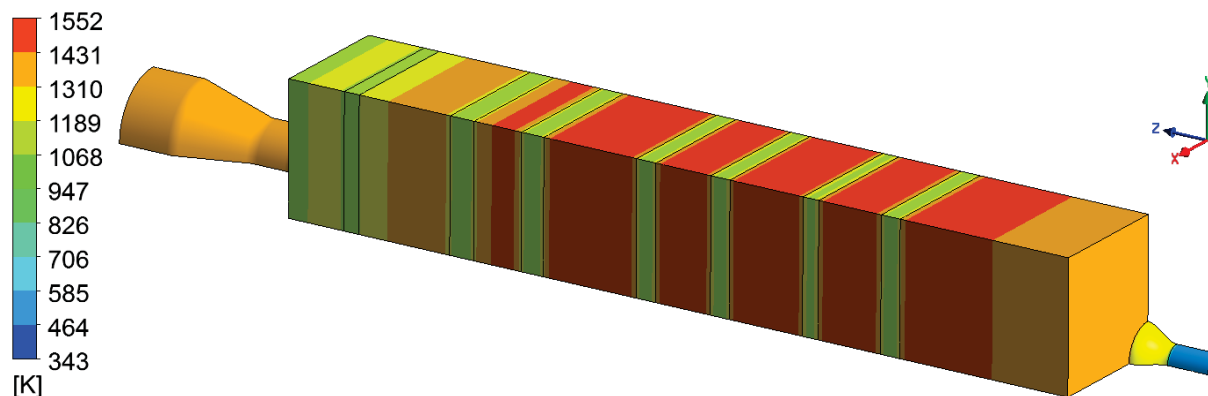


Рис. 4. Температура на границах модели

Fig. 4. Temperature at model boundaries

#### Описание математической модели

Построение конечно-элементной сетки является важным этапом для получения точных результатов моделирования. В проведенных численных расчетах была использована сетка с  $\approx 5 \times 10^4$  элементов, так как дальнейшее измельчение сетки до  $\approx 1 \times 10^5$  элементов не привело к видимому изменению результатов численного моделирования.

Численное моделирование выполнялось с использованием программного пакета ANSYS FLUENT. Горение угольной пыли в топке смоделировано как двухфазная турбулентная система течений, состоящая из газовой и дискретной фаз. Для газовой фазы определение осредненных во времени уравнений сохранения массы (1), движения (2) и энергии (3) выполнено Эйлеровым подходом с учетом межфазного взаимодействия:

$$\nabla(\rho v) = S_m, \quad (1)$$

$$\nabla(\rho v v) = -\nabla P + \nabla \tau + S_v, \quad (2)$$

$$\nabla(\rho v h) = \nabla(k_{eff} \nabla T_g - \sum_i h_i J_i) + S_h + S_{hr} + S_{hcr}. \quad (3)$$

Здесь  $\rho$  – плотность [кг/м<sup>3</sup>];  $v$  – скорость [м/с];  $h$  – энтальпия [Дж/кг];  $k_{eff}$  – эффективный коэффициент теплоотдачи [Вт/(м·К)];  $T_g$  – температура газа [К];  $P$  – давление [Па];  $\tau$  – тензор напряжения [Па];  $S_m$  – изменение массы за счет межфазного взаимодействия [кг/(м<sup>3</sup>·с)];  $S_h$  – изменение энтальпии за счет межфазного взаимодействия [Вт/м<sup>3</sup>];  $S_{hcr}$  – изменение энтальпии за счет химических реакций [Вт/м<sup>3</sup>];  $S_{hr}$  – изменение энтальпии за счет радиационного теплообмена [Вт/м<sup>3</sup>];  $S_v$  – изменение момента за счет межфазного взаимодействия [Н/м<sup>3</sup>];  $J_i$  – диффузионный поток  $i$ -го компонента [кг/м<sup>2</sup>·с].

Замыкание турбулентности в осредненных по Рейнольдсу уравнениях Навье–Стокса выполнено с использованием реализуемой  $k$ - $\epsilon$  модели [17]. Среди многочисленного семейства двухпараметрических моделей турбулентности выбор был сделан в пользу

реализуемой, так как применение этой модели позволяет наиболее точно воспроизводить физико-химические процессы в потоках, включающих сильную кривизну линий тока, вихри и вращение, при минимальной затрате расчетных ресурсов [18]. Для моделирования теплообмена в пристеночной области использовалось приближение Менгера–Лехнера.

Радиационный теплообмен смоделирован методом дискретных ординат [19] для серой двухфазной двухтемпературной среды. Коэффициент поглощения газовой среды вычислен по модели суммы серых газов. Коэффициент рассеяния излучения частицами принят 0,6 [20].

Для дискретной фазы траектории частиц получены с помощью модели случайного блуждания частиц [21] Лагранжевым подходом с учетом времени жизни случайных вихрей по уравнению (4):

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = F_d + F_g, \quad (4)$$

где  $m_p$  – масса частицы [кг];  $F_d$  – сила сопротивления среды [Н];  $F_g$  – сила гравитации [Н].

Горение частиц дискретной фазы в модели реализовано как следующие последовательные стадии: инертный нагрев, выход летучих веществ и горение коксового остатка. Стадия испарения влаги отсутствует, так как топливо было предварительно высушено. Температура частиц дискретной фазы получена с учетом тепла химических реакций, конвективного и радиационного теплообмена с газовой фазой по уравнению (5):

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = \alpha_{conv} A_p (T_g - T_p) + \epsilon_p \sigma A_p (\theta_r^4 - T_p^4) + \frac{dm_p}{dt} H, \quad (5)$$

где  $c_p$  – теплоемкость частицы [Дж/(кг·К)];  $\alpha_{conv}$  – конвективный коэффициент теплоотдачи [Вт/(м<sup>2</sup>·К)];  $A_p$  – площадь частицы [м<sup>2</sup>];  $\epsilon_p$  – степень черноты частицы (принята 0,85 [11]);  $\sigma$  – постоянная Стефана–Больцмана [Дж/К];  $H$  – тепловой эффект (воспринятая

частицей доля теплоты реакции горения углерода) [Дж/кг];  $\theta_r$  – радиационная температура [K].

Выход летучих веществ из частиц дискретной фазы смоделирован одностадийным приближением, где скорость выхода летучих веществ определяется по уравнению типа Аррениуса [22]. Кинетические константы для модели представлены в табл. 3.

Скорость поверхностной реакции окисления углерода коксового остатка вычислена с использованием диффузионно-кинетической модели [23, 24] по уравнению (6):

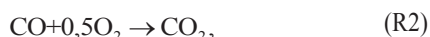
$$\frac{dm_p}{dt} = -A_p p_{ox} \frac{k_d k_c}{k_d + k_c}, \quad (6)$$

где  $p_{ox}$  – парциальное давление окислителя [Па];  $k_d$  – коэффициент скорости диффузии кислорода к поверхности частицы [кг/(м<sup>2</sup>·с·Па)];  $k_c$  – константа скорости химической реакции [кг/(м<sup>2</sup>·с·Па)]. Кинетические константы для модели представлены в табл. 3.

#### Модели переноса компонентов

Состав летучих представлен в виде псевдокомпонента  $CH_xO_yN_z$ , где  $x$ ,  $y$  и  $z$  посчитаны по теплотехническим характеристикам топлив.

Горение летучих в газовой фазе смоделировано двухстадийным приближением:



где  $b_{1,2,3,4}$  – стехиометрические коэффициенты.

Горение углерода коксового остатка смоделировано одностадийным приближением:  $C + O_2 \rightarrow CO_2$ .

Скорость горения газовых компонентов определена:

- по модели «обрыва вихря» [25], где учитывается скорость турбулентного перемешивания горючего и окислителя;
- модели «обрыва вихря» в комбинации с кинетической моделью горения (7), где учитываются концентрации горючего и окислителя, реакционная способность горючего, скорость турбулентного перемешивания горючего и окислителя.

$$R_{vol} = \min(R_{KIN}, R_{EBU}). \quad (7)$$

Здесь  $R_{vol}$  – скорость реакции горения летучих [кмоль/(м<sup>3</sup>·с)];  $R_{KIN}$  – скорость реакции по кинетической модели [кмоль/(м<sup>3</sup>·с)];  $R_{EBU}$  – скорость реакции по модели «обрыва вихря» [кмоль/(м<sup>3</sup>·с)].

Скорость реакции по кинетической модели вычислена с использованием уравнения (8):

$$R_{KIN} = AT_g^\beta \exp(-E / RT_g) \prod_{i=1}^N [c_i]^{n_i}, \quad (8)$$

где  $A$  – пред-экспоненциальный множитель [м<sup>3</sup>/(кмоль·с)];  $\beta$  – температурный показатель;  $E$  – энергия активации [Дж/кмоль];  $R$  – универсальная газовая постоянная [Дж/(кмоль·K)];  $c_i$  – молярная концентрация  $i$ -го компонента [кмоль/м<sup>3</sup>];  $n_i$  – порядок реакции по  $i$ -му компоненту. Кинетические константы для модели представлены в табл. 3.

**Таблица 3.** Кинетические константы для моделей горения угля

**Table 3.** Kinetic constants for coal combustion models

Реакция Reaction	$A$	$\beta$	$E$ , Дж/кмоль $E$ , J/kmol	Порядок реакции Rate exponent	Литература Reference
Выход летучих Devolatilization	$3,12 \times 10^5 \text{ c}^{-1}$ $3,12 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$	–	$7,4 \times 10^7$	–	[5]
Окисление кокса Char oxidation	$4,3 \times 10^{-3}$ кг/(м <sup>2</sup> ·с·Па) $4,3 \times 10^{-3}$ kg/(m <sup>2</sup> ·s·Pa)	–	$8,37 \times 10^7$	–	[5]
R1	$2,33 \times 10^{11}$ м <sup>3</sup> /(кмоль·с·K <sup>0,5</sup> ) $2,33 \times 10^{11}$ м <sup>3</sup> /(kmol·s·K <sup>0,5</sup> )	0,5	$1,67 \times 10^8$	[CH <sub>x</sub> O <sub>y</sub> N <sub>z</sub> ][O <sub>2</sub> ]	[26]
R2	$1,3 \times 10^{11}$ м <sup>3</sup> /(кмоль·с) $1,3 \times 10^{11}$ м <sup>3</sup> /(kmol·s)	0	$1,26 \times 10^8$	[CO][O <sub>2</sub> ] <sup>0,5</sup> [H <sub>2</sub> O] <sup>0,5</sup>	[26]

#### Модели равновесной химии

Скорость горения летучих веществ предполагается мгновенной. Состав продуктов сгорания определен по справочным таблицам из переменной смешения и температуры с использованием предположения о химическом равновесии. Взаимодействие турбулентности и химии описано с помощью функции плотности вероятности (PDF – probability density function) предполагаемой формы [27, 28].

Концентрации газовых компонентов в потоке определены:

- по модели с одной переменной смешения, где состав топлива представляется укрупненно, как смесь летучих веществ и коксового остатка;
- модели с двумя переменными смешения, где летучие вещества и коксовый остаток представляются как отдельные топливные потоки.

#### Модель образования и восстановления NO<sub>x</sub>

Концентрации NO<sub>x</sub> в потоке определены методом постпроцессинга. Учтены тепловой [29] и топливный механизмы образования оксидов азота [30]. Во время выхода летучих веществ из частицы угля часть азота топлива остается в коксовом остатке (40 % [31]) и затем окисляется до NO<sub>x</sub>. Другая часть азота топлива выходит вместе с летучими веществами в виде HCN и NH<sub>3</sub>, которые затем образуют NO<sub>x</sub> либо N<sub>2</sub>. Принято, что 99 % азота летучих веществ выходит из угля в виде HCN [32]. Также учтен механизм восстановления NO<sub>x</sub> на поверхности коксового остатка [33], где удельная площадь поверхности принята равной  $2,5 \times 10^4$  м<sup>2</sup>/кг.

#### Результаты исследования

Результаты численного моделирования (аксиальные и тангенциальные компоненты скорости, температуры, концентрации газовых компонентов) представлены для четырех подходов к моделированию горения пылеугольного топлива в турбулентном потоке:

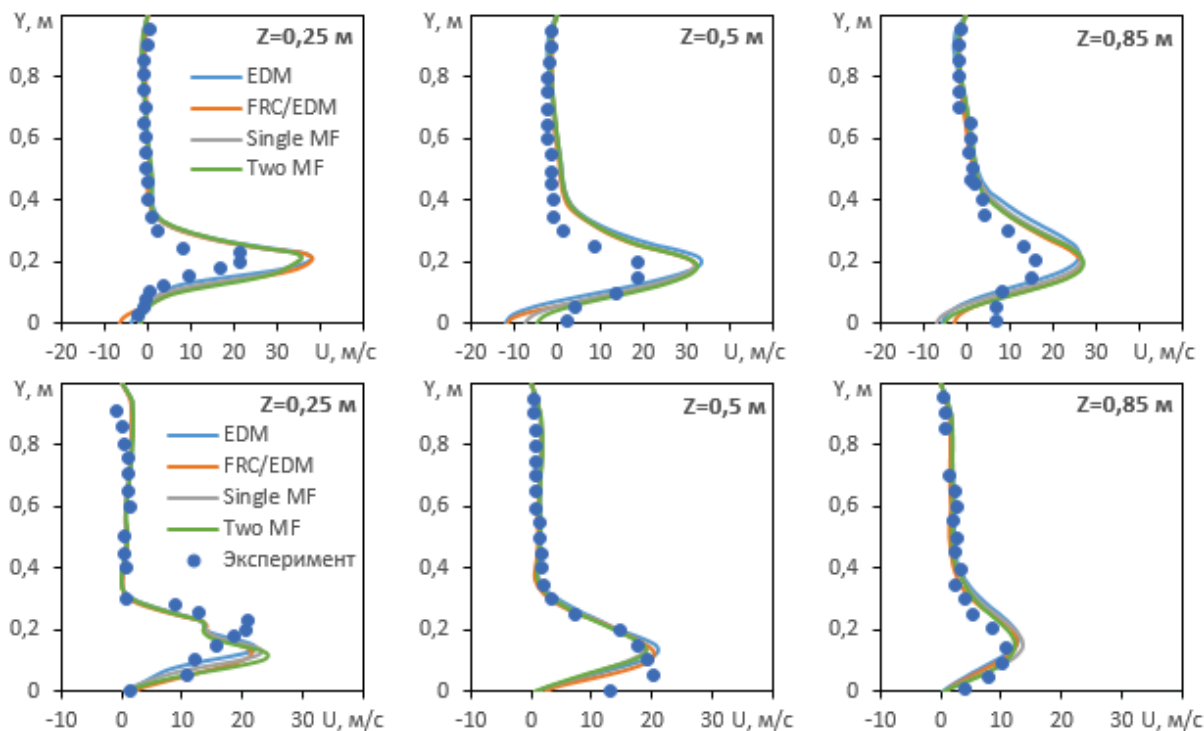
- модель «обрыва вихря» (EDM – eddy dissipation model);
- комбинация кинетической модели горения с моделью «обрыва вихря» (FRC/EDM – finite-rate chemistry/eddy dissipation model);
- модель равновесной химии с одной переменной смешения (Single MF – single mixture fraction);
- модель равновесной химии с двумя переменными смешения (Two MF – two mixture fraction).

#### Поле скоростей

На рис. 5 представлены предсказанные численным моделированием и измеренные в эксперименте аксиальные и тангенциальные скорости в разных сечениях топки. Из данного сравнения видно, что все четыре подхода к моделированию турбулентного горения дают почти идентичные результаты, которые качественно хорошо совпадают с экспериментальными.

Наибольшие качественные различия наблюдаются в зоне рециркуляции газов на оси горелки. Толщина зоны рециркуляции предсказана довольно хорошо, а длина больше, чем измеренная. Однако в работе [14] предсказанная длина зоны рециркуляции, наоборот, меньше измеренной в эксперименте. Данные различия в результатах моделирования могут быть обусловлены использованием разных моделей выхода летучих веществ из угля, так как различные модели выделения летучих веществ создают различные формы пламени, что влияет на длину и форму зоны рециркуляции [16].

Количественные расхождения предсказанных и измеренных значений скоростей можно объяснить тем, что в эксперименте измерялась скорость не газовой фазы, а дискретных частиц. Погрешность измерения таким методом может быть довольно значительной.



**Рис. 5.** Предсказанные (линии) и экспериментальные (точки) значения аксиальных скоростей – сверху, тангенциальных – снизу

**Fig. 5.** Predicted (lines) and experimental (dots) values of axial velocities – from above, tangential – from below

#### Поле температур

Из сравнения предсказанных и измеренных температур (рис. 6) видно, что за исключением сечения  $Z=0,25$  м наилучшее качественное и количественное совпадение получено подходом FRC/EDM (отклонения не более  $80$  °C). В сечении топки  $Z=0,25$  м наблюдается большое несоответствие измеренных и предсказанных температур, независимо от подхода к моделированию. Авторы работы [14] это объясняют нестабильностью пылеугольного факела в данном сечении топки, вследствие чего в эксперименте фактически измерялась температура, усредненная по некоторому радиусу.

#### Концентрации $\text{CO}_2$ и $\text{O}_2$

Наилучшее качественное и количественное совпадение рассчитанных и измеренных концентраций  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$  получено подходом FRC/EDM (рис. 7, 8).

#### Концентрации CO

Сравнение рассчитанных и измеренных концентраций CO (рис. 9) показывает, что за исключением сечения  $Z=0,25$  м наилучшее качественное и количественное совпадение получено подходами, предполагающими химическое равновесие в реагирующей среде: Single MF и Two MF.



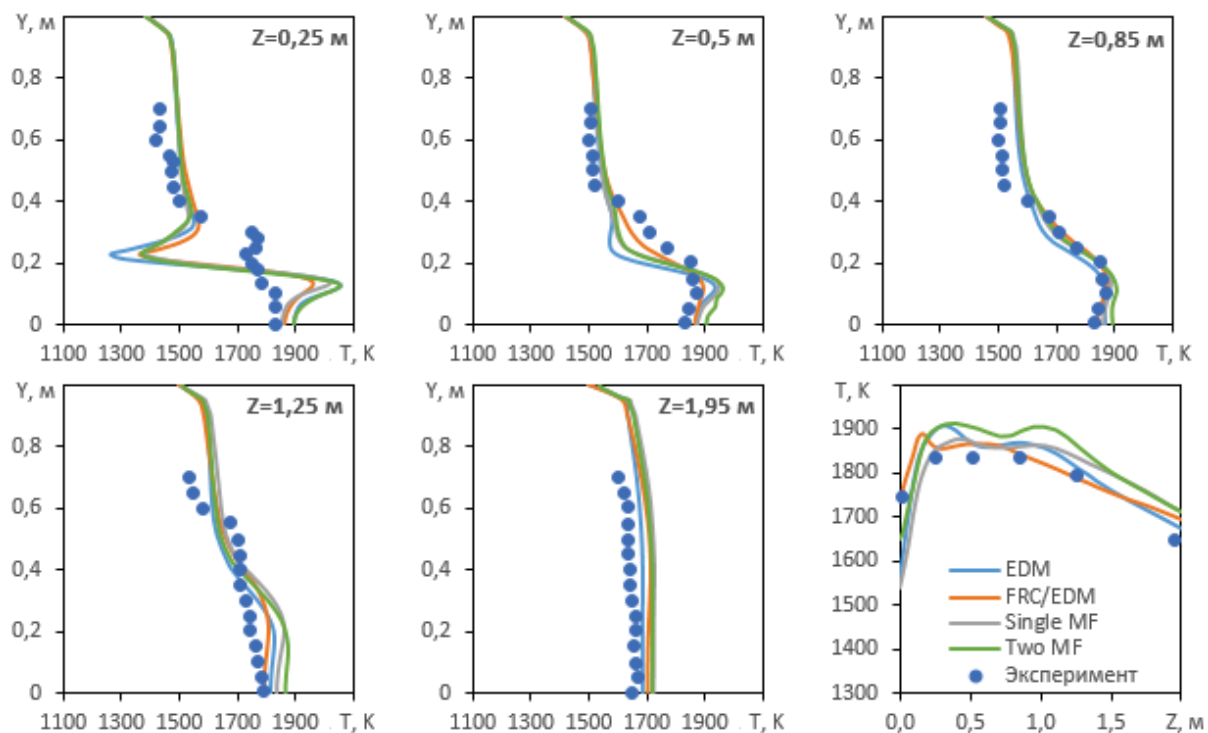


Рис. 6. Предсказанные (линии) и экспериментальные (точки) значения температур  
 Fig. 6. Predicted (lines) and experimental (dots) temperature values

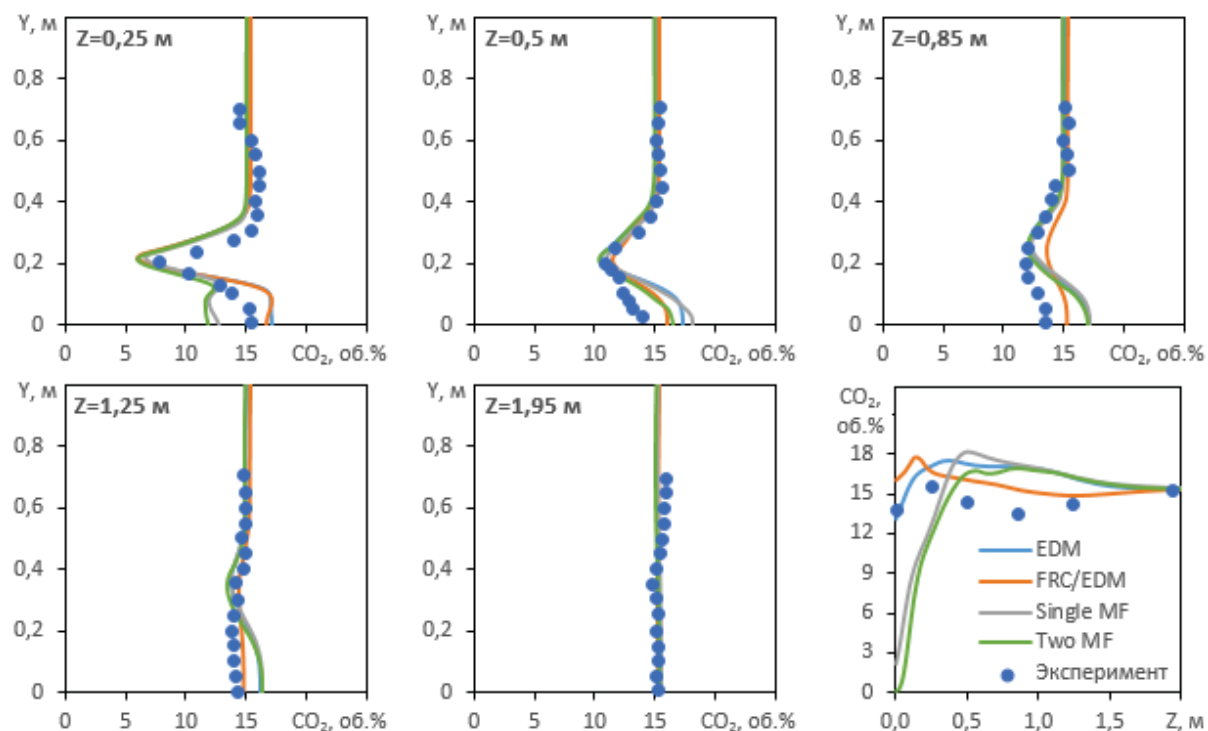


Рис. 7. Предсказанные (линии) и экспериментальные (точки) значения концентрации  $CO_2$  в сухих газах  
 Fig. 7. Predicted (lines) and experimental (dots)  $CO_2$  concentrations in dry gases

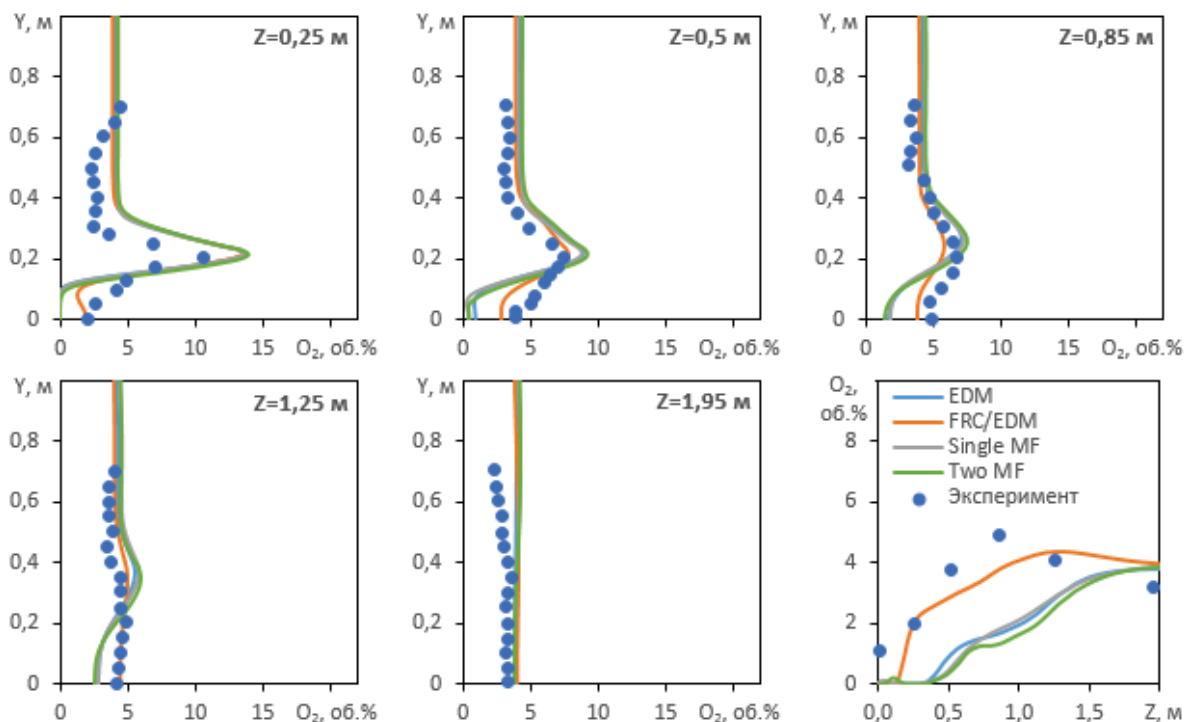
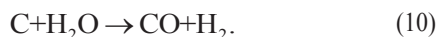


Рис. 8. Предсказанные (линии) и экспериментальные (точки) значения концентрации  $O_2$  в сухих газах

Fig. 8. Predicted (lines) and experimental (dots)  $O_2$  concentrations in dry gases

В этих моделях учитывается взаимодействие газовых компонентов с углеродом коксового остатка, а в проведенных расчетах подходами EDM и FRC/EDM предполагается, что единственным продуктом горения углерода является  $CO_2$ .  $CO$  в этих моделях образуется только как продукт горения летучих веществ угля, поэтому концентрация  $CO$  в потоке быстро падает и в сечении  $Z=1,25$  м исчезает полностью. Для устранения такого нефизичного исчезновения  $CO$  в потоке можно, например, задать единственным продуктом горения углерода  $CO$ , который затем догорает в газовой фазе до  $CO_2$ . Но при таком допущении, вероятно, предсказанные расчетом концентрации  $CO$  будут выше измеренных. Однако для модели FRC/EDM есть ещё один вариант улучшить совпадение предсказанных концентраций  $CO$  с измеренными в эксперименте. Имеется возможность дополнить модель реакциями газификации коксового остатка, такими как (9) и (10).



В сечении топки  $Z=0,25$  м концентрации  $CO$  в ядре горения, предсказанные моделями Single MF и Two MF, значительно превышают измеренные в эксперименте. Вероятно, это связано с тем, что в этой зоне химическое равновесие в реагирующей среде не достигается.

Концентрации  $NO_x$

Сравнение предсказанных и измеренных концентраций  $NO_x$  (рис. 10) показывает, что наилучшее качественное совпадение в ядре горения получено подходом FRC/EDM.

Что касается количественного совпадения предсказанных и измеренных концентраций  $NO_x$ , то все четыре подхода к моделированию турбулентного горения дают схожие результаты, которые превышают измеренные в эксперименте на 10–20 %. Возможно, это связано с недостаточностью удельной площади поверхности коксового остатка, принятой в модели восстановления  $NO_x$ , что занижает скорость восстановления  $NO_x$  на поверхности коксового остатка. Также на результат расчета концентраций  $NO_x$  в потоке значительное влияние может оказывать принятая в расчете модель выхода из угля летучих веществ [34]. Для определения влияния этого фактора на результаты расчета требуется отдельное исследование.

### Выводы

Проведено численное моделирование горения пылеугольного топлива в турбулентном потоке четырьмя разными подходами: моделями равновесной химии с одной и двумя переменными смешения; моделью «обрыва вихря» и её комбинацией с кинетической моделью горения. Сравнительным анализом результатов моделирования с экспериментально измеренными параметрами пылеугольного факела установлено следующее.

1. Применение разных подходов к моделированию горения пылеугольного топлива в турбулентном потоке мало влияет на предсказанное поле скоростей. На его вид большее влияние оказывают другие модельные факторы, например, модель выхода летучих веществ из угля.
2. Лучшее совпадение поля температур, концентраций  $O_2$  и  $CO_2$  получено моделью «обрыва вихря» в комбинации с кинетической моделью горения.

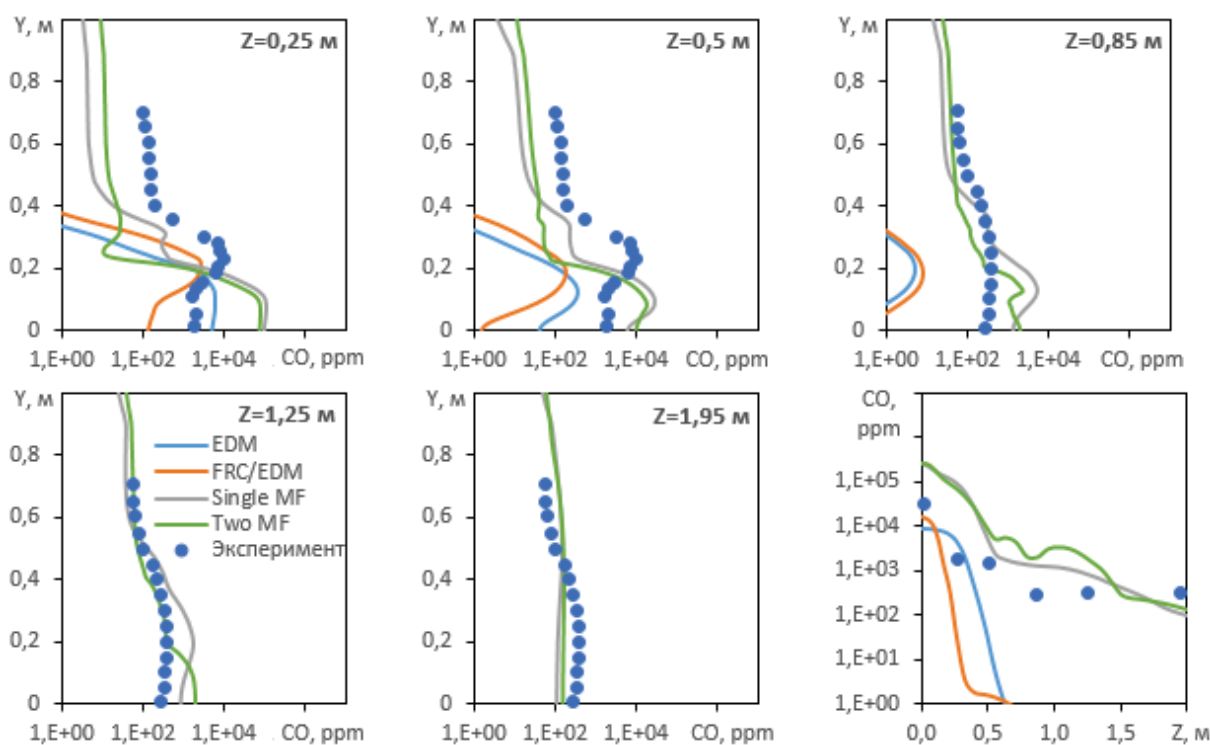


Рис. 9. Предсказанные (линии) и экспериментальные (точки) значения концентрации CO в сухих газах

Fig. 9. Predicted (lines) and experimental (dots) CO concentrations in dry gases

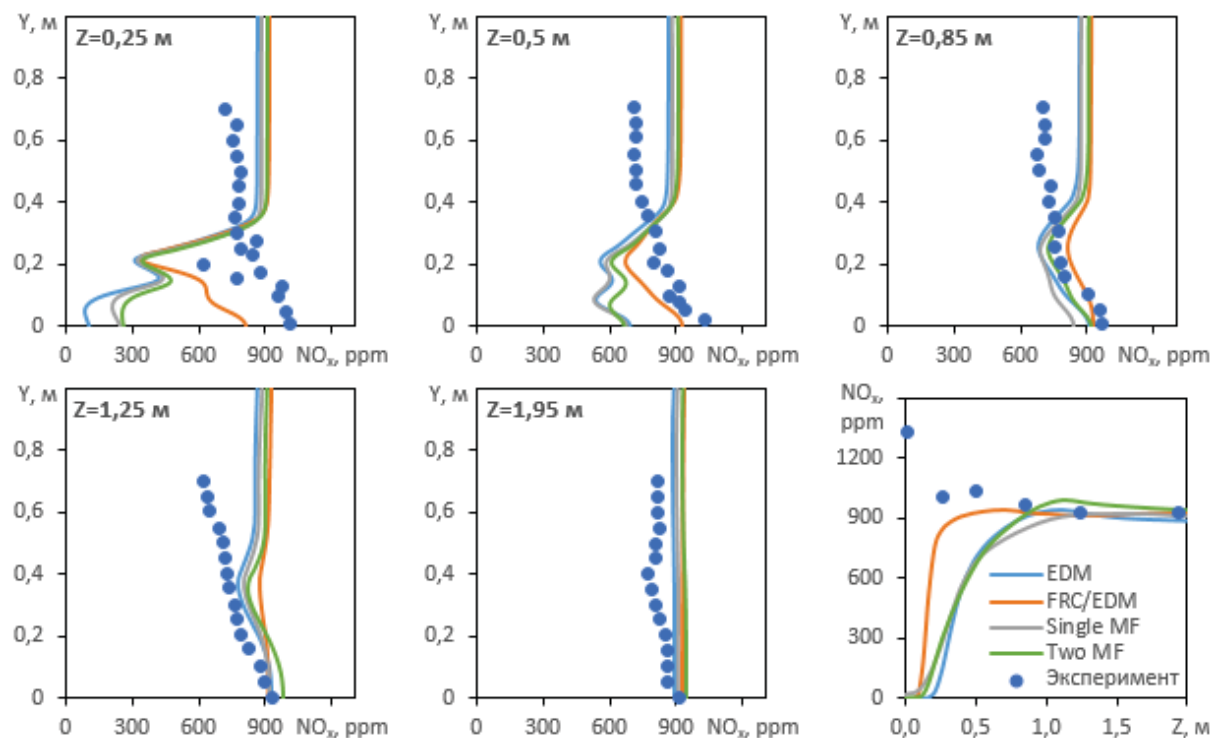


Рис. 10. Предсказанные (линии) и экспериментальные (точки) значения концентрации NO<sub>x</sub> в сухих газах

Fig. 10. Predicted (lines) and experimental (dots) NO<sub>x</sub> concentrations in dry gases

3. Лучшее совпадение концентрации CO получено моделями равновесной химии. Однако для модели «обрыва вихря» в комбинации с кинетической моделью горения имеется возможность улучшить совпадение, путем добавления в модель реакций газификации коксового остатка.
4. Лучшее качественное совпадение концентрации NO<sub>x</sub> в ядре горения получено моделью «обрыва вихря» в комбинации с кинетической моделью горения. На количественные расхождения, по-видимому, большее влияние оказывают другие модельные факторы, такие как модель выхода ле-

тухих веществ из угля и принята в расчете площадь поверхности коксового остатка.

В целом все исследованные подходы к моделированию горения пылеугольного топлива в турбулентном потоке демонстрируют довольно хорошее совпадение с экспериментальными данными. Модель «обрыва вихря» в комбинации с кинетической моделью горения имеет преимущество в точности, а модель равновесной химии с одной переменной смешения имеет преимущество в скорости сходимости решения,

так как для определения концентраций всех компонентов решается минимальное количество уравнений.

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

*Работа выполнена в рамках программы развития Тюменского государственного университета (программа стратегического академического лидерства «Приоритет-2030»).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IEA online data services. Renewables information // IEA. URL: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/electricity> (дата обращения 9.06.2022).
2. Advanced modeling approaches for CFD simulations of coal combustion and gasification / C. Hasse, P. Debiagi, X. Wen, K. Hildebrandt, M. Vascellari, T. Faravelli // Progress in Energy and Combustion Science. – 2021. – V. 86. – 100938.
3. Mularski J., Pawlak-Kruczek H., Modlinski N. A review of recent studies of the CFD modelling of coal gasification in entrained flow gasifier, covering devolatilization, gas-phase reactions, surface reactions, models and kinetics // Fuel. – 2020. – V. 271. – 117620.
4. Dewangan S.K., Naik M.P.K., Deshmukh V. Parametric study of the non-premixed coal combustion in furnace for heat transfer and emission characteristics // Journal of Thermal Engineering. – 2020. – V. 6. – № 6. – P. 323–353.
5. A computational fluid dynamics based study of the combustion characteristics of coal blends in pulverised coal-fired furnace / C. Sheng, B. Moghtaderi, R. Gupta, T.F. Wall // Fuel. – 2004. – V. 83. – № 11. – P. 1543–1552.
6. PDF modeling and simulations of pulverized coal combustion. P. 2: Application / M. Stöllinger, B. Naud, D. Roekaerts, N. Beishuizen, S. Heinz // Combustion and Flame. – 2013. – V. 160. – № 2. – P. 396–410.
7. Flores D.V., Fletcher T.H. Use of two mixture fractions to treat coal combustion products in turbulent pulverized-coal flames // Combustion science and technology. – 2000. – V. 150. – № 1. – P. 1–26.
8. An investigation into the use of CFD to model the co-firing of *Jatropha curcas* seed cake with coal / B.N. Madanayake, S. Gan, C. Eastwick, H.K. Ng // International Journal of Green Energy. – 2018. – V. 15. – № 11. – P. 605–621.
9. Zhuo Y., Shen Y. Three-dimensional transient modelling of coal and coke co-combustion in the dynamic raceway of ironmaking blast furnaces // Applied energy. – 2020. – V. 261. – 114456.
10. Chernetskiy M., Vershinina K., Strizhak P. Computational modeling of the combustion of coal water slurries containing petrochemicals // Fuel. – 2018. – V. 220. – P. 109–119.
11. Numerical modeling and experimental investigation on the use of brown coal and its beneficiated semicoke for coal blending combustion in a 600 MW utility furnace / J. Zhang, Q. Wang, Y. Wei, L. Zhang // Energy and Fuels. – 2015. – V. 29. – № 2. – P. 1196–1209.
12. Численное исследование влияния избытка первичного воздуха на процессы горения в топочной камере энергетического котла с многоканальными вихревыми горелками / А.В. Гиль, А.С. Заворин, О.М. Кокшарев, Е.С. Воронцова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 9. – С. 18–27.
13. Mularski J., Modlinski N. Impact of chemistry-turbulence interaction modeling approach on the CFD simulations of entrained flow coal gasification // Energies. – 2020. – V. 13. – № 23. – 6467.
14. Peters A.A.F., Weber R. Mathematical modeling of a 2.4 MW swirling pulverized coal flame // Combustion Science and Technology. – 1997. – V. 122. – № 1–6. – P. 131–182.
15. Кузнецов В.А. Математическое моделирование процессов тепло- и массообмена для перспективных технологий энергетического использования угольного топлива: дис. ... канд. техн. наук. – Красноярск, 2018. – 125 с.
16. Eastwick C.N., Pickering S.J., Aroussi A. Comparisons of two commercial computational fluid dynamics codes in modelling pulverised coal combustion for a 2.5 MW burner // Applied Mathematical Modelling. – 1999. – V. 23. – № 6. – P. 437–446.
17. A new  $k-\epsilon$  eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows / T.-H. Shih, W.W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang, J. Zhu // Computers and Fluids. – 1995. – V. 24. – № 3. – P. 227–238.
18. FLUENT Theory Guide, Version 17.2. – Canonsburg, PA, ANSYS, Inc., 2016. – 812 p.
19. Raithby G.D., Chui E.H. A finite-volume method for predicting a radiant heat transfer in enclosures with participating media // Journal of Heat Transfer. – 1990. – V. 112. – № 2. – P. 415–423.
20. Ranade V.V., Gupta D.F. Computational modeling of pulverized coal fired boilers. – Boca Raton: CRC Press, 2014. – 288 p.
21. Gosman A.D., Ioannides E. Aspects of computer simulation of liquid-fueled combustors // Journal of energy. – 1983. – V. 7. – № 6. – P. 482–490.
22. Badzioch S., Hawksley P.G.W. Kinetics of thermal decomposition of pulverized coal particles // Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development. – 1970. – V. 9. – № 4. – P. 521–530.
23. Field M.A. Rate of combustion of size-graded fractions of char from a low-rank coal between 1 200°K and 2 000°K // Combustion and Flame. – 1969. – V. 13. – № 3. – P. 237–252.
24. Baum M.M., Street P.J. Predicting the combustion behaviour of coal particles // Combustion Science and Technology. – 1971. – V. 3. – № 5. – P. 231–243.
25. Magnussen B.F., Hjertager B.H. On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion // Symposium (International) on Combustion. – 1977. – V. 16. – № 1. – P. 719–729.
26. A kinetic model for the prediction of NO emissions from staged combustion of pulverized coal / D. Försch, F. Kluger, U. Schnell, H. Spliethoff, K.R.G. Hein // Symposium (International) on Combustion. – 1998. – V. 27. – № 2. – P. 3037–3044.
27. Jones W.P., Whitelaw J.H. Calculation methods for reacting turbulent flows: a review // Combustion and Flame. – 1982. – V. 48. – № C. – P. 1–26.
28. Sivathanu Y.R., Faeth G.M. Generalized state relationships for scalar properties in nonpremixed hydrocarbon/air flames // Combustion and Flame. – 1990. – V. 82. – № 2. – P. 211–230.
29. Зельдович Я.Б., Садовников П.Я., Франк-Каменский Д.А. Окисление азота при горении. – М.: Изд-во АН СССР, 1947. – 148 с.
30. De Soete G.G. Overall reaction rates of NO and N<sub>2</sub> formation from fuel nitrogen // Symposium (International) on Combustion. – 1975. – V. 15. – № 1. – P. 1093–1102.
31. Haas J., Tamura M., Weber R. Characterisation of coal blends for pulverised fuel combustion // Fuel. – 2001. – V. 80. – № 9. – P. 1317–1323.
32. The NO and N<sub>2</sub>O formation mechanism during devolatilization and char combustion under fluidized-bed conditions / F. Winter, C. Wartha, G. Löffler, H. Hofbauer // Symposium (International) on Combustion. – 1996. – V. 26. – № 2. – P. 3325–3334.
33. NO/char reactions at pulverized coal flame conditions / J.M. Levy, L.K. Chan, A.F. Sarofim, J.M. Beér // Symposium (International) on Combustion. – 1981. – V. 18. – № 1. – P. 111–120.
34. Diez L.I., Cortés C., Pallarés J. Numerical investigation of NOx emissions from a tangentially-fired utility boiler under conventional and overfire air operation // Fuel. – 2008. – V. 87. – № 7. – P. 1259–1269.

Поступила 20.06.2022 г.  
Прошла рецензирование 11.10.2022 г.

**Информация об авторах**

*Пронин А.К.*, аспирант Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета; инженер-исследователь Тюменского государственного университета.

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

UDC 621.181:519.876.5

## ANALYSIS OF APPROACHES TO NUMERICAL MODELING OF PULVERIZED COAL FUEL COMBUSTION IN A TURBULENT FLOW

Alexander K. Pronin<sup>1,2</sup>,  
pronix@tpu.ru

Andrey V. Gil<sup>1</sup>,  
andgil@tpu.ru

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

<sup>2</sup> University of Tyumen,  
6, Volodarsky street, Tyumen, 625003, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the need for accurate reproduction of experimental measurements by mathematical models, since numerical simulation is widely used both for the development of new technologies for the combustion of solid fuels and for the modernization of existing boiler units. And as it is known, the parameters of a pulverized coal flame predicted by numerical simulation directly depend on the way the combustion chemistry in a turbulent flow is modeled.

**The main aim** of the research is to study the accuracy of reproduction of experimental measurements for four approaches to the numerical simulation of ignition and burnout of combustible components of pulverized coal fuel in a turbulent flow.

**Objects:** temperatures, concentrations of gas components (CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO and NO<sub>x</sub>), axial and tangential velocity components inside the IFRF 2.4 MW furnace.

**Methods:** comparison of experimentally measured parameters of a pulverized coal flame and those predicted by numerical simulation. Numerical simulation was performed using the ANSYS FLUENT software package. The combustion of coal dust in the furnace is modeled as a two-phase turbulent flow system consisting of gas and discrete phases.

**Results.** Numerical modeling of the combustion of pulverized coal in a turbulent flow has been carried out using four different approaches: equilibrium chemistry models with one and two mixture fractions; model of «eddy dissipation» and its combination with the kinetic model of combustion. A comparative analysis of the simulation results with the experimentally measured parameters of a pulverized coal flame established that all the studied approaches to modeling the pulverized coal combustion in a turbulent flow demonstrate a fairly good agreement with the experimental data. The «eddy dissipation» model in combination with the combustion kinetic model has the advantage in accuracy, and the equilibrium chemistry model with one mixture fraction has the advantage in the time of solution convergence.

### Key words:

Pulverized coal, combustion, numerical modeling, swirl burner, eddy dissipation model, chemical kinetics, chemical equilibrium model, mixture fraction.

The study was supported by the State assignment no. FEWZ-2021-0014 (Scientific and technical foundations and applied solutions for integrated energy and thermal processing of biomass to ensure environmentally friendly technologies in energy industry and metallurgy).

The work was carried out as part of academic leadership program of the University of Tyumen (strategic academic leadership program «Priority-2030»).

### REFERENCES

1. IEA Online Data Services. Renewables Information. Available at: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/electricity> (accessed 9 June 2022).
2. Hasse C., Debiagi P., Wen X., Hildebrandt K., Vascellari M., Faravelli T. Advanced modeling approaches for CFD simulations of coal combustion and gasification. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2021, vol. 86, 100938.
3. Mularski J., Pawlak-Kruczek H., Modlinski N. A review of recent studies of the CFD modelling of coal gasification in entrained flow gasifier, covering devolatilization, gas-phase reactions, surface reactions, models and kinetics. *Fuel*, 2020, vol. 271, 117620.
4. Dewangan S.K., Naik M.P.K., Deshmukh V. Parametric study of the non-premixed coal combustion in furnace for heat transfer and emission characteristics. *Journal of Thermal Engineering*, 2020, vol. 6, no. 6, pp. 323–353.
5. Sheng C., Moghtaderi B., Gupta R., Wall T.F. A computational fluid dynamics based study of the combustion characteristics of coal blends in pulverised coal-fired furnace. *Fuel*, 2004, vol. 83, no. 11, pp. 1543–1552.
6. Stöllinger M., Naud B., Roekaerts D., Beishuizen N., Heinz S. PDF modeling and simulations of pulverized coal combustion. P. 2: Application. *Combustion and Flame*, 2013, vol. 160, no. 2, pp. 396–410.
7. Flores D.V., Fletcher T.H. Use of two mixture fractions to treat coal combustion products in turbulent pulverized-coal flames. *Combustion science and technology*, 2000, vol. 150, no. 1, pp. 1–26.
8. Madanayake B.N., Gan S., Eastwick C., Ng H.K. An investigation into the use of CFD to model the co-firing of *Jatropha curcas* seed cake with coal. *International Journal of Green Energy*, 2018, vol. 15, no. 11, pp. 605–621.
9. Zhuo Y., Shen Y. Three-dimensional transient modelling of coal and coke co-combustion in the dynamic raceway of ironmaking blast furnaces. *Applied energy*, 2020, vol. 261, 114456.
10. Chernetskiy M., Vershinina K., Strizhak P. Computational modeling of the combustion of coal water slurries containing petrochemicals. *Fuel*, 2018, vol. 220, pp. 109–119.
11. Zhang J., Wang Q., Wei Y., Zhang L. Numerical modeling and experimental investigation on the use of brown coal and its beneficiated semicoke for coal blending combustion in a 600 MW utility furnace. *Energy and Fuels*, 2015, vol. 29, no. 2, pp. 1196–1209.
12. Gil A.V., Zavorin A.S., Koksharev O.M., Vorontsova E.S. Numerical study of effect of primary air excess on combustion in a furnace chamber of a utility boiler with multi-channel swirl burners.

- Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 9, pp. 18–27.
13. Mularski J., Modlinski N. Impact of chemistry-turbulence interaction modeling approach on the CFD simulations of entrained flow coal gasification. *Energies*, 2020, vol. 13, no. 23, 6467.
  14. Peters A.A.F., Weber R. Mathematical modeling of a 2.4 MW swirling pulverized coal flame. *Combustion Science and Technology*, 1997, vol. 122, no. 1–6, pp. 131–182.
  15. Kuznetsov V.A. *Matematicheskoe modelirovanie protsessov teplo-i massoobmena dlya perspektivnykh tekhnologiy energeticheskogo ispolzovaniya ugolnogo topliva*. Diss. Kand. nauk [Mathematical modeling of heat and mass transfer processes for promising technologies for the energy use of coal fuel. Cand. Diss.]. Krasnoyarsk, 2018. 125 p.
  16. Eastwick C.N., Pickering S.J., Aroussi A. Comparisons of two commercial computational fluid dynamics codes in modelling pulverised coal combustion for a 2.5 MW burner. *Applied Mathematical Modelling*, 1999, vol. 23, no. 6, pp. 437–446.
  17. Shih T.H., Liou W.W., Shabbir A., Yang Z., Zhu J. A new  $k-\epsilon$  eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows. *Computers and Fluids*, 1995, vol. 24, no. 3, pp. 227–238.
  18. *FLUENT Theory Guide, Version 17.2*. Canonsburg, PA, ANSYS, Inc., 2016. 812 p.
  19. Raithby G.D., Chui E.H. A finite-volume method for predicting a radiant heat transfer in enclosures with participating media. *Journal of Heat Transfer*, 1990, vol. 112, no. 2, pp. 415–423.
  20. Ranade V.V., Gupta D.F. *Computational Modeling of Pulverized Coal Fired Boilers*. Boca Raton, CRC Press, 2014. 288 p.
  21. Gosman A.D., Ioannides E. Aspects of computer simulation of liquid-fueled combustors. *Journal of energy*, 1983, vol. 7, no. 6, pp. 482–490.
  22. Badzioch S., Hawksley P.G.W. Kinetics of thermal decomposition of pulverized coal particles. *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1970, vol. 9, no. 4, pp. 521–530.
  23. Field M.A. Rate of combustion of size-graded fractions of char from a low-rank coal between 1 200°K and 2 000°K. *Combustion and Flame*, 1969, vol. 13, no. 3, pp. 237–252.
  24. Baum M.M., Street P.J. Predicting the combustion behaviour of coal particles. *Combustion Science and Technology*, 1971, vol. 3, no. 5, pp. 231–243.
  25. Magnussen B.F., Hjertager B.H. On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion. *Symposium (International) on Combustion*, 1977, vol. 16, no. 1, pp. 719–729.
  26. Förtsch D., Kluger F., Schnell U., Spliethoff H., Hein K.R.G. A kinetic model for the prediction of NO emissions from staged combustion of pulverized coal. *Symposium (International) on Combustion*, 1998, vol. 27, no. 2, pp. 3037–3044.
  27. Jones W.P., Whitelaw J.H. Calculation methods for reacting turbulent flows: a review. *Combustion and Flame*, 1982, vol. 48, no. C, pp. 1–26.
  28. Sivathanu Y.R., Faeth G.M. Generalized state relationships for scalar properties in nonpremixed hydrocarbon/air flames. *Combustion and Flame*, 1990, vol. 82, no. 2, pp. 211–230.
  29. Zeldovich Ya.B., Sadovnikov P.Ya., Frank-Kamensky D.A. *Okislenie azota pri gorenii* [Nitrogen oxidation during combustion]. Moscow, AN SSSR Publ., 1947. 148 p.
  30. De Soete G.G. Overall reaction rates of NO and N<sub>2</sub> formation from fuel nitrogen. *Symposium (International) on Combustion*, 1975, vol. 15, no. 1, pp. 1093–1102.
  31. Haas J., Tamura M., Weber R. Characterisation of coal blends for pulverised fuel combustion. *Fuel*, 2001, vol. 80, no. 9, pp. 1317–1323.
  32. Winter F., Wartha C., Löffler G., Hofbauer H. The NO and N<sub>2</sub>O formation mechanism during devolatilization and char combustion under fluidized-bed conditions. *Symposium (International) on Combustion*, 1996, vol. 26, no. 2, pp. 3325–3334.
  33. Levy J.M., Chan L.K., Sarofim A.F., Beér J.M. NO/char reactions at pulverized coal flame conditions. *Symposium (International) on Combustion*, 1981, vol. 18, no. 1, pp. 111–120.
  34. Díez L.I., Cortés C., Pallarés J. Numerical investigation of NO<sub>x</sub> emissions from a tangentially-fired utility boiler under conventional and overfire air operation. *Fuel*, 2008, vol. 87, no. 7, pp. 1259–1269.

Received: 20 June 2022.  
Reviewed: 11 October 2022.

#### Information about the authors

**Alexander K. Pronin**, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University; research engineer, University of Tyumen.

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

УДК 622.276.64

## ИЗУЧЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОЛИМЕРНЫХ СОСТАВОВ НА ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ ПОТОКИ ПЛАСТА Ю<sub>1</sub><sup>2+3</sup> НЕФТЯНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ «Х»

Серебрянников Александр Александрович<sup>1</sup>,  
serebriannikov.alexandr@yandex.ru

Зятиков Павел Николаевич<sup>1</sup>,  
zpavel@tpu.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность** исследования заключается в поиске методов увеличения нефтеотдачи, направленных на повышение степени охвата нефтяных пластов, разрабатываемых методом заводнения, что позволит продолжить эксплуатацию месторождений с высокой выработкой запасов на последних стадиях разработки. Вовлечение в разработку сложнолокализованных недренлируемых запасов за счет закачки полимерных составов позволит продлить жизненный цикл истощенных месторождений и повысить конечный коэффициент нефтеизвлечения.

**Цель:** изучение процесса воздействия закачки полимерных составов на изменение фильтрационных потоков нефтяного пласта с целью повышения конечного коэффициента нефтеизвлечения.

**Объекты:** песчаные пласты горизонта Ю<sub>1</sub> Васюганской свиты, которые отличаются своей неоднородностью, невидержанностью по мощности, различной проницаемостью по разрезу.

**Методы:** анализ выработки запасов нефти по характеристикам вытеснения, а также аналитическим зависимостям; анализ текущего состояния разработки; оценка эффективности сформированной системы заводнения; аналитические расчеты с использованием уравнения фильтрации; лабораторные исследования на фильтрационной модели; аналитическая оценка результатов апробации выбранных составов на участке месторождения «Х».

**Результаты.** Обобщены результаты экспериментальных исследований влияния добавления в состав закачиваемой в пласт жидкости полимерных реагентов на изменение коллекторских свойств продуктивного пласта. Представлены результаты лабораторных исследований по определению технологий и составов для реализации программы закачки полимеров в пласт Ю<sub>1</sub><sup>2+3</sup> месторождения «Х». Специально для проведения исследований в лабораторных условиях была создана фильтрационная модель реального пласта из образцов керна рассматриваемого месторождения, условия фильтрации жидкости через керновую колонку максимально приближены к пластовым. Представлены результаты опытно-промышленных работ по применению технологии закачки полимерных составов в пласт Ю<sub>1</sub><sup>2+3</sup> месторождения «Х». Проведен анализ эффективности проведенных работ, составлены рекомендации по дальнейшему использованию технологии закачки полимерных составов в продуктивный пласт.

### Ключевые слова:

Полимерное заводнение, методы увеличения нефтеотдачи, фильтрационные потоки, полимеры, дренирование запасов.

### Введение

В настоящее время большое значение имеют исследования, которые направлены на повышение эффективности традиционного заводнения продуктивных пластов. Несмотря на все преимущества данного способа разработки нефтегазовых залежей, в среднем более половины геологических запасов углеводородов не удается извлечь из недр, так как они остаются не вовлеченными в разработку из-за неравномерного характера выработки запасов по разрезу и площади пласта. Также стоит отметить, что большинство месторождений нефти и газа в России находятся на третьей и четвертой стадиях разработки, которые характеризуются снижением уровней добычи углеводородов, высокой обводненностью и постепенным сокращением действующего фонда скважин. Рост обводненности на добывающих скважинах может быть связан как непосредственно с процессом выработки запасов углеводородов, так и с различными негативными факторами: образование внутри- и заколонных перетоков из-за разрушения цементного кольца по стволу скважины, появление конусов заводнения и промытых высокопроницаемых каналов фильтрации, способствующих прорыву фронта воды к забоям до-

бывающих скважин, рост трещин авто-ГРП в результате работы нагнетательных скважин при высоких забойных давлениях [1].

Одним из методов предотвращения преждевременного обводнения добывающих скважин является закачка в продуктивный пласт модифицированных сшитых полимерных систем (МСПС). Принцип действия МСПС заключается в выравнивании фронта воды от нагнетательных скважин в результате коагуляции порового пространства коллектора во время обработки скважин при возникновении химических реакций [2]. Образующиеся в процессе обработки осадки и гели способствуют перераспределению потоков нагнетаемого флюида внутри пласта и формированию новых фильтрационных каналов, что позволяет увеличить коэффициент охвата пласта воздействием заводнения. Закачка МСПС в продуктивный пласт является разновидностью полимерного заводнения, суть которого заключается в добавлении в воду высокомолекулярных химических реагентов – полимеров, имеющих способность значительно увеличивать вязкость закачиваемой воды и уменьшать подвижность. Полимерное заводнение относится к третичным методам увеличения нефтеотдачи (МУН) [3, 4].



### Перспективы использования технологий МУН на месторождении «Х»

Месторождение «Х» открыто в 1985 г., введено в разработку в 1998 г. На месторождении разрабатывается один эксплуатационный объект разработки Ю<sub>1</sub><sup>2+3</sup>, состоящий из двух продуктивных пластов: низкопроницаемого Ю<sub>1</sub><sup>2</sup> и неоднородного Ю<sub>1</sub><sup>3</sup>. Пласты разрабатываются единой сеткой наклонно-направленных скважин с гидроразрывом пласта (ГРП) и объединены в один объект разработки, несмотря на значительные различия фильтрационно-емкостных свойств и добычных возможностей пластов, в связи с экономической нецелесообразностью разработки пласта Ю<sub>1</sub><sup>2</sup> отдельной сеткой скважин.

Разработка эксплуатационного объекта Ю<sub>1</sub><sup>2+3</sup> характеризуется падающими уровнями добычи нефти и преждевременным обводнением действующего фонда скважин, который не способен выработать утвержденные запасы углеводородов. Недостижение утвержденных извлекаемых запасов прогнозируется по всем частям месторождения, но наиболее проблемные – Север и Юг. Отличительной особенностью Северной части месторождения является наличие в разрезе пласта Ю<sub>1</sub><sup>3</sup> высокопроницаемой пачки Ю<sub>1</sub><sup>3А</sup>, которая на данный момент практически полностью выработана и промыта, в совокупности с низкопроницаемой пачкой Ю<sub>1</sub><sup>3Б</sup>, которая почти не вовлечена в разработку. Вследствие этого нагнетаемая по скважинам системы ППД жидкость фильтруется по промытой высокопроницаемой части пласта к забоям добывающих скважин, а основные извлекаемые запасы нефти остаются нетронутыми в сложнолокализованных низкопроницаемых зонах.

Южная часть месторождения характеризуется более однородными по проницаемости коллекторами, но здесь наблюдается другая проблема: вдоль рядов нагнетательных скважин выявлено повсеместное смыкание трещин ГРП в единый канал фильтрации. Появившиеся вдоль рядов нагнетательных скважин «галереи» заводнения способствовали образованию слабодренлируемых зон между скважинами добывающих рядов (рис. 1).

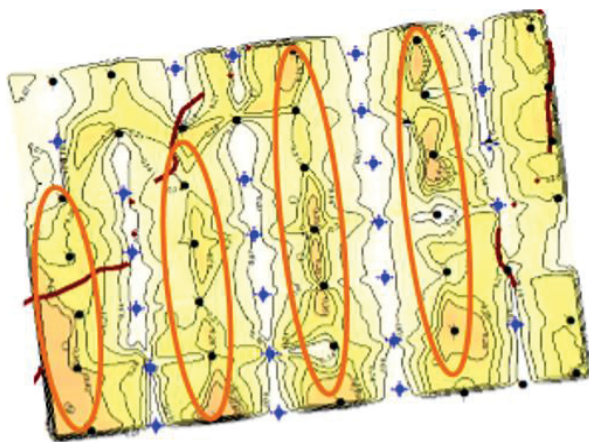


Рис. 1. Карта остаточных запасов нефти на 01.01.2035 г. при работе базового фонда скважин (источник: ПО «РН-КИН»)

Fig. 1. Map of residual oil reserves as of 01.01.2035 during the operation of the basic well stock (source: RN-KIN)

Так как при вводе в эксплуатацию на всех скважинах в качестве способа заканчивания применялась технология гидроразрыва пласта и не было учтено направление регионального стресса в продуктивном пласте, при формировании рядов нагнетательных скважин возникла система трещин, направленных вдоль регионального стресса, так как в зонах бурения новых скважин при выполнении ГРП трещины распространяются в направлении максимальных горизонтальных напряжений в случае отсутствия значительного изменения полей давления и температуры [5]. Данное предположение было подтверждено трассерными исследованиями, согласно которым фильтрация происходит вдоль рядов нагнетательных скважин – вынос меченого агента, закачиваемого в нагнетательные скважины, в соседних добывающих скважинах замечен в гораздо меньшей степени. При разработке низкопроницаемых коллекторов для поддержания пластового давления и компенсации отборов жидкости необходимо осуществлять закачку жидкости под высокими давлениями, поэтому развитие и рост системы трещин ГРП сдерживать достаточно сложно. Результатом такого развития становится формирование слабодренлируемых зон в пределах продуктивного пласта из-за его неблагоприятного охвата воздействием заводнения [6, 7].

### Уравнения фильтрации, используемые при описании полимерного воздействия на пласт

С целью изоляции промытых высокопроницаемых каналов фильтрации и вовлечения в разработку сложнолокализованных низкопроницаемых зон продуктивного пласта Ю<sub>1</sub><sup>2+3</sup> было принято решение произвести оценку эффективности внедрения технологий МУН на основе добавления в состав закачиваемой жидкости различных полимерных добавок.

Полимерные добавки в раствор закачиваемой в продуктивный пласт жидкости добавляют в качестве средства выравнивания неоднородной структуры пористой среды за счет снижения отношения подвижности закачиваемой жидкости и пластовой нефти [8]. Повышение охвата пласта воздействием заводнения при применении полимерных составов происходит за счет способности полимеров при растворении в воде значительно повышать ее вязкость и снижать подвижность, что позволяет предотвратить опережающее продвижение фронта нагнетания [9, 10].

В качестве полимера с высокой молекулярной массой, водный раствор которого закачивается в виде оторочки в пласт с целью осуществления полимерного воздействия, широкое применение получил гидролизированный полиакриламид (ПАА). Подвижность воды в несколько раз больше подвижности полиакриламида, поэтому при закачке водного раствора ПАА в продуктивный пласт происходит увеличение охвата пласта воздействием заводнения и, соответственно, растет конечная нефтеотдача.

Под подвижностью понимается отношение эффективной проницаемости к вязкости [11]. Формула расчета подвижности следующая:

$$\lambda = \frac{k}{\mu},$$

где  $\mu$  – вязкость;  $k$  – предельное значение относительной проницаемости.

Также при рассмотрении вопроса эффективности полимерного заводнения стоит затронуть такой параметр, как коэффициент подвижности [12], рассчитывающийся по следующей формуле:

$$M = \frac{\lambda_w}{\lambda_o} = \frac{k_w/\mu_w}{k_o/\mu_o} = \frac{k_w * \mu_o}{k_o * \mu_w},$$

где  $\lambda_o$  – подвижность нефти, мкм<sup>2</sup>/мПа\*с;  $\lambda_w$  – подвижность воды, мкм<sup>2</sup>/мПа\*с;  $k_o$  – относительная проницаемость по нефти, мкм<sup>2</sup>;  $k_w$  – относительная проницаемость по воде, мкм<sup>2</sup>;  $\mu_o$  – вязкость нефтяной фазы, мПа\*с;  $\mu_w$  – вязкость водяной фазы, мПа\*с.

Значения коэффициента, стремящиеся к единице, считаются благоприятными. Значения  $M > 1$  считаются неблагоприятными.

Попытки моделирования процесса полимерного заводнения известны с 60-х гг. прошлого века [13]. С тех пор исследователи достигли значительного прогресса в моделировании воздействия полимеров на пласт и научились учитывать эффекты адсорбции, химической деструкции полимеров, проявление полимерами неньютоновских свойств, влияние рабочей температуры и даже образование языков обводнения [14, 15]. В работе [16] предлагается модель полимерного заводнения, записанная в двумерной постановке для фильтрации в пласте небольшой ширины с незначительной изменчивостью свойств вдоль вертикальной оси. Тогда уравнения модели полимерного заводнения выглядят следующим образом [16]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \varphi \frac{S_w}{B_w} \right] + \nabla \left( \frac{\vec{v}_w}{B_w} \right) + q_w \delta_{well} = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \varphi \frac{S_o}{B_o} \right] + \nabla \left( \frac{\vec{v}_o}{B_o} \right) + q_o \delta_{well} = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \varphi \left( \frac{R_s S_o}{B_o} + \frac{S_g}{B_g} \right) \right] + \nabla \left( \frac{R_s \vec{v}_o}{B_o} + \frac{\vec{v}_g}{B_g} \right) + q_g \delta_{well} = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \varphi \left( \frac{S_w C_p}{B_w} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial t} [(1 - \varphi) \rho_r C_a] + \nabla \left( \frac{\vec{v}_w C_p}{B_w} \right) + q_w C_p \delta_{well} = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \varphi \left( \frac{S_w C_s}{B_w} \right) \right] + \nabla \left( \frac{\vec{v}_w C_s}{B_w} \right) + q_w C_s \delta_{well} = 0,$$

$$S_w + S_o + S_g = 1,$$

где  $t$  – время, с;  $\varphi$  – пористость породы, д. ед.;  $S_o$ ,  $S_w$ ,  $S_g$  – нефте-, водо- и газонасыщенность, д. ед.;  $B_o$ ,  $B_w$ ,  $B_g$  – объемные коэффициенты нефти, воды и свободного газа, д. ед.;  $\vec{v}_o$ ,  $\vec{v}_w$ ,  $\vec{v}_g$  – скорости фильтрации нефти, воды и свободного газа, м/с;  $q_o$ ,  $q_w$ ,  $q_g$  – объем флюида в единицу времени для нефти, воды и свободного газа, м<sup>3</sup>/сут;  $R_s$  – коэффициент растворимости газа в нефти, м<sup>3</sup>/т;  $p_b$  – давление насыщения нефти, Па;  $C_p$  – масса растворенного в единице объема воды полимера, кг;  $C_s$  – масса растворенной в единице объема

воды соли, кг;  $C_a$  – масса полимера, адсорбированного на поверхности единицы массы породы, кг;  $\rho_r$  – плотность породы, кг/м<sup>3</sup>;  $\delta_{well}$  – дельта-функция Дирака, локализованная в точке расположения скважины, 1/м<sup>3</sup>.

В пористой среде скорости движения флюидов задаются линейным законом Дарси [16]:

$$\vec{v}_w = - \frac{k k_{rw}}{\mu_{w_{eff}} R} \nabla p,$$

$$\vec{v}_o = - \frac{k k_{ro}}{\mu_o} \nabla p,$$

$$\vec{v}_g = - \frac{k k_{rg}}{\mu_g} \nabla p.$$

Для добывающих скважин будут справедливы уравнения [16]:

$$q_w = \frac{2\pi k h}{\ln \left( \frac{r_{eq}}{r_w} \right)} \frac{k_{rw}}{\mu_{w_{eff}} B_w R} (p - p_{bh}),$$

$$q_o = \frac{2\pi k h}{\ln \left( \frac{r_{eq}}{r_w} \right)} \frac{k_{ro}}{\mu_o B_o} (p - p_{bh}),$$

$$q_g = \frac{2\pi k h}{\ln \left( \frac{r_{eq}}{r_w} \right)} \left( \frac{k_{rg}}{\mu_g B_g} + \frac{R_s k_{ro}}{\mu_o B_o} \right) (p - p_{bh}).$$

Для нагнетательных скважин применяется следующее уравнение [16]:

$$q_w = \frac{2\pi k h}{\ln \left( \frac{r_{eq}}{r_w} \right)} \left( \frac{k_{rw}}{\mu_{w_{eff}} B_w R} + \frac{k_{ro}}{\mu_o B_o} + \frac{k_{rg}}{\mu_g B_g} + \frac{R_s k_{ro}}{\mu_o B_o} \right) (p - p_{bh}),$$

где  $R$  – коэффициент сопротивления, отражающий эффект снижения фазовой проницаемости воды в результате адсорбции молекул полимера на поверхности породы, определяющийся следующей зависимостью:

$$R = 1 + (R_{res} - 1) \frac{C_a}{C_{a \max}},$$

где  $R_{res}$  – коэффициент остаточного сопротивления, д. ед.;  $C_{a \max}$  – максимальное значение изотермы адсорбции.

#### Лабораторные исследования на фильтрационной модели продуктивного пласта Ю<sub>1</sub><sup>2+3</sup>

Для изучения воздействия на пласт Ю<sub>1</sub><sup>2+3</sup> технологич МУН на основе полимеров были проведены исследования на фильтрационной установке с целью изучения влияния полимерных составов на коллекторские свойства продуктивного пласта [17]. Фильтрационные исследования проводились на специальных установках, которые позволяют воссоздать пластовые условия фильтрации жидкости через керновую колонку в лабораторных условиях. Исследования проводились в соответствии с отраслевыми стандартами [18, 19]. Технологическая схема установки подразумевала наличие нескольких контейнеров, которые позволяют испытывать различные жидкости. Установка способна создавать горное давление до 70 МПа, поровое давление до 50 МПа, поддерживать

температуру до 150 °С, скорость прокачки можно задавать в интервале от 0,01 до 25 см<sup>3</sup>/мин, точность определения проницаемости составляет 0,5–1,0 % от измеряемой величины. Для фильтрационных исследований была использована колонка из трех образцов породы ненарушенной структуры с диаметром 30 мм, в обязательном порядке до начала экспериментов были определены геометрические размеры образцов керна, их поровый объем, коэффициенты открытой пористости и проницаемости по газу.

Суть исследования заключалась в сравнении градиентов давления и коэффициента вытеснения нефти водой до и после обработки полимерными составами, и последующей оценке фактора остаточного и максимального сопротивления (отношение градиента давления после закачки полимера к градиенту давления до закачки) [20].

На рис. 2 представлены сводные результаты фильтрационных исследований на низкопроницаемой колонке.

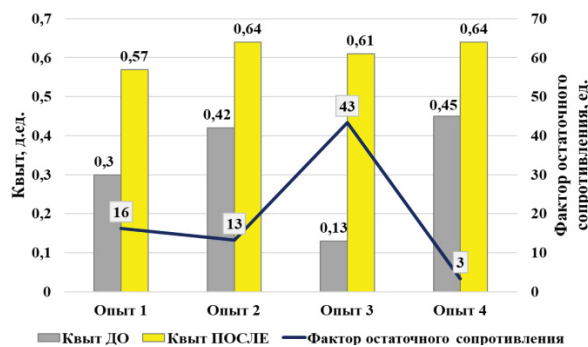


Рис. 2. Сводные результаты фильтрационных исследований на низкопроницаемой колонке

Fig. 2. Summary results of filtration studies on a low-permeability column

**Опыт № 1.** Были подготовлены две колонки: высокопроницаемая (общая проницаемость 321,3 мД) и низкопроницаемая (общая проницаемость 32,7 мД), соотношение проницаемостей Кпр1/Кпр2 составило 9,8. Обе колонки состояли из трех единичных образцов. Закачка полимерного состава осуществлялась в два этапа: первая оторочка состояла из водного раствора ПАА «Праестол-2540» 0,05 % масс, вторая оторочка – из водного раствора сшивателя «АМГ-1» 0,005 % масс и бентонитового глинопорошка 6 % масс. В результате эксперимента Квыт высокопроницаемой колонки после обработки полимерным составом практически не изменился, в то время как Квыт низкопроницаемой колонки после обработки увеличился с 0,30 до 0,57 д. ед. Фактор остаточного сопротивления составил 16,3 ед.

**Опыт № 2.** Условия аналогичны предыдущему опыту, соотношение проницаемостей двух колонок Кпр1/Кпр2 составило 10,1. В данном опыте закачка полимерного состава осуществлялась также в два этапа: первая оторочка – водный раствор ПАА «Праестол-2530» 0,05 % масс, вторая оторочка – водный раствор сшивателя «АМГ-1» 0,005 % масс и бентонитового глинопорошка 6 % масс. Квыт высоко-

проницаемой колонки, как и в первом случае, практически не изменился, Квыт низкопроницаемой колонки увеличился с 0,42 до 0,64 д. ед. Фактор остаточного сопротивления составил 13,3 ед.

**Опыт № 3.** Условия аналогичны предыдущим опытам, соотношение проницаемостей двух колонок Кпр1/Кпр2 составило 10,0. Состав закачиваемой смеси в третьем опыте представлял собой водный раствор ПАА «HI-VIS-360» концентрацией 1200 мг/л с добавлением сшивателя «Water-Cut 684» в соотношении 1:20. В результате Квыт высокопроницаемой колонки не изменился, Квыт низкопроницаемой колонки увеличился с 0,13 до 0,61 д. ед. Фактор остаточного сопротивления составил 43,4 ед.

**Опыт № 4.** Идентичен Опыту № 3 за одним изменением: в качестве сшивающего агента использовался сшиватель «Tiorgo 677 N» на основе солей алюминия в соотношении 1:20. Замена сшивающего агента способствовала изменению градиента давления в ходе выполнения эксперимента, в результате чего Квыт высокопроницаемой колонки после прокачки образца керна полимерным составом не изменился, Квыт низкопроницаемой колонки увеличился с 0,45 до 0,64 д. ед. Фактор остаточного сопротивления составил 3,3 ед.

#### Результаты внедрения технологии полимерного воздействия на продуктивный пласт Ю<sub>1</sub><sup>2+3</sup>

На момент выполнения фильтрационного моделирования полимерного воздействия на пласт Ю<sub>1</sub><sup>2+3</sup> на Северной и Центральной частях месторождения уже было выполнено 47 операций по закачке полимерных составов в пласт Ю<sub>1</sub><sup>2+3</sup> на нагнетательных скважинах. С целью опробования технологий МУН на данном этапе работ были использованы технологии сшитых полимерных составов (СПС), модифицированных сшитых полимерных составов с закачкой предоторочки вязкоупругого состава малых объемов для изоляции каналов максимальной проницаемости, полимер-глинисто-кварцевые системы (ПГКС) и термогелеобразующие системы типа РВ-ЗП-1. Также были опробованы составы МСПС с добавкой дисперсной среды (бентонитовый порошок). Обработки выполнялись на четырех участках воздействия с повторной обработкой. Суммарная дополнительная добыча нефти за счет проведения 47 операций на Северной и Центральной частях месторождения составила 74,9 тыс. т, средний удельный технологический эффект – 1,6 тыс. т/скв.-опер.

После проведения фильтрационных исследований полимерное воздействие на пласт Ю<sub>1</sub><sup>2+3</sup> выполнялось с учетом результатов экспериментов, согласно которым в приведенных геологических условиях наибольшей эффективностью обладают технологии полимерного воздействия на основе ПАА «HI-VIS 360» с хромовым сшивателем, ПАА «Праестол 2540» и ПАА «Праестол 2530» с глинопорошком и кварцевым песком. С тех пор на Южной части месторождения в период с 2015 по 2022 гг. было выполнено 54 операции по закачке полимерных составов в пласт Ю<sub>1</sub><sup>2+3</sup> на нагнетательных скважинах, удельная эффективность обработок составила 0,3 тыс. т на одну скв.-опер. (таблица).

Оценка дополнительной добычи нефти по результатам промышленных испытаний по закачке полимерных составов на участках пласта Ю<sub>1</sub><sup>2+3</sup> осуществлялась в модуле «МУН» программного комплекса «РН-КИН».

На рис. 3 представлена схема проведения закачки полимерных составов в пласт Ю<sub>1</sub><sup>2+3</sup>. В качестве агентов воздействия использовались технологии шитых полимерных составов и модифицированных шитых полимерных составов с закачкой предоторочки вязкоупругого состава малых объемов для изоляции каналов максимальной проницаемости. Состав оторочки представлял собой в основном смесь ПАА «АН-913» или «Прастел 2540Н» и сшивателя ацетата хрома в различных концентрациях.

Наблюдаемая на месторождении «Х» тенденция снижения эффективности полимерного воздействия на продуктивный пласт соответствует опыту применения на большинстве месторождений Западной Сибири. Снижение удельных показателей физико-химического воздействия при повторных обработках объясняется вовлечением в разработку малоподвижных и трудноизвлекаемых запасов.

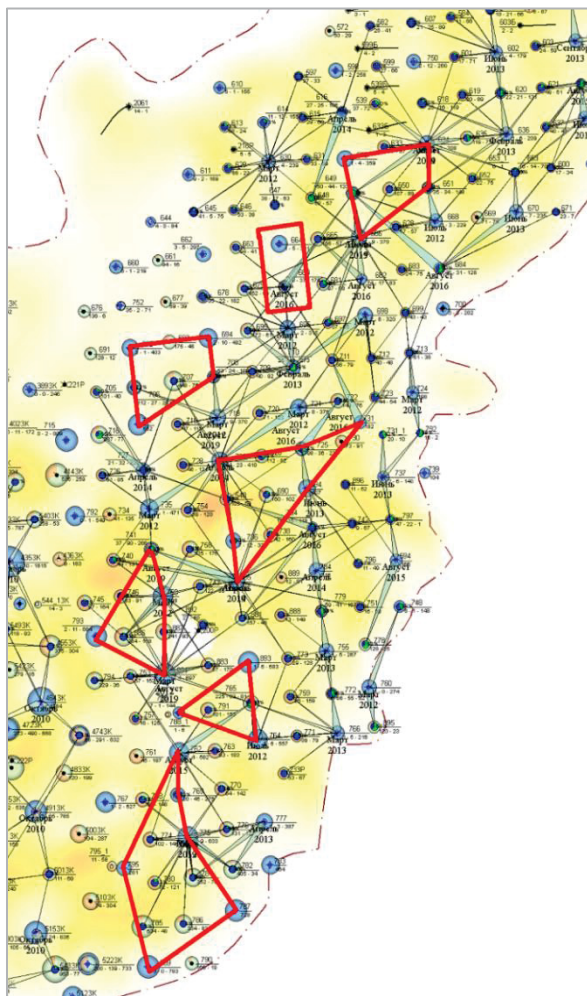


Рис. 3. Схема проведения закачки полимерных составов в пласт Ю<sub>1</sub><sup>2+3</sup> (источник: ПО «РН-КИН»)

Fig. 3. Scheme for injection of polymer compositions into the Yu<sub>1</sub><sup>2+3</sup> formation (source: RN-KIN)

На поздних стадиях, когда ресурсы подвижных запасов исчерпаны, требуются меры по увеличению эффективности применяемых технологий: увеличение объема закачки (оторочки); повышение фактора остаточного сопротивления (за счет изменения концентрации или типа применяемых реагентов); применение комплексных технологий, сочетающих закачку «мягких» и «жестких» составов для адресного формирования изолирующих оторочек в промытых зонах пласта.

Таблица. Сводные результаты выполненных обработок  
 Table. Summary results of the performed treatments

№ участка Region no.	Количество обработанных нагнетательных скважин, ед. Number of treated injection wells, units	Дополнительная добыча нефти, тыс. т Additional oil production, thousand tons	Удельная эффективность обработок, тыс. т/скв.-опер. Specific efficiency of treatments, thousand tons/operations
1	3	1,7	0,6
2	5	0,5	0,1
3	2	0,1	0,1
4	5	1,2	0,2
5	6	1,5	0,3
6	3	4,9	1,6
7	4	0,4	0,1
8	4	0,2	0,1
9	6	0,6	0,1
10	4	1,7	0,4
11	4	-0,1	-
12	6	1,0	0,2
13	1	0,1	0,1
14	1	0,1	0,1
Сумма Total	54	13,9	0,3

### Заключение

Представлены результаты внедрения в состав закачиваемой в пласт жидкости полимерных реагентов и проведенных экспериментальных исследований влияния закачки полимерных составов на изменение коллекторских свойств продуктивного пласта Ю<sub>1</sub><sup>2+3</sup> нефтяного месторождения «Х».

1. Разработка эксплуатационного объекта Ю<sub>1</sub><sup>2+3</sup> характеризуется падающими уровнями добычи нефти и преждевременным обводнением действующего фонда скважин, который не способен выработать утвержденные запасы углеводородов. Северная часть месторождения характеризуется наличием в разрезе пласта Ю<sub>1</sub><sup>3</sup> высокопроницаемой пачки Ю<sub>1</sub><sup>3А</sup>, которая на данный момент практически полностью выработана и промыта, в совокупности с низкопроницаемой пачкой Ю<sub>1</sub><sup>3В</sup>, которая почти не вовлечена в разработку. Южная часть месторождения характеризуется смыканием трещин ГРП в единый канал фильтрации вдоль рядов нагнетательных скважин, в результате чего создавшиеся «галереи» заводнения способствовали образованию слабодренлируемых зон между скважинами добывающих рядов.
2. В связи с неравномерным характером выработки запасов по площади и разрезу продуктивного пла-

ста Ю<sub>1</sub><sup>2+3</sup> было принято решение рассмотреть возможность внедрения технологии полимерного воздействия на пласт с целью выравнивания фронта нагнетаемой в пласт воды, изоляции высокопроницаемых каналов фильтрации и вовлечения в разработку запасов нефти сложнлокализованных низкопроницаемых зон.

3. Выполнено фильтрационное моделирование воздействия полимерных составов на образцы керн продуктивного пласта Ю<sub>1</sub><sup>2+3</sup>, согласно которым в приведенных геологических условиях наибольшей эффективностью обладают технологии полимерного воздействия на основе ПАА «НИ-VIS 360» с хромовым сшивателем, ПАА «Праестол 2540» и ПАА «Праестол 2530» с глинопорошком и кварцевым песком.
4. Представлены и проанализированы результаты промышленных испытаний технологии полимерного воздействия на пласт. На этапе опробования технологий полимерного воздействия были использованы технологии сшитых полимерных составов, модифицированных сшитых полимерных составов с закачкой предоторочки вязкоупругого

состава малых объемов для изоляции каналов максимальной проницаемости, полимер-глинисто-кварцевые системы и термогелеобразующие системы типа РВ-ЗП-1. Также были опробованы составы МСПС с добавкой дисперсной среды (бентонитовый порошок). После проведения лабораторных исследований на образцах керн в качестве агентов воздействия стали применяться технологии СПС и МСПС, состав оторочки которых представлял собой в основном смесь ПАА «AN-913» или «Праестол 2540Н» и сшивателя ацетата хрома в различных концентрациях.

5. Наблюдаемая на месторождении «Х» тенденция постепенного снижения эффективности полимерного воздействия на продуктивный пласт соответствует опыту применения на большинстве месторождений Западной Сибири. Снижение удельных показателей физико-химического воздействия при повторных обработках объясняется вовлечением в разработку малоподвижных и трудноизвлекаемых запасов. Требуется меры по увеличению эффективности применяемых технологий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емельянов Э.В., Земцов Ю.В., Дубровин А.В. Опыт применения потокоотклоняющих технологий в условиях резкой неоднородности продуктивных горизонтов Усть-Тегусского месторождения // Нефтепромысловое дело. – 2019. – № 11. – С. 76–82.
2. Ишков А.А., Мазитов Р.Ф., Хорюшин В.Ю. Применение потокоотклоняющих технологий в условиях низкопроницаемых коллекторов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2020. – № 1. – С. 59–66.
3. Сургучев М.Л. Вторичные и третичные методы увеличения нефтеотдачи пластов. – М.: Недра, 1985. – 308 с.
4. Лэйк Л. Основы методов увеличения нефтеотдачи. – Остин: Университет Техас-Остин, 2005. – 449 с.
5. Латыпов И.Д., Борисов Г.А., Хайдар А.М. Переориентация азимута трещины повторного гидроразрыва пласта на месторождениях ООО «РН-Юганскнефтегаз» // Нефтяное хозяйство. – 2011. – № 6. – С. 34–38.
6. Longuemare P., Detienne J-L., Lemonnier P. Numerical modeling of fracture propagation induced by water injection/re-injection // SPE European Formation Damage Conference. – The Hague, Netherlands, 2001. – SPE 68974.
7. Hustedt B., Zwarts D., Bjoerndal H.P. Induced fracturing in reservoir simulations: application of a new coupled simulator to waterflooding field examples // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Texas, USA, 2006. – SPE 102467.
8. Thomas A. Essentials of polymer flooding technique. – New York: John Wiley & Sons Ltd, 2019. – 328 p.
9. Alvarado V., Manrique E. Enhanced oil recovery: an update review // Energies. – 2010. – V. 3. – P. 1529–1575.
10. Zaitoun A., Makakou P., Blin N. Shear stability of EOR polymers // SPE International Symposium on Oilfield Chemistry. – The Woodlands, Texas, 2012. – SPE 141113.
11. Юшков И.Р., Хижняк Г.П., Илюшин П.Ю. Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений. – Пермь: Изд-во Перм. Нац. Исслед. Политехн. Ун-та, 2013. – 177 с.
12. Крейг Ф.Ф. Разработка нефтяных месторождений при заводнении. – М.: Недра, 1974. – 191 с.
13. Chang H.L. Polymer flooding technology - yesterday, today, and tomorrow // Journal of Petroleum Technology. – 1978. – V. 30. – № 8. – P. 1113–1128.
14. Bondor P. Mathematical simulation of polymer flooding in complex reservoirs // Society of Petroleum Engineers Journal. – 1972. – V. 12. – № 5. – P. 369–382.
15. Luo H. Modeling and upscaling unstable water and polymer floods: dynamic characterization of the effective finger zone // SPE Improved Oil Recovery Conference. – Tulsa, Oklahoma, 2016. – P. 779–794.
16. Киреев Т.Ф. Математическое моделирование фильтрационных течений в подземных пластах с использованием неструктурированной сетки Вороного: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Уфа, 2020. – 115 с.
17. Фильтрационные исследования потокоотклоняющих технологий на моделях терригенных пластов нефтяных месторождений Томской области / О.В. Гаврилук, О.В. Глазков, И.А. Кузнецов, А.А. Терентьев // Нефтяное хозяйство. – 2012. – № 11. – С. 44–47.
18. ОСТ 39-235-89. Нефть. Метод определения фазовых проницаемостей в лабораторных условиях при совместной стационарной фильтрации. – М.: Типография Миннефтепрома, 1989. – 37 с.
19. РД-39-4470061-007-07. Технологический регламент по повышению нефтеотдачи пластов полимерно-коллоидным раствором. – Нижневартовск: АО «Самотлорнефтегаз», 2007. – 29 с.
20. Сентемов А.А. Экспериментальное изучение вытеснения остаточной нефти растворами ПАВ и комплексными растворами // Аллея науки – 2018. – Т. 5. – № 4. – С. 509–513.

Поступила 19.09.2022 г.

Прошла рецензирование 11.10.2022 г.

#### Информация об авторах

**Серебрянников А.А.**, аспирант отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Зятиков П.Н.**, доктор технических наук, профессор отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 622.276.64

## STUDYING THE EFFECT OF POLYMER COMPOSITIONS ON THE FILTRATION FLOWS OF THE $Y_{u_1}^{2+3}$ FORMATION OF THE OIL FIELD «X»

Alexander A. Serebryannikov<sup>1</sup>,  
serebriannikov.alexandr@yandex.ru

Pavel N. Zyatikov<sup>1</sup>,  
zpavel@tpu.ru

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance** of the research consists in search for methods for increasing oil recovery aimed at growing the coverage of oil reservoirs developed by flooding, which will allow continuing the operation of fields with high depletion of reserves at the last stages of development. Involvement in the development of complexly localized non-drainable reserves due to the injection of polymer compositions will extend the life cycle of depleted fields and increase the final oil recovery factor.

**Purpose:** to study the impact of injection of polymer compositions on the change in the filtration flows of an oil reservoir in order to increase the final oil recovery factor.

**Objects:** sand layers of the  $Y_{u_1}$  horizon of the Vasyugan suite, distinguished by their heterogeneity, inconsistency in thickness, and different permeability along the section.

**Methods:** analysis of the recovery of oil reserves in terms of displacement characteristics, as well as analytical dependencies; analysis of the current state of development; assessment of the effectiveness of the formed waterflooding system; analytical calculations using the filtration equation; laboratory studies on a filtration model; analytical evaluation of the results of testing the selected compositions at the oil field «X».

**Results.** The article summarizes the results of experimental studies of the effect of adding polymeric reagents to the composition of the fluid injected into the formation on changing the reservoir properties of the productive formation. The paper introduces the results of laboratory studies to determine the technologies and compositions for the implementation of the program for the injection of polymers into the  $Y_{u_1}^{2+3}$  formation of the oil field «X». The filtration model of a real reservoir was created from core samples of the field under consideration especially for the research in laboratory conditions; the conditions for fluid filtration through the core column are as close as possible to reservoir ones. The paper introduces the results of pilot work on application of the technology of injection of polymer compositions into the  $Y_{u_1}^{2+3}$  reservoir of the oil field «X». The authors carried out the analysis of the effectiveness of the work, made the recommendations for further use of the technology of injection of polymer compositions into the reservoir.

### Key words:

Polymer flooding, enhanced oil recovery methods, filtration flows, polymers, reservoir drainage.

### REFERENCES

- Emelyanov E.V., Zemtsov Yu.V., Dubrovin A.V. Experience of flow-diverting technologies application under conditions of sharp heterogeneity of productive horizons of Ust-tegussky field. *Oil-field Engineering*, 2019, no. 11, pp. 76–82. In Rus.
- Ishkov A.A., Mazitov R.F., Khoryushin V.Yu. Application of flow diverting technologies under conditions of low-permeable collectors. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2020, no. 1, pp. 59–66. In Rus.
- Surguchev M.L. *Vtorichnye i tretichnye metody uvelicheniya nefteotdachi plastov* [Secondary and tertiary methods for enhanced oil recovery]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 308 p.
- Lake. L. *Osnovy metodov uvelicheniya nefteotdachi* [Fundamentals of enhanced oil recovery methods]. Austin, University of Texas-Austin, 2005. 449 p.
- Latypov I.D., Borisov G.A., Khaidar A.M. Reorientation refracturing on RN-Yuganskneftegaz LLC oilfields. *Oil Industry*, 2011, no. 6, pp. 34–38. In Rus.
- Longuemare P., Detienne J.-L., Lemonnier P. Numerical modeling of fracture propagation induced by water injection/re-injection. *SPE European Formation Damage Conference*. The Hague, Netherlands, 2001. SPE 68974.
- Hustedt B., Zwarts D., Bjoerndal H.P. Induced fracturing in reservoir simulations: application of a new coupled simulator to waterflooding field examples. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Texas, USA, 2006. SPE 102467.
- Thomas A. *Essentials of polymer flooding technique*. New York, John Wiley & Sons Ltd., 2019. 328 p.
- Alvarado V., Manrique E. Enhanced oil recovery: an update review. *Energies*, 2010, vol. 3, pp. 1529–1575.
- Zaitoun A., Makakou P., Blin N. Shear stability of EOR polymers. *SPE International Symposium on Oilfield Chemistry*. The Woodlands, Texas, 2012. SPE 141113.
- Yushkov I.R., Khizhnyak G.P., Ilyushin P.U. *Razrabotka i ekspluatatsiya neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy* [Development and operation of oil and gas fields]. Perm, Perm National Research Polytechnic University Publ. House, 2013. 177 p.
- Craig F.F. *Razrabotka neftyanykh mestorozhdeniy pri zavodnenii* [Development of oil fields during flooding]. Moscow, Nedra Publ., 1974. 191 p.
- Chang H.L. Polymer flooding technology – yesterday, today, and tomorrow. *Journal of Petroleum Technology*, 1978, vol. 30, no. 8, pp. 1113–1128.
- Bondor P. Mathematical simulation of polymer flooding in complex reservoirs. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1972, vol. 12, no. 5, pp. 369–382.
- Luo H. Modeling and upscaling unstable water and polymer floods: dynamic characterization of the effective finger zone. *SPE Improved Oil Recovery Conference*. Tulsa, Oklahoma, 2016. pp. 779–794.
- Kireev T.F. *Matematicheskoe modelirovanie filtratsionnykh techeniy v podzemnykh plastakh s ispolzovaniem nestruktirovannoy setki Voronogo*. Diss. Kand. nauk [Mathematical modeling of filtration flows in underground formations using an unstructured Voronoi grid. Cand. Diss.]. Ufa, 2020. 115 p.
- Gavriluyuk O.V., Glazkov O.V., Kuznetsov I.A., Terentiev A.A. Water shut-off laboratory comparative tests for terrigenous reservoir of Tomsk region. *Oil Industry*, 2012, no. 11, pp. 44–47. In Rus.
- OST 39-235-89. *Neft. Metod opredeleniya fazovykh pronitsaemostey v laboratornykh usloviyakh pri sovmestnoy statsionarnoy*

- filtratsii* [State Standard 39-235-89. Oil. Method for determining phase permeabilities in laboratory conditions with joint stationary filtration]. Moscow, Minnefteprom Printing house, 1989. 37 p.
19. RD-39-4470061-007-07. *Tekhnologicheskiiy reglament po povysheniyu nefteotdachi plastov polimerno-kolloidnym rastvorom* [Working Documentation 39-4470061-007-07. Technological regulations on increasing oil recovery by polymer-colloidal solution]. Nizhnevartovsk, AO «Samotlorneftegaz» Publ., 2007. 29 p.
20. Sentemov A.A. Eksperimentalnoe izuchenie vytesneniya ostatnoy nefi rastvorami PAV i kompleksnymi rastvorami [Experimental study of displacement of residual oil by surfactant solutions and complex solutions]. *Alleya nauki*, 2018, no. 4, pp. 509–513.

*Received: 19 September 2022.*

*Reviewed: 11 October 2022.*

#### **Information about the authors**

**Alexander A. Serebryannikov**, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Pavel N. Zyatikov**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 552.574:550.4:51.762.2

## ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО И ГЕОХИМИЯ УГЛЕЙ СРЕДНЕЮРСКОГО ВОЗРАСТА МЕЖЕГЕЙСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (УЛУГ-ХЕМСКИЙ БАССЕЙН, ТЫВА)

Ондар Солангы Александровна<sup>1</sup>,  
ondarsa@tikopr.sbras.ru

Бушнев Дмитрий Алексеевич<sup>2</sup>,  
boushnev@geo.komisc.ru

<sup>1</sup> Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН,  
Россия, 667004, г. Кызыл, ул. Интернациональная, 117А.

<sup>2</sup> Институт геологии Коми НЦ УрО РАН,  
Россия, 167982, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, 54.

**Актуальность.** Каменные угли Межегейского месторождения используются преимущественно в качестве спекающей основы для производства кокса. Однако неоднородность и многокомпонентность их вещественного состава позволяет рассматривать угли как сырье для глубокой химической переработки и как носитель ценных металлов в различных концентрациях, а угольный пласт – как угольно-газовую залежь. Подобный комплексный подход в освоении горючего ископаемого нуждается в исследованиях с различных позиций особенностей органического и неорганического вещества углей, которые зависят от исходных условий накопления и источников вещества.

**Цель:** изучить состав органического вещества углей пласта Улуг среднеюрского возраста Межегейского месторождения Улуг-Хемского угольного бассейна впервые в комплексе углепетрографических и органогеохимических методов исследования.

**Методы:** углепетрографическое изучение мацерального состава под микроскопом в шлифах в проходящем свете; определение аналитической влажности и зольности стандартизованными методами. В составе геохимических исследований выполнено выделение хлорформенного битумоида из углей, фракционирование полученного экстракта, газовой хроматографический и хромато-масс-спектрометрический анализ алифатической и ароматической фракций битумоида. На основе полученных данных вычислены индексы, характеризующие обстановки накопления органического вещества, его возможные источники и степень термической преобразованности.

**Результаты** проведенных углепетрографических и геохимических исследований углей среднеюрского возраста Межегейского месторождения Улуг-Хемского бассейна показывают, что по микрокомпонентному составу угли практически мономацеральные с преобладанием бесструктурного витринита. Формирование углей происходило на периферии крупного, возможно, периодически связывавшегося с морем озера в условиях, близких к маршевым. Изучен состав и распределение алканов, стеранов и гопанов в алифатической фракции битумоида. Характер распределения *n*-алканов и изопреноидов свидетельствует об образовании углей преимущественно из остатков водной растительности при некотором участии гумусового вещества. Существенный вклад высшей наземной растительности подтверждается также и распределением стеранов *C*<sub>27</sub>, *C*<sub>28</sub>, *C*<sub>29</sub>. Значения коэффициента нечетности алканов, известные соотношения изомеров стеранов, гопанов и ароматических углеводородов свидетельствуют о высокой зрелости угольного вещества.

### Ключевые слова:

каменные угли, органическое вещество, витринит, Межегейское месторождение, Улуг-Хемский угольный бассейн, Республика Тыва.

### Введение

Межегейское месторождение каменных углей расположено в юго-западной части Улуг-Хемского бассейна (УХБ) и находится на территории Тандинского района Республики Тыва в 40 км к югу от г. Кызыла. Изученность месторождения тесно связана с этапами освоения Улуг-Хемского угольного бассейна [1]. В разные годы прошлого столетия в рамках поисково-оценочных и геологоразведочных работ были изучены основные черты геологического строения, угленосность разреза, состав и качество углей, подсчитаны их запасы, которые составили 2,3 млрд т углей марок Ж и ОК. В геологическом строении угленосного разреза принимают участие юрские отложения – элегестская (*J<sub>1el</sub>*), эрбекская (*J<sub>2er</sub>*) и салдамская (*J<sub>2-3sl</sub>*) свиты. Основным объектом разработки месторождения является пласт Улуг эрбекской свиты среднеюрского возраста. В нем содержится 65 % запасов углей Межегейского месторождения. Показатель отража-

тельной способности витринита *R<sub>o</sub>* меняется от 0,75 в восточной части Межегейской площади до 0,85–0,99 % на остальной ее территории [2].

Основным направлением использования межегейских углей является их применение в качестве спекающей основы шихты для производства металлургического кокса. При коксовании, пиролизе и других методах углубленной переработки углей получают ряд жидких и газообразных продуктов, которые служат ценным сырьем химической промышленности. Состав вторичных продуктов естественным образом зависит от состава исходного органического вещества углей, поэтому геохимические исследования последнего имеют важное значение для прогноза продуктов переработки углей [3]. Содержащийся в угольной залежи метан угольных пластов в последние годы становится важным компонентом в удовлетворении энергетических потребностей разных стран [4, 5]. Результаты изучения особенностей органического ве-



щества геохимическими и петрографическими методами могут быть использованы для оценки объемов сгенерированного органическим веществом газа. Исследование мацерального состава, подсчитанные на его основе фациальные индикаторы и анализ углеводов-биомаркеров являются в последние десятилетия важными инструментами для реконструкции условий образования органического вещества углей.

#### Методы исследования

Исследованы шесть образцов угля пласта Улуг среднеюрского возраста Межегейского месторождения Улуг-Хемского бассейна. Пробы угля отобраны в шахте ООО «УК «Межегейуголь». Опробование пласта мощностью 3,0 м проведено поинтервально через каждые 0,5 м, образцы пронумерованы, начиная от кровли пласта.

Определение аналитической влажности и зольности образцов проведено с использованием стандартных методик [6, 7]. Углететрографические исследования включали изучение мацерального состава под микроскопом ПОЛАМ 312-Р в тонких шлифах в проходящем свете. Количественное соотношение мацералов определялось для каждого образца методом подсчета не менее 500 точек [8]. При определении мацералов использовалась классификация [8], разработанная в соответствии с рекомендациями Международного комитета по петрологии углей (ИССР).

Хлороформенный битумоид А (ХБА) экстрагировался из растёртой породы в аппарате Сокслета в течение 40 часов. Удаление элементной серы из экстракта достигалось добавлением в приёмник губчатой меди.

Фракционирование ХБА проводилось после осаждения асфальтенов из растворенного в 1 мл бензола битумоида 40 мл *n*-гексана. Полученная мальтеновая фракция разделялась на оксиде алюминия (Fluka) на фракцию аполярных соединений – элюирование 20 %

раствором хлороформа в *n*-гексане, и фракцию полярных соединений (смола) – элюирование 50 % раствором хлороформ-этанол. Аполярная фракция разделялась на колонке с силикагелем (Fluka) на фракцию насыщенных углеводородов при элюировании *n*-гексаном и ароматических углеводородов – элюент – бензол.

Газовая хроматография выполнялась на приборе Кристалл-2000М с программированием температуры колонки от 110 до 300 °С со скоростью 5 °С/мин. и выдержкой при начальной и конечной температурах 1 и 19 минут, соответственно. Колонка SPB-1, 30 м×0,32 мм, 0,25 мкм. Хромато-масс-спектрометрия алифатической и ароматической фракций была выполнена на приборе Shimadzu QP2010 Ultra. Применена колонка с параметрами DB-5, 30 м×0,25 мм, 0,10 мкм для разделения. Температура термостата колонок задавалась от 100 до 300 °С со скоростью 5 °С/мин. Температура интерфейса составляла 250 °С, а ионного источника – 200 °С.

#### Результаты и обсуждение

Мощность пласта Улуг в опробованном разрезе составляет 3,0 м, глубина залегания его кровли 110 м. По визуальной оценке пласт однородный, без видимых породных прослоев и минеральных включений. Образцы угля черные, блестящие. Характерные показатели качества изученных образцов угля приведены в табл. 1. Угли Межегейского месторождения относятся к малозольным – величина  $A^d$  варьирует от 4,5 до 6,5 %.

По данным ООО «УК «Межегейуголь», согласно протоколам испытаний качественных показателей угольного пласта, отражательная способность витринита  $R_v$  в образцах из шахты на глубине 100 м равна 0,86, на глубине 143 м – 0,88. Таким образом, жирные угли Межегейского месторождения по шкале катагенеза ОВ [9] соответствуют началу градации МК<sub>2</sub>.

**Таблица 1.** Технические показатели и состав микрокомпонентов исследованных проб углей Межегейского месторождения

**Table 1.** Characteristics of quality and petrographic composition of Mezhegey deposit coal samples

№ обр./Sample no.		МУ-18-1	МУ-18-2	МУ-18-3	МУ-18-4	МУ-18-5	
$W^a$ , %		0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	
$A^d$ , %		4,5	5,3	5,7	4,8	5,4	
Витринит Vitrinite	Подгруппа теловитринита Telovitrinite subgroup	Коллотелинит Collotelinite $V_{ct}$	1,6	1,4	1	1,2	1
	Подгруппа геловитринита Gelovitrinite subgroup	Гелинит Gelinite $V_{g}$	97,2	96,6	98	97,6	97,4
Инертинит Inertinite	Мацералы с сохранившейся клеточной структурой Macerals with plant cell structures	Фюзинит Fusinite $I_f$	0,2	1			1,2
		Семифюзинит Semifusinite $I_{sf}$	0,2	0,6		0,2	
	Мацералы, утратившие клеточную структуру, и фрагментарные Macerals lacking plant cell structures	Микринит Micrinite $I_{mi}$	0,4		0,8	0,4	0,4
		Секретинит Secretinite $I_{sec}$	0,2	0,4	0,2	0,6	
Фрагментарный инертинит Fragmented inertinite	Инертодетринит Inerto-detrinite $I_{det}$	0,8	0,4	1	1	0,4	
$TPI = \frac{Vt(e)+I(f)+I(sf)}{Vt(g)+Vt(det)+I(det)+I(ma)+I(mi)}$		0,02	0,03	0,01	0,01	0,02	
$GI = \frac{\sum Vt}{\sum I}$		82,33	49	99	82,33	61,5	

При изучении шлифов угля под микроскопом в проходящем поляризованном свете установлены мацералы группы витринита и инертинита.

Изученные образцы однородные по мацеральному составу и практически полностью сложены мацералами группы витринита. Он представлен бесструктурной оранжево-красной гелифицированной основной массой – гелинитом  $Vt_g$  (до 98,0 %) (табл. 1, рис. 1). Иногда проявлена слоистость, подчеркнутая мелкими линзами бурого коллотелинита  $Vt_{ct}$  – мацерала подгруппы теловитринита с четкими ровными контурами, утратившего внутреннюю клеточную структуру исходной растительной ткани (рис. 1, а).

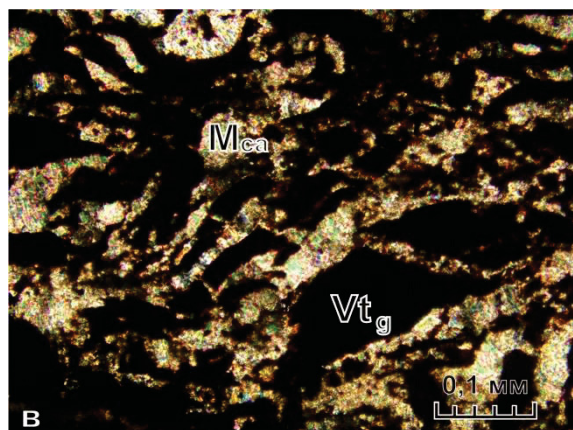
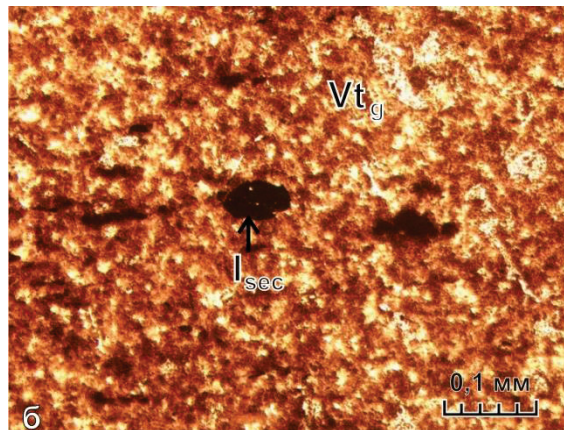
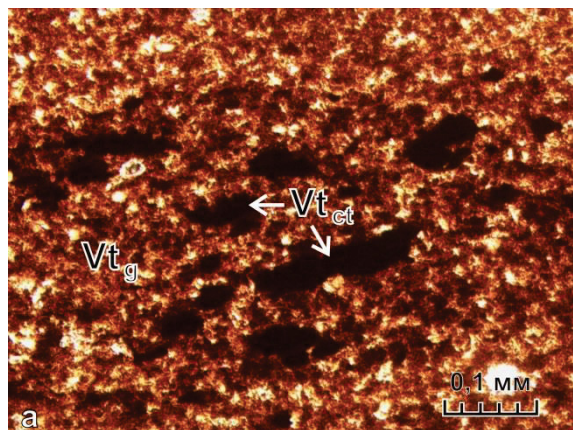
Мацералы группы инертинита с содержанием 1–2 % представлены секретинитом, микринитом, микрофузинитом, реже обломками фузинита и семифузинита. Секретинит встречается в виде округлых выделений неправильной формы (рис. 1, б).

Мацералы группы липтинита в изученных нами образцах не были встречены. По данным ВУХИН в угле Межегейского месторождения группа липтинита представлена кутинитом и споринитом [10]. Присут-

ствие же сапропелевой примеси в пласте Улуг УХБ в виде водорослей типа *Pila* и участков бесструктурной сапропелевой основной массы отмечалось еще в 1952 г. Н.А. Афанасьевой в фондовых работах. Позднее в В.И. Вяловым с соавторами [11] такие участки были выделены в гумосапропелитовую парагенетическую ассоциацию микрокомпонентов, эпизодически встречающуюся в крайних частях разреза пласта Улуг. Эта ассоциация является индикатором процесса сильного обводнения древнего торфяника. Мацерал альгинит в изученных нами шлифах в проходящем свете не встречен.

Минеральные включения в шлифах немногочисленны и представлены преимущественно кальцитом, слагающим основную часть некоторых обломков породы (рис. 1, в) либо заполняющим трещины в витрините и полости в редких обломках фузинита. Отмечаются единичные выделения фрамбоидального пирита.

Согласно генетической классификации [12] по своему вещественно-петрографическому составу угли относятся к группе гумолитов – класс гелитолитов, подкласс гелиты, тип гелиты, подтип гомогелиты.



**Рис. 1.** Компоненты органической и минеральной массы углей пласта Улуг Межегейского месторождения:  $Vt_g$  – гелинит,  $Vt_{ct}$  – коллотелинит,  $I_{sec}$  – секретинит,  $M_{ca}$  – кальцит; обр. №: а) МУ-18-2; б) МУ-18-5; в) МУ-18-4

**Fig. 1.** Organic and mineral matter components of coals from the Ulug seam of the Mezhegey deposit:  $Vt_g$  – gelinite,  $Vt_{ct}$  – collotelinite,  $I_{sec}$  – secretinite,  $M_{ca}$  – calcite; samples: а) МУ-18-2; б) МУ-18-5; в) МУ-18-4

Для реконструкции условий накопления ОВ по данным исследований мацерального состава углей часто применяются различные индексы и генетические диаграммы [13, 14]. В основе диаграммы С.Ф.К. Дисселя лежат индексы ТРІ (Tissue Preservation Index) и GI (Gelification Index), которые характеризуют сохранность структуры и гелификацию соответственно. Индекс сохранности структуры ТРІ явля-

ется отношением суммы структурных компонентов к сумме бесструктурных. Индекс гелификации GI представляет собой отношение гелифицированных компонентов к негелифицированным [13]. Формулы для расчета индексов и полученные значения приведены в табл. 1. Нанесение подсчитанных индексов на генетическую диаграмму показывает, что накопление пласта Улуг на Межегейском месторождении проис-

ходило преимущественно в обстановках озерных окраин, близких к маршевым болотам, в условиях сильной обводненности (рис. 2). Это подтверждается данными на генетической диаграмме, предложенной Р. Mukhopadhyay [15], на которой образцы также образовали поле в зоне маршей [16]. По Дисселю [13] марши представляют собой заболоченные низменности, периодически затопливаемые пресной или соленой водой близлежащего водоема, обычно лишены древесной растительности, а большая часть растительности представлена травянистыми растениями, местами развиты кустарники. В нашем случае диаграмма Дисселя отражает дифференциацию условий формирования межегейских углей по профилю побережья, а именно их близость к палеобассейну седиментации.

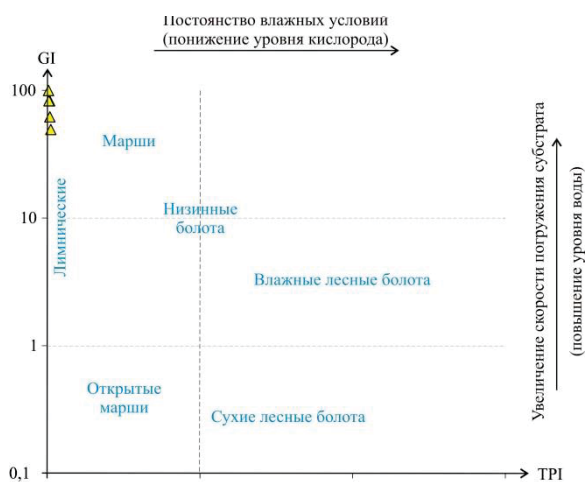


Рис. 2. Генетическая диаграмма условий торфонакопления по С.Ф.К. Дисселю [13]

Fig. 2. Genetic diagram of peat accumulation conditions according to C. Diessel [13]

Полученные нами данные не противоречат палеогеографическим реконструкциям юрской угленосной формации Тувинского прогиба, выполненным П.П. Тимофеевым [17]. Так, им в разрезах юрской угленосной формации фиксируется частая смена направленности трансгрессивно-регрессивного режима бассейна седиментации, который располагался на юго-востоке Тувинского прогиба и за его пределами, в области северной окраины Долины Великих озер Монголии, а обширная суша, откуда сносился обломочный материал, находилась на северо-востоке и востоке, в области Восточно-Тувинского нагорья. Основной водной артерией была довольно крупная река, так называемый пра-Улуг-Хем (или Палео-Улуг-Хем), имевший широкую и разветвленную дельту [17]. Бассейн седиментации представлял собой обширный пресный внутриконтинентальный водоем (озерного типа) с преобладающим осадконакоплением на глубинах до первых десятков метров [18]. Обнаруженные в известняках вышележающей салдамской свиты Улуг-Хемского бассейна ископаемые пресноводные пелелиподы являются типичными обитателями прибрежной зоны сравнительно крупных,

но мелководных озерных бассейнов [19]. Еще Тимофеев полагал, что уровень воды этого юрского внутриконтинентального бассейна зависел не только от региональных условий, но в какой-то мере мог регулироваться гидрографически связанным с ним морским бассейном, располагавшимся южнее. Согласно последним представлениям [20] климатические условия и устройство рельефа на протяжении ранней и средней юры способствовали стоку вод Палео-Улуг-Хема по территории Тувы и Монголии в залив Монголо-Охотского моря, проникавшего в начале юры в восточную часть Монголии.

Началу торфонакопления (пласта Улуг) предшествовала обширная ингрессия бассейна вглубь суши, захватив всю юго-западную и центральную части Тувинского прогиба. Это обеспечило длительное заболачивание прибрежных пространств, включая дельту пра-Улуг-Хема [17]. В углях Каа-Хемского месторождения УХБ соотношение Sr/Ba, являющееся индикатором палеосолености бассейна, имеет значение 1,5, что указывает на нормально соленые условия, а в подстилающих и перекрывающих пласт Улуг песчаниках этот показатель не превышает 0,4, характеризующая пресноводные условия [21].

Угли УХБ с относительно сильной и сильной степенью разложения растительного материала по Тимофееву относятся к фациям устойчивых и относительно устойчивых торфяных болот, но без привязки к конкретным обстановкам осадконакопления. Полученные нами данные позволяют уточнить и детализировать, что межегейские угли образовались в пределах прибрежных болот на окраине озера, возможно, эпизодически имевшего связь с морем, в условиях, близких к маршевым.

#### Нормальные и изопреноидные алканы

Распределение ациклических углеводородов, к которым относятся нормальные и изопреноидные алканы, изучалось методом ГЖХ в составе алифатической фракции хлороформенных битумоидов исходных образцов углей. Идентифицирован гомологический ряд *n*-алканов C<sub>13</sub>–C<sub>33</sub>. Распределение *n*-алканов мономодальное с максимумом, приходящимся на *n*-C<sub>19</sub>–C<sub>23</sub> (рис. 3).

Поскольку различные нечетные *n*-алканы происходят из различных первоначальных организмов-источников, по их составу можно оценить состав исходного органического вещества. Морские организмы синтезируют и накапливают липиды, играющие роль энергетического резерва, изоляционного материала и служащие для регуляции плавучести, они сосредоточены во внутренних частях организмов и должны быть жидкими, а значит – низкомолекулярными [22]. Основные липиды зоо- и фитопланктона – это короткоцепочечные *n*-алканы и олефины до C<sub>21</sub>, которые обладают свойствами жидкостей. Наземные растения, наоборот, нуждаются в твердых наружных липидах для защитных функций – предотвращения потери воды из организма, защиты от механических повреждений и вредителей. Они синтезируют углеводороды вплоть до C<sub>37–40</sub>, входящие в состав восков [23, 24]. Травянистая растительность, произрастающая в мор-

ских и солоноватоводных прибрежных водах, характеризуется промежуточным между морскими водорослями и наземными растениями набором продуцируемых углеводов, здесь доминируют УВ состава

С<sub>21</sub>, С<sub>23</sub>, С<sub>25</sub>. Так, алканы *n*-С<sub>21, 23, 25</sub> могут принадлежать как сосудистым растениям, так и микроводорослям, цианобактериям, погруженным макрофитам, сфагнуму [25–27].

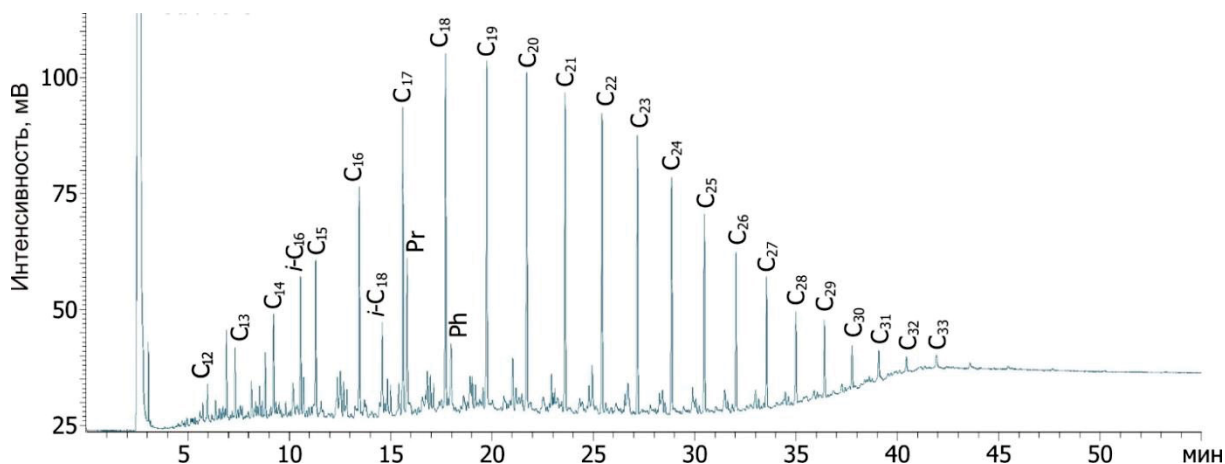


Рис. 3. Хроматограмма насыщенной фракции битумоида из угля (обр. № МУ-18-6), пласт Улуг Межегейского месторождения

Fig. 3. Chromatogram of the saturated fraction of bitumoid from Ulug seam coal (sample MU-18-6) at the Mezhegey deposit

По сравнению с ранее изученными образцами из разрезов Каа-Хемского месторождения (марка Г), Элегестского (ГЖ) и обнажения на г. Бегреда (Д–Г), которые характеризуются максимумом молекулярного распределения *n*-алканов на С<sub>23</sub> [28], смещение максимума в сторону С<sub>19</sub>–С<sub>21</sub> на Межегейском месторождении может быть связано с некоторым изменением состава исходного органического вещества (ОВ) в связи с более близким расположением к палеобассейну седиментации и уменьшением вклада ОВ, источником которого была высшая наземная растительность. С другой стороны, это может быть связано с более высокой степенью углефикации межегейских углей (Ж). Уменьшение содержаний длинноцепочечных и увеличение содержаний средне- и короткоцепочечных *n*-алканов в битумоидах из углей по мере роста метаморфизма в ряду от длиннопламенных к жирным углям отмечается в работах [29–31].

Оценка вклада водного и терригенного видов растительности в состав органической массы углей может быть проведена на основании коэффициентов  $R_{aq}$  и  $R_{wax}$ , предложенных в [25, 32] соответственно. В изученных углях коэффициент  $R_{aq}$  выше, чем  $R_{wax}$ , что может свидетельствовать о выраженном вкладе водной растительности в состав исходного органического вещества (табл. 2). С другой стороны, битумоид бактерий, принимающих участие в разложении захоронившегося ОВ в современных торфяниках, характеризуется преобладанием *n*-алканов состава С<sub>16</sub>, которые вносят свой вклад в накопление короткоцепочечных алканов, погружаясь вместе с торфяником на глубину [27].

Нечётные *n*-алканы, входящие в состав тканей разнообразных организмов продуцентов при попадании в осадок и на начальных стадиях катагенеза ОВ являются доминирующими в составе алифатической фракции битумоида. Рост метаморфизма углей при-

водит к выравниванию концентраций чётных и нечётных *n*-алканов [29]. Коэффициент нечетности  $K_n$  в изученных углях имеет значения около единицы.

В изученных образцах содержания алканов нормального строения преобладают над изопреноидными структурами. Величина отношения Pr/Ph в изученных образцах варьирует от 1,63 до 3,12. Такие значения отношения пристана к фитану характеризуют гумусовое ОВ (лагунно-дельтовые и озерно-континентальные фации), а преобладание пристана указывает на субокислительные условия осадконакопления. Известно, что в ископаемых углях величина отношения Pr/Ph зависит от метаморфизма. Согласно опубликованным данным это отношение достигает максимума в интервале 0,5–1,12 % R<sub>0</sub> [13, 33].

Отношение Pr/C<sub>17</sub> также считается индикатором обстановок седиментации. Значение отношения Pr/C<sub>17</sub> > 0,6 может указывать на наземные обстановки, как в нашем случае, а Pr/C<sub>17</sub> < 0,5 – на морские [34].

#### Полициклические биомаркеры

К числу традиционно рассматриваемых информативных реликтовых соединений относятся углеводороды стеранового и гопанового рядов. Они изучены в составе алифатической фракции методом хромато-масс-спектрометрии на основании масс-хроматограмм, построенных по 217 и 218 фрагментарным ионам для стеранов, и по 191 – для гопанов. Распределение гомологов стеранов С<sub>27</sub>, С<sub>28</sub> и С<sub>29</sub>, используемое для диагностики типа ОВ, в битумоидах межегейских углей характеризуется преобладанием этил-холестана (С<sub>29</sub>) (табл. 2). Известно, что современные (и фанерозойские) морские организмы продуцируют преимущественно стероиды С<sub>27</sub>, тогда как высшие растения – С<sub>29</sub>, из которых в процессе постседиментационных изменений образуются соответствующие стераны. В [35] предложили тригонограмму для установления

возможных условий накопления ОБ (рис. 4). По сравнению с ранее изученными образцами углей из других обнажений УХБ [28], межегейские угли характеризуются наибольшим содержанием стерана  $C_{27}$  (до 18 % против 2–3 %).

Биологический стеран – холестеран ( $C_{27}H_{48}$ ) – имеет конфигурацию 5 $\alpha$ H,14 $\alpha$ H,17 $\alpha$ H,20R. Первичным продуктом эпимеризации биостеранов является 5 $\alpha$ H,14 $\alpha$ H,17 $\alpha$ H,20S-изомер. По мере каталитического воздействия пород образуются геостераны в виде

двух изомеров – 5 $\alpha$ H,14 $\beta$ H,17 $\beta$ H,20R и 20S. [36]. Соотношения 20S/(20S+20R) и  $\alpha\beta\beta/\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha$  изомеров, рассчитанные по составу стеранов состава  $C_{29}$ , наиболее часто используются для оценки катагенеза [37, 38]. Стерановые коэффициенты термической зрелости битумоидов межегейских углей не достигли равновесных значений (табл. 2), что в первом приближении указывает на стадию катагенеза ниже 0,8–0,9 %  $R_o$ .

Таблица 2. Параметры углеводородов-биомаркеров

Table 2. Parameters of biomarker hydrocarbons

Образец/Sample		МУ-18-1	МУ-18-2	МУ-18-3	МУ-18-4	МУ-18-5	МУ-18-6
Ациклические УВ Acyclic HCs	Pr/Ph	2,43	1,63	2,89	3,12	2,66	2,66
	Pr/C <sub>17</sub>	0,68	0,77	0,73	0,71	0,78	0,78
	Ph/C <sub>18</sub>	0,20	0,33	0,20	0,18	0,23	0,22
	(Pr+Ph)/(C <sub>17</sub> +C <sub>18</sub> )	0,4	0,51	0,43	0,42	0,47	0,47
	$2 * C_{27} / (C_{26} + C_{28})$	1,02	1,02	1,02	1,03	1,02	1,02
	$P_{aq} = (C_{23} + C_{25}) / (C_{23} + C_{25} + C_{29} + C_{31})$	0,8	0,79	0,81	0,82	0,8	0,8
	$P_{max} = (C_{27} + C_{29} + C_{31}) / (C_{23} + C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31})$	0,35	0,37	0,35	0,33	0,36	0,36
CPI <sub>25-31</sub>	1,09	1,07	1,08	1,1	1,06	1,06	
Стераны Steranes	$\alpha\alpha\alpha$ 20R $C_{27}$ , %			21	15	19	20
	$\alpha\alpha\alpha$ 20R $C_{28}$ , %			21	21	18	25
	$\alpha\alpha\alpha$ 20R $C_{29}$ , %			58	64	63	55
	20S/(20S+20R) $C_{29}$ $\alpha\alpha\alpha$	0,40	0,42	0,37	0,42	0,37	0,44
	$\alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta + \alpha\alpha\alpha)$ $C_{29}$	0,55	0,53	0,55	0,54	0,55	0,53
Гопаны Hopanes	$\beta\alpha$ $C_{29}$ , %	9,36	9,44	9,56	9,17	8,53	6,94
	$\beta\alpha/\alpha\beta$ $C_{29}$	0,10	0,10	0,11	0,10	0,09	0,07
	22S/(22S+22R) $C_{31}$	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,58
Ароматические УВ Aromatic HC	MPI-1	1,33	1,42	1,37	1,32	1,31	1,20
	Rc=0,6 MPI+0,37	1,17	1,22	1,19	1,16	1,15	1,09
	MPDF	0,53	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54
	Rc=2,2424 MPDF – 0,166	1,02	1,05	1,05	1,04	1,05	1,04

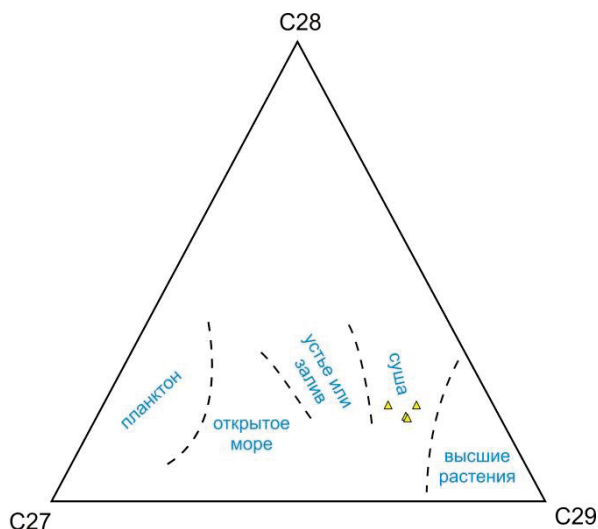


Рис. 4. Распределение стеранов  $C_{27}$ ,  $C_{28}$ ,  $C_{29}$  в битумоидах углей Межегейского месторождения на тригонограмме [35]

Fig. 4. Steranes  $C_{27}$ ,  $C_{28}$ ,  $C_{29}$  distribution in bitumoids of Mezegey coal deposit [35]

Углеводороды ряда гопана в изученных битумоидах представлены гомологами  $C_{29}$ – $C_{35}$ , среди них доминирует  $C_{30}$ -гопан. Гомологи  $C_{31}$ – $C_{35}$  в угольном битумоиде идентифицированы в виде смеси S- и R-диастереомеров при 22 атоме углерода. Гопаны яв-

ляются биомаркерами бактерий и имеют биологическую 17 $\beta$ ,21 $\beta$ (H)22R-конфигурацию [39]. В ОБ каустобиолитов они находятся в виде стереохимически преобразованных нефтяных  $\alpha\beta$ -гопанов и менее стабильных в условиях катагенеза  $\beta\alpha$ -моретанов. Для оценки степени катагенного созревания ОБ используются показатели 22S/(22S+22R) и отношение  $\beta\alpha$ -моретаны/ $\alpha\beta$ -гопаны (или  $\beta\alpha/(\alpha\beta+\beta\alpha)$ ), рассчитанные для гомологов  $C_{29}$  или  $C_{30}$ . Высокие равновесные значения 22S/(22S+22R) и низкие значения моретан-гопанового отношения указывают на высокую зрелость ОБ исследуемого угля.

#### Ароматические углеводороды

Основными компонентами ароматической фракции являются метил- и диметил-производные фенантрена. Укажем, что сочленение циклов по типу фенантрена и отсутствие заместителей при 4- и 5-м атомах углерода типично для стероидов как очевидных источников ряда фенантрена [36]. В ароматических фракциях битумоидов межегейских углей ретен (1-метил-7-изопропил-фенантрен) является минорным компонентом в сравнении с ранее изученными битумоидами углей Каа-Хемского месторождения [28], в которых этот маркер хвойных растений сильно доминировал. Отношение Ретен/Фенантрен меняется в интервале 0,17–0,48, что говорит о низких концентрациях ретена. В таких же резко подчиненных количе-

ствах обнаруживаются алкилнафталины с различными типами замещения, в их числе ароматическая биометка кадален (1,6-диметил-4-изопропилнафталин). Структура последнего генетически связана с бициклическими сесквитерпенами – кадиненами, присутствующими в эфирных маслах многих растений [36]. Соотношение кадален/ретен незначительно меняется в пределах разреза.

Распределение различных гомологов фенантронов и нафталинов используется в качестве параметров термической зрелости ОВ. Так, применение метилфенантронового индекса  $MPI-1=1,5 \times (2MP+3MP)/(P+1MP+9MP)$  основано на том, что в исходном ОВ выше концентрации  $\alpha$ -замещенных структур (1- и 9-метилфенантронов), а по мере увеличения степени катагенеза более термодинамически устойчивыми оказываются  $\beta$ -замещенные метилфенантроны [38, 40]. Аналогичный смысл имеет индекс  $MPDF= (2MP+3MP)/(1MP+9MP+2MP+3MP)$ .  $MPI-1$  показывает тесную положительную взаимосвязь с  $R_o$  в пределах главной фазы нефтеобразования и служит для определения расчётной величины отражательной способности витринита  $Rc=0,6 MPI+0,37$  [40]. Метилфенантроновый индекс  $MPI-1$  изменяется в пределах 1,2–1,4 и соответствует катагенезу  $MK_3^1$ , что несколько выше фактически измеренного по витриниту.

#### Заключение

Результаты петрографического анализа, выполненного при исследовании шлифов в проходящем свете, показывают, что угли Межегейского месторождения Улуг-Хемского бассейна однородные по мацеральному составу и сложены преимущественно бесструктурным витринитом ( $Vt > 98\%$ ). Накопление и преобразование исходного материала углей происходило в восстановительной обстановке в пределах сильно обводненных застойных торфяных болот на окраине озера, возможно, эпизодически имевшего связь с морем, в условиях, близких к маршевым.

Молекулярно-массовое распределение алканов в битумоидах межегейских углей показывает доминирование среднепечочных  $n$ -алканов, что в совокупности с преобладанием коэффициента  $P_{aq}$ , отвечающего за вклад водного органического вещества, и значениями отношения  $Pr/Ph$  указывает на их образование из остатков преимущественно травянистой растительности прибрежных вод, накапливавшихся в субокислительных условиях при диагенезе. Существен-

ный вклад высшей наземной растительности подтверждается также и распределением стеранов  $C_{27}$ ,  $C_{28}$ ,  $C_{29}$ , при этом определён констатируется и заметная доля органического вещества аквагенного происхождения, более высокая по сравнению с ранее изученными разрезами Каа-Хемского месторождения Улуг-Хемского бассейна.

Наблюдаются противоречия между данными о составе углеводородов-биомаркеров, которые свидетельствуют о присутствии в составе исходного органического вещества, в том числе остатков водной биоты – фитопланктона и водорослей – и данными углететрографии, свидетельствующими за исключительный вклад высшей растительности. Значительный вклад метаморфизм углей, их принадлежность к каменноугольной стадии в сочетании с применённым для исследования мацерального состава углей проходящего света в тонких шлифах ограничили диагностику возможно присутствующего в пробах альгинита и других мацералов группы липтинита. Можно констатировать, что данные геохимии биомаркеров дополняют проведённые углететрографические исследования и подтверждают формирование угленосной толщи Межегейского месторождения в результате поступления в осадок в основном высшей наземной растительности с определённой долей органического вещества аквагенного генезиса.

Результаты изучения показателей зрелости по составу углеводородов-биомаркеров свидетельствуют о значительном катагенезе органического вещества. Об этом говорят низкие значения коэффициента нечетности  $n$ -алканов  $CPI$ , высокие значения отношения гопанов  $22S/(22S+22R)$  и низкие  $\beta\alpha/\alpha\beta$ . Результаты исследований состава метилзамещённых фенантронов, а именно расчёт индексов  $MPI-1$  и  $MPDF$ , с последующим расчётом значений показателей отражающей способности витринита по опубликованным корреляционным зависимостям дали несколько более высокие значения показателя  $R_o$  по сравнению с известными прямыми определениями. Это 1,16 % по  $MPI-1$  и 1,04 % по  $MPDF$  и диапазон 0,85–0,90 % по фактическим и опубликованным данным.

*Авторы благодарят главного геолога Андрея Леонидовича Труля за предоставленный каменный материал и доктора геолого-минералогических наук Надежду Степановну Бурдельную за оказанную помощь в аналитических работах.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Котельников В.И., Куликова М.П., Прудников С.Г. История исследований каменных углей и их переработки в Туве // Новые исследования Тувы. – 2020. – № 2. – С. 225–240.
2. Лебедев Н.И. Угли Тувы: состояние и перспективы освоения сырьевой базы. – Кызыл: ТувайКОПР СО РАН, 2007. – 180 с.
3. Влияние удержания летучих веществ в зоне пиролиза углей Каа-Хемского и Межегейского месторождений на компонентный состав каменноугольной смолы / Г.Р. Монгуш, К.К. Чульдун, Н.В. Гарынцева, Б.Н. Кузнецов // Журнал Сибирского федерального университета. Химия. – 2020. – № 13 (4). – С. 606–619.
4. Нетрадиционные ресурсы и запасы газа в России и ПАО «Газпром» / И.А. Зинченко, Б.И. Шарипов, А.А. Крутой, Е.В. Перлова, С.А. Леонов // Геология нефти и газа. – 2018. – № 4s. – С. 87–92.
5. Vedanti N., Vadapalli U., Sain K. A brief overview of CBM development in India // Proceedings of the Indian National Science Academy. – 2020. – V. 86. – № 1. – P. 623–629.
6. ГОСТ 33503-2015 (ISO 11722:2013, ISO 5068-2:2007). Топливо твердое минеральное. Методы определения влаги в аналитической пробе. – М.: Стандартинформ, 2016. – 11 с.
7. ГОСТ Р 55661-2013 (ИСО 1171:2010) Топливо твердое минеральное. Определение зольности (Издание с Изменением N 1). – М.: Стандартинформ, 2019. – 29 с.
8. ГОСТ 55662-2013 Методы петрографического анализа углей. Ч. 3. Метод определения мацерального состава. – М.: Стандартинформ, 2014. – 21 с.
9. Конторович А.Э. Геохимические методы количественного прогноза нефтегазоносности. – М.: Недра, 1976. – 250 с.
10. Золотухин Ю.А., Красковская Т.Ф. О генезисе и свойствах юрских углей Улуг-Хемского бассейна. Сообщение 1. Разно-

- видности витринита и его ассоциаций с микрокомпонентами и минеральными составляющими // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2016. – № 3. – С. 43–49.
11. Вялов В.И., Корнилов Ю.Н., Черезов М.Ю. Петрографический состав и метаморфизм углей Улуг-Хемского бассейна // Советская геология. – 1991. – № 5. – С. 3–7.
  12. Вальц И.Э., Гинзбург А.И., Крылова Н.М. Основные принципы вещественно-петрографической классификации углей // Химия твердого топлива. – 1968. – № 3. – С. 9–20.
  13. Diessel C.F.K. Coal-bearing depositional systems. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1992. – 721 p.
  14. Recognition of peat depositional environments in coal: a review / S. Dai, A. Bechtel, C.F. Eble, R.M. Flores, D. French, I.T. Graham, M.M. Hood, J.C. Hower, V.A. Korasidis, T.A. Moore, W. Püttmann, J.M.K. O'Keefe // International Journal of Coal Geology. – 2020. – V. 219. – article 103383. – 67 p.
  15. Mukhopadhyay P. Organic petrography and organic geochemistry of tertiary coals from Texas in relation to depositional environment and hydrocarbon generation. Report of Investigations. – Texas: Bureau of Economic Geology, 1989. – 118 p.
  16. Ондар С.А., Бушнев Д.А. Условия образования и источники органического вещества среднеюрских углей Тувы // Успехи органической геохимии. – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2022. – С. 186–188.
  17. Тимофеев П.П. Юрская угленосная формация Тувинского межгорного прогиба. – М.: Наука, 1964. – 262 с.
  18. Сушанек (Печинина) Е.Б., Алексеев В.П. Литолого-фациальный состав угленосных отложений Улугхемского бассейна // Известия УГГУ. Сер.: Геология и геофизика. – 1998. – Вып. 8. – С. 112–116.
  19. Мартинсон Г.Г. Мезозойские и кайнозойские моллюски континентальных отложений Сибирской платформы, Забайкалья и Монголии. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – 364 с.
  20. Забелина В.И., Заика В.В. Гидрографическая связь Палео-Улуг-Хема с бассейнами рек Монголии и Амуром // Известия Русского географического общества. – 2021. – Т. 153. – № 1. – С. 19–31.
  21. Янчат Н.Н., Тас-оол Л.Х. Геохимия породообразующих элементов и РЗЭ в Каа-Хемском угольном месторождении // Химия твердого топлива. – 2021. – № 1. – С. 29–39.
  22. Комплекс химических и физических методов получения и исследования компонентов органического вещества пород и нефтяных / Л.С. Борисова, Е.А. Фурсенко, Е.А. Костырева, И.Д. Тимошина. – Новосибирск: РИЦ НГУ, 2016. – 82 с.
  23. Хант Дж. Геохимия и геология нефти и газа. – М.: Мир, 1982. – 706 с.
  24. Tegelaar E.W., Mattheizing R.M., Jansen J.B.H. Possible origin of n-alkanes in high-wax crude oils // Nature. – 1989. – V. 342. – P. 529–531.
  25. An n-alkane proxy for sedimentary input of submerged/floating freshwater aquatic macrophytes / K.J. Ficken, B. Li, D.L. Swain, G. Eglinton // Organic Geochemistry. – 2000. – V. 31. – P. 745–749.
  26. Impacts of paleohydrological changes on n-alkane biomarker compositions of a Holocene peat sequence in the eastern European Russian Arctic / R.A. Andersson, P. Kuhry, P. Meyers, Y. Zebühr, P. Crill, M. Mörth // Organic Geochemistry. – 2011. – V. 42. – P. 1065–1075.
  27. Дучко М.А. Геохимия биомаркеров в торфах юго-восточной части Западной Сибири: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2016. – 149 с.
  28. Бушнев Д.А., Ондар С.А., Бурдельная Н.С. Геохимия органического вещества углей Улуг-Хемского бассейна // Геология и геофизика. – 2021. – Т. 62. – № 11. – С. 1499–1510.
  29. Закономерности распределения нормальных и изопреноидных алканов в углях различной стадии метаморфизма / Н.Д. Гуляева, О.А. Арефьев, В.Л. Соколов, Ал.А. Петров // Химия твердого топлива. – 1976. – № 1. – С. 106–111.
  30. Идентификация и распределение реликтовых соединений (биомаркеров) в смолах пиролиза углей / В.Н. Шевкопляс, Л.Ф. Булузова, М. Стефанова, С. Маринов, Н.Д. Янева // Вопросы химии и химической технологии. – 2009. – № 5. – С. 61–70.
  31. Взаимосвязь между технологическими свойствами углей и составом экстрактов / Л.Ф. Булузова, Ш.М. Шакир, В.О. Кулакова, В.А. Колбаса // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2016. – № 1. – С. 13–20.
  32. Lipid biomarkers in the Zoige-Hongyuan peat deposit: indicators of Holocene climate changes in West China / Y. Zheng, W. Zhou, P. Meyers, S. Xie // Organic Geochemistry. – 2007. – V. 38. – P. 1927–1940.
  33. Radke M., Schaefer R.G., Leythaeuser D. Composition of soluble organic matter in coals: relation to rank and liptinite fluorescence // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1980. – V. 44. – P. 1787–1800.
  34. Peters K.E., Moldowan J.M. The biomarker guide. – Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1993. – 363 p.
  35. Huang W.-Y., Meinschein W.G. Sterols as ecological indicators // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1979. – № 43 (5). – P. 739–745.
  36. Петров А.А. Углеводороды нефти. – М.: Наука, 1984. – 263 с.
  37. Seifert W.K., Moldowan J.M. Use of biological markers in petroleum exploration // Methods Geochem. Geophys. – 1986. – № 24. – P. 261–290.
  38. Peters K.E., Walters C.C., Moldowan J.M. The biomarker guide. 2nd ed. – New York: Cambridge University Press, 2005. – 1155 p.
  39. Ourisson G., Albrecht P., Rohmer M. The microbial origin of fossil fuels // Scientific American. – 1984. – V. 251 (2). – P. 44–51.
  40. Radke M. Application of aromatic compounds as maturity indicators in source rocks and crude oils // Marine Petrol. Geol. – 1988. – V. 5. – P. 224–236.

Поступила 25.03.2022 г.

Прошла рецензирование 11.10.2022 г.

#### Информация об авторах

**Ондар С.А.**, младший научный сотрудник химико-технологической лаборатории Тувинского института комплексного освоения природных ресурсов СО РАН.

**Бушнев Д.А.**, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией органической геохимии Института геологии Коми НЦ УрО РАН.

UDC 552.574:550.4:51.762.2

## ORGANIC MATTER AND GEOCHEMISTRY OF MIDDLE JURASSIC COALS OF THE MEZHEGEY DEPOSIT (ULUG-KHEM BASIN, TUVA)

**Solangy A. Ondar**<sup>1</sup>,  
ondarsa@tikopr.sbras.ru

**Dmitry A. Bushnev**<sup>2</sup>,  
boushnev@geo.komisc.ru

<sup>1</sup> Tuvian Institute for Exploration of Natural Resources, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 117A, Internatsionalnaya street, Kyzyl, 667004, Russia.

<sup>2</sup> Institute of Geology, Komi Science Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 54, Pervomayskaya street, Syktyvkar, 167982, Russia.

**The relevance.** Hard coals of the Mezhegey deposit are used mainly as a sintering additive for coke production. However, the heterogeneity and multicomponent nature of coal composition make it possible to consider coal as a raw material for deep chemical processing and as a carrier of valuable metals in various concentrations, and a coal seam as a coal-gas deposit. Such an integrated approach to the development of fossil fuels requires research from various positions on the features of organic and inorganic matter, which depend on the initial conditions of accumulation and sources of matter.

**The purpose:** to study the composition of Middle Jurassic coals organic matter in the Mezhegey deposit of the Ulug-Khem coal basin in a complex of coal-petrographic and organic geochemical research methods.

**Methods:** microscopic study of maceral composition in thin sections in transmitted light. Analytical moisture content and ash content were determined by standardized methods. Geochemical studies included the extraction of chloroform bitumoid from coals, fractionation of the obtained extract, gas chromatographic and chromatographic analysis of the aliphatic and aromatic bitumoid fractions. Based on the obtained data indices characterizing the conditions of accumulation of organic matter, its possible sources, and the degree of thermal transformation were calculated.

**Results** of petrographic and geochemical studies of Middle Jurassic coals of the Mezhegey deposit of the Ulug-Khem basin show that their microcomponent composition is almost monomaceral with a predominance of structureless vitrinite. Coals were formed on the periphery of a large lake, possibly periodically connected with a sea, under conditions close to marsh. The composition and distribution of alkanes, steranes, and hopanes in the aliphatic fraction of bitumoid were studied. Distribution of n-alkanes and isoprenoids indicates the formation of coals mainly from the remains of aquatic vegetation with some participation of humic matter. The significant contribution of higher terrestrial vegetation is also confirmed by the distribution of C<sub>27</sub>, C<sub>28</sub>, C<sub>29</sub> steranes. Values of carbon preference index of alkanes, the known ratios of steranes and hopanes isomers and aromatic hydrocarbons testify to the high maturity of the coal organic matter.

### Key words:

coal, organic matter, vitrinite, Mezhegey deposit, Ulug-Khem coal basin, Republic of Tuva.

We thank chief geologist Andrey L. Trul for providing valuable samples and Dr. Sc. Nadezhda S. Burdelnaya for assistance in analytical work.

### REFERENCES

- Kotelnikov V.I., Kulikova M.P., Prudnikov S.G. The history of coal studies and coal industry in Tuva. *The new research of Tuva*, 2020, no. 2, pp. 225–240. In Rus.
- Lebedev N.I. *Ugli Tuvy: sostoyanie i perspektivy osvoeniya syrovoy bazy* [Coals of Tuva: the present state and prospects for the development of the raw materials base]. Kyzyl, Tuvian Institute for Exploration of Natural Resources, SB of the RAS, 2007. 180 p.
- Mongush G.R., Chuldum K.K., Garyntseva N.V., Kuznetsov B.N. The influence of retention of volatile substances in pyrolysis zone Kaa-Khemsky and Mezhegeisky coal deposits on component composition of coal tar. *J. Sib. Fed. Univ. Chem.*, 2020, vol. 13 (4), pp. 606–619. In Rus.
- Zinchenko I.A., Sharipov B.I., Krutoi A.A., Perlova E.V., Leonov S.A. Unconventional gas resources and reserves in Russia and Gazprom. *Oil and gas geology*, 2018, no. 4s, pp. 87–92. In Rus.
- Vedanti N., Vadapalli U., Sain K. A brief overview of CBM development in India. *Proceedings of the Indian National Science Academy*, 2020, vol. 86, no. 1, pp. 623–629.
- GOST 33503-2015. *Toplivo tverdoe mineralnoe. Metody opredeleniya vlagi v analiticheskoy probe* [11722-2013 Solid mineral fuels – Hard coal. Determination of moisture in the general analysis test sample by drying in nitrogen]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 11 p.
- GOST R 55661-2013. *Toplivo tverdoe mineralnoe. Opredelenie zolnosti (Izdanie s Izmeneniyem N 1)* [ISO 1171:2010 Solid mineral fuels – Determination of ash]. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 29 p.
- GOST 55662-2013 *Metody petrograficheskogo analiza ugley. Ch. 3. Metod opredeleniya matseralnogo sostava* [ISO 7404-3:2009 Methods for the petrographic analysis of coals. P. 3. Method of determining maceral group composition]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 21 p.
- Kontorovich A.E. *Geokhimicheskie metody kolichestvennogo prognoza neftegazonosnosti* [Geochemical methods for quantitative petroleum potential prediction]. Moscow, Nedra Publ., 1976. 250 p.
- Zolotukhin Yu.A., Kraskovskaya T.F. O genezise i svoistvakh yurskikh ugley Ulug-Khemskogo basseyna. Soobshchenie 1. Raznovidnosti vitrinita i ego assotsiatsii s mikrokomponentami i mineralnymi sostavlyayushchimi [The genesis and properties of Jurassic coals of the Ulug-Khem basin. Message 1. Varieties of vitrinite and its associations with microcomponents and mineral components]. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informacii*, 2016, no. 3, pp. 43–49.
- Vyalov V.I., Kornilov Yu.N., Cherezov M.Yu. Petrograficheskiy sostav i metamorfizm ugley Ulug-Khemskogo basseyna [Petrographic composition and metamorphism of the Ulug-Khem basin coals]. *Sovetskaya geologiya*, 1991, no. 5, pp. 3–7.



12. Valc I.E., Ginzburg A.I., Krylova N.M. Osnovnye printsiipy veshchestvenno-petrograficheskoy klassifikatsii ugley [Basic principles of the material-petrographic classification of coals]. *Khimiya tverdogo topliva*, 1968, no. 3, pp. 9–20.
13. Diessel C.F.K. *Coal-bearing depositional systems*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 1992. 721 p.
14. Dai S., Bechtel A., Eble C.F., Flores R.M., French D., Graham I.T., Hood M.M., Hower J.C., Korasidis V.A., Moore T.A., Püttmann W., O’Keefe J.M.K. Recognition of peat depositional environments in coal: a review. *International Journal of Coal Geology*, 2020, vol. 219, article 103383, pp. 67.
15. Mukhopadhyay P. *Organic petrography and organic geochemistry of tertiary coals from Texas in relation to depositional environment and hydrocarbon generation. Report of Investigations*. Texas, Bureau of Economic Geology, 1989. 118 p.
16. Ondar S., Bushnev D. Usloviya obrazovaniya i istochniki organicheskogo veshchestva sredneyurskikh ugley Tuvy [Depositional environments and organic matter sources of coals in Ulug-Khem Basin (Tuva)]. *Uspekhi organicheskoy geokhimii. II Vserossiyskaya yfexyfz ryyferentsiya* [II All-Russian Scientific Conference. Advances in Organic Geochemistry]. Novosibirsk, Novosibirsk State University Publ., 2022. pp. 186–188.
17. Timofeev P.P. *Yurskaya ughenosnaya formatsiya Tuvinskogo mezhgornogo progiba* [Jurassic coal-bearing formation of Tuvinsk intermontane depression]. Moscow, Nauka Publ., 1964. 262 p.
18. Sushanek (Pechinina) E.B., Alekseev V.P. Litologo-fatsialnyi sostav ughenosnykh otlozheniy Ulughemskogo basseyna [Lithological-facies composition of coal-bearing deposits of the Ulughkem basin]. *Izvestiya UGGU. Ser.: Geologiya i geofizika*, 1998, no. 8, pp. 112–116.
19. Martinson G.G. *Mezozoyskie i kaynozoyiskie mollyuski kontinentalnykh otlozheniy Sibirskoy platformy, Zabaykalya i Mongolii* [Mesozoic and Cenozoic molluscs of continental deposits of the Siberian Platform, Transbaikalia and Mongolia]. Moscow, USSR AS Publ., 1961. 364 p.
20. Zabelin V.I., Zaika V.V. Hydrographic connection of the Paleoulug-Hem with the Basins of Mongolian’s Rivers and Amur River. *Izvestiya Russkogo geografigicheskogo obshchestva*, 2021, vol. 153, no. 1, pp. 19–31. In Rus.
21. Yanchat N.N., Tas-Ool L. Kh. Geochemistry of rock-forming and rare earth elements in the Kaa-Khem coal deposit. *Solid Fuel Chemistry*, 2021, vol. 55, no. 1, pp. 26–36.
22. Borisova L.S., Fursenko E.A., Kostyreva E.A., Timoshina I.D. *Kompleks khimicheskikh i fizicheskikh metodov polucheniya i issledovaniya komponentov organicheskogo veshchestva porod i naftidov* [A complex of chemical and physical methods for obtaining and studying the components of organic matter of rocks and naphthides]. Novosibirsk, Novosibirsk State University Publ., 2016. 82 p.
23. Hant J. *Geokhimiya i geologiya nefii i gaza* [Petroleum geochemistry and geology]. Moscow, Mir Publ., 1982. 706 p.
24. Tegelaar E.W., Matthezing R.M., Jansen J.B.H. Possible origin of n-alkanes in high-wax crude oils. *Nature*, 1989, vol. 342, pp. 529–531.
25. Ficken K.J., Li B., Swain D.L., Eglinton G. An n-alkane proxy for the sedimentary input of submerged/floating freshwater aquatic macrophytes. *Organic Geochemistry*, 2000, vol. 31, pp. 745–749.
26. Andersson R.A., Kuhry P., Meyers P., Zebühr Y., Crill P., Mörth M. Impacts of paleohydrological changes on n-alkane biomarker compositions of a Holocene peat sequence in the eastern European Russian Arctic. *Organic Geochemistry*, 2011, vol. 42, pp. 1065–1075.
27. Duchko M.A. *Geokhimiya biomarkerov v torfakh yugo-vostochnoy chasti Zapadnoy Sibiri*. Dis. Kand. nauk [Geochemistry of biomarkers in peats of the southeastern part of Western Siberia. Cand. Diss.]. Tomsk, 2016. 149 p.
28. Bushnev D.A., Ondar S.A., Burdel’naya N.S. Geochemistry of the organic matter of Ulug-Khem basin coals. *Russian Geology and Geophysics*, 2021, vol. 62, no. 11, pp. 1229–1239.
29. Gulyaeva N.D., Aref’ev O.A., Sokolov V.L., Petrov A.I.A. Zakonomernosti raspredeleniya normalnykh i izoprenoidnykh alkanov v uglyakh razlichnoy stadii metamorfizma [Regularities of distribution of normal and isoprenoid alkanes in coals of different stages of metamorphism]. *Khimiya tvyordogo topliva*, 1976, no. 1, pp. 106–111.
30. Shevkoptyas V.N., Butuzova L.F., Stefanova M., Marinov S., Yaneva N.D. Identifikatsiya i raspredelenie reliktovykh soedineniy (biomarkerov) v smolakh piroliza ugley [Identification and distribution of relic compounds (biomarkers) in coal pyrolysis resins]. *Voprosy khimii i khimicheskoy tekhnologii*, 2009, no. 5, pp. 61–70.
31. Butuzova L.F., Shakir Sh.M., Kulakova V.O., Kolbasa V.A. Possibilities of coal technological properties assessment by the extracts composition. *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2016, no. 1, pp. 13–20. In Rus.
32. Zheng Y., Zhou W., Meyers P., Xie S. Lipid biomarkers in the Zoige-Hongyuan peat deposit: Indicators of Holocene climate changes in West China. *Organic Geochemistry*, 2007, vol. 38, pp. 1927–1940.
33. Radke M., Schaefer R.G., Leythaeuser D. Composition of soluble organic matter in coals: relation to rank and liptinite fluorescence. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1980, vol. 44, pp. 1787–1800.
34. Peters K.E., Moldowan J.M. *The biomarker guide*. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall, 1993. 363 p.
35. Huang W.-Y., Meinschein W.G. Sterols as ecological indicators. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1979, no. 43 (5), pp. 739–745.
36. Petrov A.A. *Uglevodorody nefii* [Petroleum hydrocarbons]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 263 p.
37. Seifert W.K., Moldowan J.M. Use of biological makers in petroleum exploration. *Methods Geochem. Geophys.*, 1986, no. 24, pp. 261–290.
38. Peters K.E., Walters C.C., Moldowan J.M. *The biomarker guide*. 2<sup>nd</sup> ed. New York, Cambridge University Press, 2005. 1155 p.
39. Ourisson G., Albrecht P., Rohmer M. The Microbial Origin of Fossil Fuels. *Scientific American*, 1984, vol. 251 (2), pp. 44–51.
40. Radke M. Application of aromatic compounds as maturity indicators in source rocks and crude oils. *Marine Petrol. Geol.*, 1988, vol. 5, p. 224–236.

Received: 25 March 2022.  
Reviewed: 11 October 2022.

#### Information about the authors

**Solangy A. Ondar**, junior researcher, Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

**Dmitry A. Bushnev**, Dr. Sc., chief researcher, head of the laboratory, Institute of Geology, Komi Science Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

УДК 624.131.412

## ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ БЕНТОНИТОВОЙ ГЛИНЫ, АКТИВИРОВАННОЙ ДАВЛЕНИЕМ, НА ПОКАЗАТЕЛЬ АДСОРБЦИИ

Середин Валерий Викторович<sup>1</sup>,  
seredin@nedra.perm.ru

Алванян Карине Антоновна<sup>1</sup>,  
karinealvanyan@yandex.ru

Маковецкий Олег Александрович<sup>1</sup>,  
omakovetskiy@gmail.com

Ядзинская Марина Радиковна<sup>1</sup>,  
marinayadzinskaya@mail.ru

<sup>1</sup> Пермский государственный национальный исследовательский университет,  
Россия, 614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15.

**Актуальность.** Полученные результаты исследования позволяют разработать технологию улучшения адсорбционной активности глин и получение модифицированных образцов глин с необходимыми адсорбционными свойствами, применяемых для устройства противofильтрационных экранов и завес, гидроизоляционного материала полигонов хранения промышленных и бытовых отходов, новых фармацевтических композиций лекарственных средств, в том числе для технологии твердых лекарственных форм, а также добавок в пищевые подкормки для животных с высокими сорбционными характеристиками.

**Цель:** оценка влияния структуры и свойств порового раствора на адсорбцию бентонитовой глины, активированной давлением.

**Объект:** обогащенная бентонитовая глина, активированная давлением до 800 МПа.

**Методы.** Обработку информации осуществляли геологическими и вероятностно-статистическими методами.

**Результаты.** При активации глин давлением до 150 МПа наибольшее влияние на ее адсорбцию оказывает энергетический потенциал коллоида; при увеличении давления до 800 МПа – энергетический потенциал поверхности минерала, то есть энергетический потенциал структурного элемента более низкого уровня. Следующим по степени воздействия показателем является водородный показатель порового раствора глины. Другие показатели, в том числе и площадь удельной поверхности пор, увеличивающаяся на 25 м<sup>2</sup>/г, имеют подчиненное значение. Предложена методика обработки информации, основанная на многомерном пошаговом регрессионном анализе, позволяющая ранжировать исследуемые показатели по степени их влияния на адсорбционную активность глины. Разработаны математические модели, позволяющие прогнозировать адсорбционную активность обработанных давлением глин по водяному пару.

### Ключевые слова:

Глина, структура, активация глины, адсорбция, минерал, пакет, коллоид.

### Введение

Работа направлена на формирование технологий улучшения адсорбционных свойств глин, которые применяются для устройства противofильтрационных экранов и завес [1], гидроизоляционного материала полигонов хранения промышленных и бытовых отходов [2], новых фармацевтических композиций лекарственных средств [3], в том числе для технологии твердых лекарственных форм, а также добавок в пищевые подкормки для животных с высокими сорбционными характеристиками [4].

Адсорбционную способность глин определяет их структура [5], минеральный состав и гранулометрия [6], поровый раствор [7, 8], площадь удельной поверхности [9] глинистых частиц.

Глины адсорбируют неорганические ионы и органические молекулы. Ионообменная емкость характеризует сорбцию неорганических ионов. Минералы группы монтмориллонит обладают более высокой емкостью катионного обмена ЕКО=80–150 мг-экв/100 г, в отличие от каолинитов ЕКО=3–15 мг-экв/100 г [10]. Метиленовый голубой (МГ) – органический краситель катионного типа, поэтому он адсорбируется на

отрицательно заряженной поверхности глинистых частиц [10, 11].

Механическая и термическая обработка [12–14], химическая активация кислотами и щелочами, солями [15–20] оказывает влияние на адсорбционную способность глин.

Обработка глин давлением изменяет их структуру, состав и свойства [21–25]. Однако вопросы воздействия давления на адсорбционную способность бентонитовой глины изучены недостаточно, поэтому *цель* работы – оценка влияния структуры и свойств порового раствора на адсорбцию бентонитовой глины, активированной давлением.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- изучить влияние структурных элементов на адсорбцию глины;
- исследовать совместное влияние структуры глин и свойств порового раствора на адсорбцию глин.

### Объект исследования

Бентонитовая глина Зырянского месторождения (Курганская область). Залежь приурочена к светлинской свите миоцена.

Гранулометрический состав природной глины по фракциям (мкм):  $\Phi_{<5 \text{ мкм}}$  – 51 %,  $\Phi_{5-50 \text{ мкм}}$  – 44 %,  $\Phi_{50-100 \text{ мкм}}$  – 4 %,  $\Phi_{>100 \text{ мкм}}$  – 1 %.

Обогащенной глины:  $\Phi_{<5 \text{ мкм}}$  – 56 %,  $\Phi_{5-50 \text{ мкм}}$  – 44 %.

Минеральный состав природной глины следующий: кварц – 14 %, монтмориллонит – 81 %, каолинит – 1 %, КППШ – 3 %, иллит – 1 %.

Минеральный состав обогащенной глины: кварц – 8 %, монтмориллонит – 88 %, каолинит – 1 %, КППШ – 2 %, иллит – 1 %.

#### Методика эксперимента

Первоначально природная глина обогащалась [22], затем обогащенный бентонит подвергался сжатию в диапазоне давлений 0–800 МПа по методике [21]. Полученные образцы исследовались рентгенофлуоресцентным анализом [26], инфракрасной спектроскопией [27], дифрактометрическим анализом [28]; электрокинетическим методом [29] для определения дзета-потенциала. Показатели пористости образцов глин определялись методами низкотемпературной физической адсорбции газообразного азота в порах исследуемых материалов на анализаторе удельной поверхности ASAP 2020MP (Micrometrics, США) при температуре жидкого азота (минус 196 °С) [30]. Водородный показатель pH, характеризующий свойства порового раствора глин, подверженных давлению, определялся по методике [31].

#### Критерии, используемые для оценки адсорбционной активности глин

Внешние критерии:

- *давление* (P, МПа) – это комплексный показатель, характеризующий изменение состава, структуры и свойств порового раствора глин и, как следствие, адсорбционную активность глин;
- *площадь удельной поверхности мезопор* –  $S_{\text{мезо}}$ , м<sup>2</sup>/г;
- *площадь удельной поверхности микропор* –  $S_{\text{микро}}$ , м<sup>2</sup>/г;
- *водородный показатель pH* характеризует свойства порового раствора глин, подверженных давлению.

Внутренние критерии:

- *содержание удаленных из пакетов ионов алюминия* (°С, %) характеризует энергетический потенциал пакета минерала монтмориллонит, который (энергетический потенциал) оценивается через дефектность пакетов, вызванную выносом из октаэдрического листа ионов алюминия;
- *толщина бездефектного минерала* (Mк, Å) характеризует энергетический потенциал минерала монтмориллонит за счет смещения пакетов между собой и их деформаций;
- *дзета-потенциал* ( $\zeta$ , мВ) характеризует энергетическую активность на поверхности коллоида.

#### Результаты исследования

*Давление активации глин на их адсорбцию.* Изменение показателя адсорбции (A) от давления активации (P) показано на рис. 1.

С ростом давления адсорбция глины по водяному пару возрастает с  $A=235$  мг/г до  $A=296$  мг/г и в сред-

нем составляет  $A_{\text{ср}}=275$  мг/г, стандартное отклонение  $\sigma=16,2$  мг/г. В диапазоне давлений  $P=0-150$  МПа  $A_{\text{в}}$  изменяется более интенсивно, чем при  $P=150-800$  МПа. Разделение на классы при граничном значении  $P=150$  МПа обосновано в ранее проведенных исследованиях [21], поэтому далее будем оперировать классами давлений: класс 1 –  $P=0-150$  МПа и класс 2 –  $P=200-800$  МПа. В классе 1 среднее значение и стандартное отклонение адсорбции составляют  $A_{\text{ср.1}}=264$  мг/г,  $\sigma_1=14,5$  мг/г, а в классе 2  $A_{\text{ср.2}}=286$  мг/г,  $\sigma_2=9,1$  мг/г.

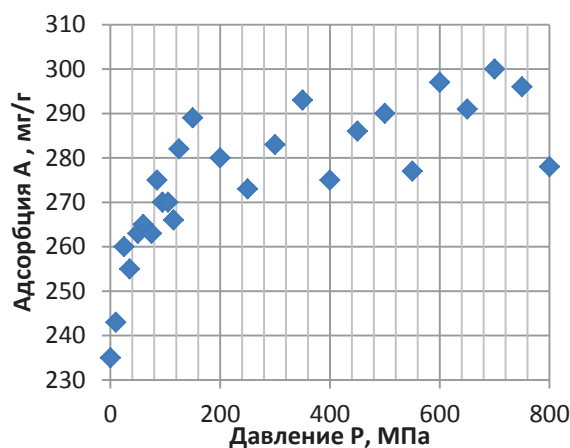


Рис. 1. Влияние давления активации на изменение показателя адсорбции бентонитовой глины по водяному пару

Fig. 1. Activation pressure effect on the change in bentonite clay adsorption rate by water vapor

Давление активации является комплексным показателем адсорбции. Это обусловлено тем, что давление оказывает влияние на изменение состава, структуры и свойств порового раствора глин, что согласуется с данными работ [22–24]. Поэтому ниже рассмотрим влияние отдельных факторов на изменение адсорбции глин.

*Площадь удельной поверхности мезо- и микропор.* На рис. 2 приведены графики изменения показателя адсорбции от площади удельной поверхности мезо- и микропор.

Установлено, что показатель адсорбции возрастает на 26 % с увеличением удельной поверхности микропор  $S_{\text{микро}}=17$  м<sup>2</sup>/г и мезопор  $S_{\text{мезо}}=8$  м<sup>2</sup>/г. При этом в первом классе влияние  $S_{\text{микро}}$  на  $A_{\text{в}}$  выше ( $r=0,88$ ), чем  $S_{\text{мезо}}$  ( $r=0,70$ ). Во втором классе наблюдается противоположная закономерность, то есть влияние площади мезопор на  $A_{\text{в}}$  несколько выше, чем микропор (табл. 1).

Выявленную закономерность можно объяснить следующим образом – при активации бентонитовой глины давлением до 800 МПа происходит дробление глинистых частиц, которое реализуется в виде увеличения содержания в глине тонких коллоидов (размером менее 0,2 мкм) на 1,4 % [32]. Этот процесс приводит к формированию микропор и, как следствие, к увеличению удельной площади микропор. Наряду с процессом диспергации протекают процессы агрегации глинистой фракции (0,2–5 мкм), что приводит к

увеличению пылеватой фракции (5–50 мкм) на 22 % [32]. Этот процесс приводит к формированию мезопор и, как следствие, к незначительному увеличению их удельной поверхности. Возрастание удельной

поверхности микро- и макропор на  $25 \text{ м}^2/\text{г}$  положительно влияет на адсорбционную активность бентонитовой глины. Полученные данные согласуются с результатами исследований [12, 21].

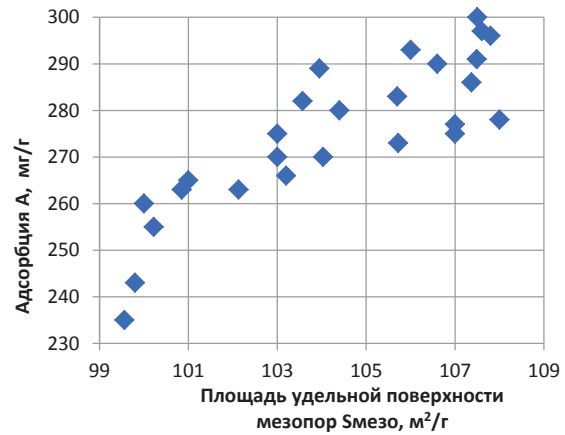
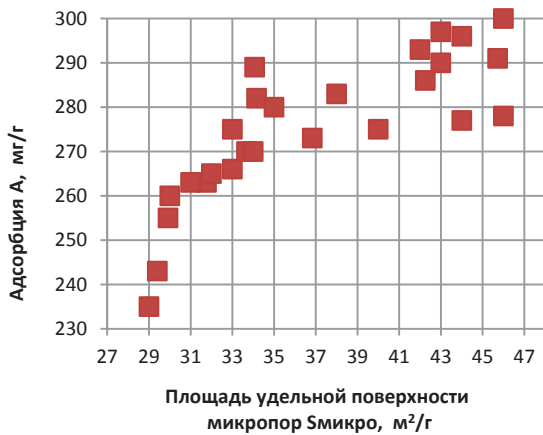


Рис. 2. График зависимости показателя адсорбции глины по водяному пару от площади удельной поверхности мезо- и микропор

Fig. 2. Graph of dependence of the clay adsorption index on water vapor on the specific surface area of meso- and micropores

**Энергетический потенциал структурных элементов глин: пакета, минерала и коллоида**

Энергетический потенциал (дефектность) пакета. Экспериментальные данные показали, что адсорбция бентонита возрастает с увеличением дефектности (энергетического потенциала) пакета минерала монтмориллонит, вызванной «удалением» ионов алюминия из октаэдрических листов [22, 23]. Так, по данным предыдущих исследований при обработке глины давлением в октаэдрическом листе структурного пакета минералов монтмориллонит и каолинит ионные связи между  $\text{Al}^{3+}$  и  $\text{OH}^-$  разрушаются, поэто-

му ионы алюминия выносятся из пакета, образуя в нем «дырочные» энергетические центры [33, 34]. Это повышает энергетическую активность пакета и, как следствие, адсорбционную активность глины [35].

Энергетический потенциал (дефектность) минерала оценивался показателем толщины бездефектного минерала ( $M_k$ , Å), который интерпретируется следующим образом – чем меньше толщина бездефектного минерала монтмориллонит, тем выше энергетический потенциал кристаллита. На рис. 3 приведены результаты экспериментальных исследований.

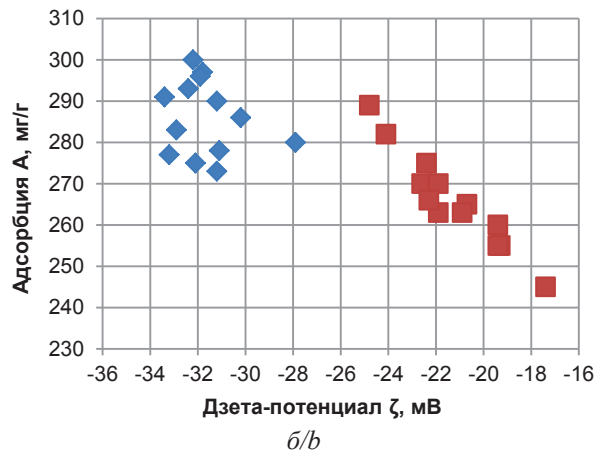
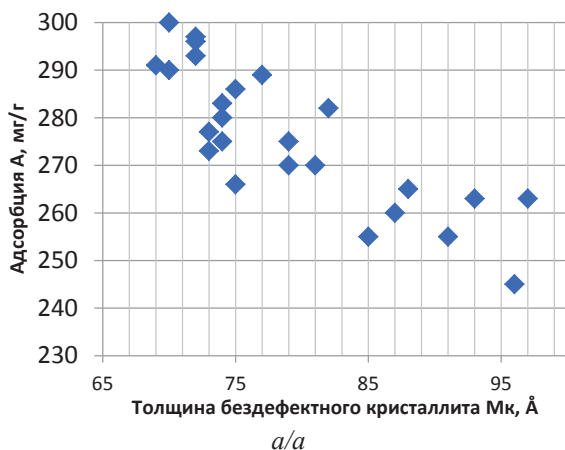


Рис. 3. График зависимости показателя адсорбции по водяному пару от энергетического потенциала минерала монтмориллонит ( $M_k$ ) (а) и коллоида ( $\zeta$ ) (б)

Fig. 3. Graph of dependence of the water vapor adsorption index on the energy potential of the mineral montmorillonite ( $M_k$ ) (a) and colloid ( $\zeta$ ) (b)

Выявлено, что с уменьшением толщины  $M_k$ , то есть с увеличением энергетического потенциала минерала монтмориллонит показатель адсорбции  $A$  увеличивается. Изменение энергетического потенциала

минерала связано с его дефектностью, за счет смещения пакетов между собой и их деформаций под давлением. Полученный результат согласуется с результатами [21, 25].

Энергетический потенциал (дефектность) коллоида оценивался показателем дзета-потенциала ( $\zeta$ , мВ). На рис. 3, б представлено изменение показателя адсорбции от дзета-потенциала частицы. С увеличением дзета-потенциала адсорбция глины возрастает. Изменение  $\zeta$ -потенциала вызвано тем, что в ходе воздействия давления на бентонит наблюдается удаление ионов  $Al^{3+}$ ,  $Si^{4+}$  из октаэдрического и тетраэдрического листов и перенос их в двойной электрический слой частицы [24], из которого в процессе ионного обмена они переходят в поровый раствор глины. В результате этих процессов на поверхности частиц, на границе адсорбционного и диффузного слоев, появляется дополнительный не скомпенсированный отрицательный заряд, который увеличивает энергетический потенциал коллоида [21] и, как следствие, адсорбционную активность глины [35].

Влияние порового раствора на показатель адсорбции. Свойства порового раствора оценивали через водородный показатель pH. Экспериментально установлено, что с увеличением кислотности суспензии (порового раствора) адсорбция глины возрастает [8, 31]. По данным исследования [33] с ростом давления активации глин увеличивается количество «удаленных» ионов  $Al^{3+}$  из октаэдрического листа минерала монтмориллонит. Ионы  $Al^{3+}$ , переходя из структурного пакета в диффузный слой глинистой частицы, вступают в химическую реакцию с гидроксильными

группами, связывают их, тем самым повышают кислотность порового раствора [8] и, как следствие, адсорбционную активность глины [35].

#### Обсуждение результатов исследования

Для оценки влияния структуры, энергетического потенциала поверхности структурных элементов и свойств порового раствора, на адсорбцию глин, обработанных высоким давлением, использован корреляционный анализ (КА). В данном случае КА интерпретируем следующим образом – чем выше статистическая связь между исследуемыми признаками, тем большее влияние признак оказывает на адсорбцию глины. Практическая реализация осуществлялась следующим образом: первоначально исследовались корреляционные связи между адсорбцией и каждым исследуемым фактором, затем производили ранжирование всех признаков по численному значению коэффициента корреляции в порядке возрастания.

Учитывали также положение о том, что если расчетное значение коэффициента корреляции  $r_p < r_k = 0,53$  при числе степеней свободы  $k = n - 2$  и уровне значимости  $\alpha = 0,05$ , то этот признак оказывает незначительное влияние на формирование адсорбции глин. Результаты расчетов коэффициентов парной корреляции приведены в табл. 1, а ранжирование признаков по степени их влияния на адсорбцию глин – в табл. 2.

Таблица 1. Корреляционная матрица

Table 1. Correlation matrix

Класс (давление) Class (pressure)	Показатели Indicators	P, МПа MPa	Ав, мг/г Av, mg/g	$S_{\text{мезо}}$ , м <sup>2</sup> /г $S_{\text{mezo}}$ , m <sup>2</sup> /g	pH	Мк, Å	$\zeta$ , мВ mV	C, %	$S_{\text{микро}}$ , м <sup>2</sup> /г $S_{\text{mikro}}$ , m <sup>2</sup> /g	pH <sub>тп</sub> pH <sub>tz</sub>
1 0–150 МПа/MPa	P, МПа/MPa	1,00	0,91	0,83	0,04	-0,71	-0,94	0,81	0,93	-0,86
	Ав, мг/г Av, mg/g		1,00	0,70	-0,15	-0,63	-0,94	0,86	0,89	-0,79
	$S_{\text{мезо}}$ , м <sup>2</sup> /г $S_{\text{mezo}}$ , m <sup>2</sup> /g			1,00	0,07	-0,50	-0,74	0,55	0,75	-0,73
	pH				1,00	0,10	0,02	-0,05	-0,22	0,26
	Мк, Å					1,00	0,67	-0,57	-0,73	0,59
	$\zeta$ , мВ/mV						1,00	-0,87	-0,92	0,80
	C, %							1,00	0,77	-0,70
	$S_{\text{микро}}$ , м <sup>2</sup> /г $S_{\text{mikro}}$ , m <sup>2</sup> /g								1,00	-0,87
pH <sub>тп</sub> /pH <sub>tz</sub>									1,00	
2 200–800 МПа/MPa	P, МПа/MPa	1,00	0,47	0,90	-0,92	-0,41	-0,37	0,86	0,91	0,67
	Ав, мг/г Av, mg/g		1,00	0,38	-0,55	-0,64	-0,21	0,53	0,52	0,30
	$S_{\text{мезо}}$ , м <sup>2</sup> /г $S_{\text{mezo}}$ , m <sup>2</sup> /g			1,00	-0,77	-0,27	-0,46	0,78	0,88	0,57
	pH				1,00	0,49	0,34	-0,84	-0,85	-0,68
	Мк, Å					1,00	0,43	-0,47	-0,52	-0,18
	$\zeta$ , мВ/mV						1,00	-0,35	-0,52	0,01
	C, %							1,00	0,87	0,37
	$S_{\text{микро}}$ , м <sup>2</sup> /г $S_{\text{mikro}}$ , m <sup>2</sup> /g								1,00	0,48
pH <sub>тп</sub> /pH <sub>tz</sub>									1,00	

Из табл. 1 видно, что исследуемые признаки оказывают различное по степени и направленности влияние на адсорбцию глин. При активации глин давлением до 150 МПа (класс 1) наибольшее влияние на адсорбцию оказывает энергетический потенциал коллоида ( $\zeta$ ), меньшее – удельная поверхность микропор ( $S_{\text{микро}}$ ) и

энергетический потенциал пакета (C). В диапазоне давлений 200–800 МПа (класс 2) на адсорбцию наибольшее влияние оказывает энергетический потенциал, но не коллоида, как в классе 1, а минерала (Мк). Второе и третье места занимают соответственно свойства порового раствора (pH) и энергетический потенциал пакета (C).

**Таблица 2.** Степень влияния структуры свойств порового раствора на адсорбцию глин

**Table 2.** Degree of influence of the structure of the pore solution properties on adsorption of clays

Метод обработки информации Information processing method	Класс/Class	Давление активации глин Clay activation pressure	Структура глины Clay structure		Энергетический потенциал на поверхности Energy potential at the surface			Свойства порового раствора Pore solution properties	
		P, МПа/MPa	S <sub>мезо</sub> , м <sup>2</sup> /г S <sub>мезо</sub> , m <sup>2</sup> /g	S <sub>микро</sub> , м <sup>2</sup> /г S <sub>микро</sub> , m <sup>2</sup> /g	Коллоида ζ, мВ Colloid ζ, mV	Минерала, Мк, Å Mineral, Mk, Å	Пакета C, % Package C, %	pH	pH <sub>гнз</sub> pH <sub>гнз</sub>
Корреляционный анализ Correlation analysis	1	0–150	5	2	1*	6	3	не влияет does not affect	4
	2	200–800	не влияет does not affect			1	3	2	не влияет does not affect
Пошаговый многомерный регрессионный анализ Stepwise Multivariate Regression Analysis	1	0–150	не влияет does not affect		1	не влияет does not affect		2	не влияет does not affect
	2	200–800	не влияет does not affect			1	не влияет does not affect	2	не влияет does not affect

Примечание: \*ранг влияния признака на адсорбцию глин, чем меньше ранг, тем большее влияние оказывает признак на адсорбцию глин.

Note: \*the rank of the feature influence on the adsorption of clays, the lower the rank, the greater the effect the feature has on the adsorption of clays.

Таким образом, по данным корреляционного анализа при активации образцов глины давлением до 150 МПа наибольшее влияние на показатель адсорбции оказывают энергетический потенциал коллоида и структура глин, а при увеличении давления активации до 800 МПа – энергетический потенциал поверхности минерала, то есть энергетический потенциал структурного элемента более низкого уровня и свойства порового раствора.

Следует подчеркнуть, что данный вывод основывается на изучении влияния каждого признака на адсорбцию глин. Однако на физико-химические свойства глин эти признаки оказывают совместное влияние.

Для оценки совместного влияния исследуемых признаков на адсорбцию глин используем многомерный пошаговый регрессионный анализ. Он позволяет рассчитать математическую модель, где в качестве зависимой переменной выступает адсорбция, а в качестве независимых переменных – показатели структуры, энергетического потенциала и свойств порового раствора. Преимущество этого анализа заключается в том, что при расчете математической модели распределение независимых переменных происходит в следующем порядке. На первом месте располагается показатель, имеющий наибольшее значение коэффициента парной корреляции между ним и адсорбцией. На втором месте – показатель, имеющий наибольшее значение множественного коэффициента корреляции или детерминации между ним и адсорбцией с учетом влияния первого показателя, на третьем – с учетом первого и второго показателей и т. д.

В результате расчетов получены следующие математические модели:

- Класс 1 (P=0–150 МПа):  $A_{в}=1200-6,608 \zeta - 133,078 \text{ pH}$ ;  $R^2=0,916$ ;
- Класс 2 (P=200–800 МПа):  $A_{в}=1147-2,365 \text{ Mk} - 84,143 \text{ pH}$ ;  $R^2=0,490$ .

Сопоставляя данные (табл. 2), полученные корреляционным (КА) и пошаговым многомерным регрессионным анализами (ПМРА), наблюдаем, что при активации глины давлениями до 150 МПа наибольшее влияние на адсорбцию оказывает энергетический потенциал коллоида ( $\zeta$ ), на втором месте по степени влияния на адсорбцию корреляционный анализ выбрал показатель «площадь микропор» ( $S_{\text{микро}}$ ), ПМРА – водородный показатель pH порового раствора.

При активации глины давлениями 200–800 МПа на первом месте КА и ПМРА выбрали показатель, характеризующий энергетический потенциал минерала (Mk), а на втором месте КА и ПМРА также одинаково выбрали pH порового раствора.

Согласно данным [32, 35], энергетический потенциал на поверхности структурных элементов во многом определяется pH порового раствора глин. Изменение энергии на поверхности частиц связано, прежде всего, с обменными реакциями между твердой и жидкой компонентами грунта [7, 10, 36]. Поэтому выбор pH второй компонентой свидетельствует о том, что энергетический потенциал структурных элементов является наиболее значимым признаком, влияющим на адсорбцию активированных давлением глин [37].

#### Заключение

При активации глины давлением до 150 МПа наибольшее влияние на адсорбцию оказывают энергетический потенциал коллоида, а при увеличении давления до 800 МПа – энергетический потенциал поверхности минерала, то есть энергетический потенциал структурного элемента более низкого уровня. Следующим по степени воздействия показателем является водородный показатель порового раствора. Другие показатели, в том числе и площадь удельной поверхности частиц, имеют подчиненное значение.

Предложена методика, основанная на многомерном регрессионном анализе, позволяющая ранжировать исследуемые показатели по степени их влияния на адсорбционную активность глины.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карасева Т.И., Тихонов В.П. Природно-техногенные системы: экологические перспективы использования. – Пермь: Изд-во Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2015. – 150 с.
2. Калинина Е.В., Рудакова Л.В. Снижение токсичных свойств шламов содового производства с последующей их утилизацией // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 6. – С. 85–96.
3. Бондарев А.В., Жилыкова Е.Т., Агарина А.В. Разработка состава и технологии гранул с адсорбционным действием // Научный результат. Медицина и фармация. – 2016. – Т. 2. – № 4. – С. 101–107.
4. Юрин Д.А. Изучение сорбционных свойств кормовой добавки на основе кремния // Сборник научных трудов Всероссийского научно-исследовательского института оцеводства и козоводства. – 2016. – Т. 1. – № 9. – С. 248–250.
5. Effects of microstructure of clay minerals, montmorillonite, kaolinite and halloysite, on their benzene adsorption behaviors / L. Deng, P. Yuan, D. Liu, J. Zhou, F. Chen, F. Annabi-Bergaya, Z. Liu // Applied Clay Science. – 2017. – V. 143. – P. 184–191.
6. Effects of particle characteristics and consolidation pressure on the compaction of non-spherical particles minerals engineering / Y. He, Y.Y. Li, T.J. Evans, A.B. Yu, R.Y. Yang // Minerals Engineering. – 2019. – V. 137. – P. 241–249.
7. Chang Z., Chen X., Peng Y. The adsorption behavior of surfactants on mineral surfaces in the presence of electrolytes – a critical review // Minerals Engineering. – 2018. – V. 121. – P. 66–76.
8. Cui J., Zhang Z., Han F. Effects of pH on the gel properties of montmorillonite, palygorskite and montmorillonite-palygorskite composite clay // Applied Clay Science. – 2020. – V. 190. – 105543.
9. Влияние давления на площадь активной поверхности частиц глинистых грунтов / В.В. Середин, А.В. Растегаев, Н.А. Медведева, Т.Ю. Паршина // Инженерная геология. – 2017. – № 3. – С. 18–27.
10. Соколова Т.А., Трофимов С.Я. Сорбционные свойства почв. Адсорбция. Катионный обмен: учебное пособие по некоторым главам химии почв. – Тула: Изд-во «Гриф и К», 2009. – 172 с.
11. Hills J.F., Pettifer G.S. The clay mineral content of various rock types compared with the methylene blue value // Journal of Chemical Technology and Biotechnology. – 1985. – V. 35A. – P. 168–180.
12. Кара-Сал Б.К., Сапелькина Т.В. Повышение адсорбционных свойств глинистых пород Тувы в зависимости от методов активации // Актуальные проблемы современной науки. – 2012. – № 5. – С. 158–162.
13. Термообработка бентонита и адсорбция метилена голубого / Л.А. Биннатова, Э.М. Ширалиева, А.И. Ягубов, Н.М. Мурадова, А.Н. Нуриев // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2007. – Т. 9. – № 2. – С. 99–101.
14. Влияние термического модифицирования на адсорбционные свойства природных силикатов / Л.И. Бельчинская, А.В. Бондаренко, М.Л. Губкина, Г.А. Петухова, В.Ф. Селеменев // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2006. – Т. 6. – Вып. 1. – С. 80–81.
15. Мосталыгина Л.В., Чернова Е.А., Бухтояров О.И. Кислотная активация бентонитовой глины // Вестник ЮУрГУ. – 2012. – № 24. – С. 57–61.
16. К вопросу о сорбционной очистке воды монтмориллонит содержащей глиной / О.Н. Каньгина, А.Г. Четверикова, А.Д. Стрекалова, О.В. Варламова // Вестник ОГУ. – 2014. – № 9 (170). – С. 160–163.
17. Везенцев А.И., Королькова С.В., Воловичева Н.А. Физико-химические характеристики природной и модифицированной глины месторождения Поляна Белгородской области // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2008. – Т. 8. – № 5. – С. 790–795.
18. Wang X., Nguyen A.V. Characterisation of electrokinetic properties of clinoptilolite before and after activation by sulphuric acid for treating CSG water // Microporous and Mesoporous Materials. – 2016. – V. 16. – P. 175–182.
19. Тучкова А.И., Тюпина Е.А., Рахимов М.Г. Влияние щелочной активации глинистых минералов на их сорбционную способность к извлечению Cs-137 из отработавшего масла // Успехи в химии и химической технологии: сб. научн. тр. – 2012. – Т. XXVI. – № 6 (135). – С. 92–95.
20. Куртукова Л.В., Сомин В.А., Комарова Л.Ф. Исследования по удалению из воды солей жесткости с применением сорбентов на основе минеральных волокон и бентонитовых глин // Успехи современного естествознания. – 2011. – № 12. – С. 29–31.
21. Changes of energy potential on clay particle surfaces at high pressures / V.V. Seredin, A.V. Rastegaev, V.I. Galkin, G.A. Isaeva, T.Y. Parshina // Applied Clay Science. – 2018. – V. 155. – P. 8–14.
22. Seredin V.V., Andrianov A.V., Isaeva G.A. The effect of high pressure on the kaolinite structure // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2022. – 342 LNNS. – P. 194–204.
23. Insights into the high-pressure behavior of kaolinite from infrared spectroscopy and quantum-mechanical calculations / M.D. Welch, W. Montgomery, E. Balan, P. Lerch // Physics and Chemistry of Minerals. – 2012. – V. 39. – P. 143–151.
24. Pressure dependence of the electronic structure in kaolinite: a first-principles study / Z.-J. Fang, X.-S. Zhai, Z.-L. Li, R.-J. Pan, M. Mo // Modern Physics Letters B. – 2017. – V. 31. – № 12. – 1750194 (10).
25. Çağın T., Demiralp E., Goddard III W.A. Pressure induced phase transformations in silica // MRS Online Proceedings Library. – 1997. – V. 492. – P. 287–292.
26. Вяхирев Н.П. Промежуточные формы в непрерывном ряду аморфное вещество – каолинит // Рентгенография минерального сырья: сб. статей. – 1966. – Вып. 5. – С. 128–131.
27. Коровкин М.В. Инфракрасная спектроскопия карбонатных минералов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 80 с.
28. Франк-Каменецкий В.А. Рентгенография основных типов породобразующих минералов (слоистые и каркасные силикаты). – Л.: Недра, 1983. – 359 с.
29. Бельный Д., Балаханов Д., Лесников Е. Определение дзета-потенциала. Краткий обзор основных методов // Аналитика. – 2017. – № 3. – С. 82–89.
30. Определение размеров частиц высокодисперсных материалов с помощью низкотемпературной адсорбции азота / А.В. Жилкина, А.А. Гордиенко, Н.А. Прокудина, Л.И. Трусов, Г.М. Кузьмичева, Н.А. Дулина, Е.В. Савинкина // Журнал физической химии. – 2013. – Т. 87. – № 4. – С. 674–679.
31. Середин В.В., Алванян К.А., Андрианов А.В. Влияние высоких давлений на изменение pH суспензий каолиновой и бентонитовой глин // Инженерная геология. – 2020. – Т. 15. – № 2. – С. 6–15.
32. Алванян К.А., Андрианов А.В., Селезнева Ю.Н. Закономерности изменения гранулометрического состава бентонитовой глины Зырянского месторождения активированной давлением // Вестник Пермского университета. Серия «Геология». – 2020. – Т. 19. – № 4. – С. 380–387.
33. Влияние давления на структуру каолинита в огнеупорных глинах Нижне-Увельского месторождения по данным ИК-спектроскопии / О.С. Ситева, Н.А. Медведева, В.В. Середин, Д.В. Иванов, К.А. Алванян // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 6. – С. 208–217.
34. Oku T., Hattori R., Sato K. Mechanism for breakage of Si-O networks of SiO<sub>2</sub> films in HF solutions // MRS Online Proceedings Library. – 1997. – V. 492. – P. 213–218.
35. Galkin V., Seredin V. Absorption properties of pressure activated bentonite clay // AIP Conference Proceedings. – 2021. – V. 2442. – P. 030009.

Разработаны математические модели, позволяющие прогнозировать адсорбционную активность обработанных давлением глин по водяному пару.

36. Doi A., Ejtemaei M., Nguyen A.V. Effects of ion specificity on the surface electrical properties of kaolinite and montmorillonite // Minerals Engineering. – 2019. – V. 143. – 105929.
37. Vollath D., Fischer F.D., Holec D. Surface energy of nanoparticles – influence of particle size and structure // Beilstein Journal of Nanotechnology. – 2018. – V. 9. – № 1. – P. 2265–2276.

*Поступила 17.01.2022 г.*

*Прошла рецензирование 26.10.2022 г.*

#### **Информация об авторах**

**Середин В.В.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой инженерной геологии и охраны недр Пермского государственного национального исследовательского университета.

**Алванян К.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры инженерной геологии и охраны недр Пермского государственного национального исследовательского университета.

**Маковецкий О.А.**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры инженерной геологии и охраны недр Пермского государственного национального исследовательского университета.

**Ядзинская М.Р.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры инженерной геологии и охраны недр Пермского государственного национального исследовательского университета.



UDC 624.131.412

## EFFECT OF THE STRUCTURE OF BENTONITE CLAY ACTIVATED BY PRESSURE ON THE ADSORPTION INDEX

**Valeriy V. Seredin**<sup>1</sup>,  
seredin@nedra.perm.ru

**Karine A. Alvanyan**<sup>1</sup>,  
karinealvanyan@yandex.ru

**Oleg A. Makovetskiy**<sup>1</sup>,  
omakovetskiy@gmail.com

**Marina R. Yadzinskaya**<sup>1</sup>,  
marinayadzinskaya@mail.ru

<sup>1</sup> Perm State National Research University,  
15, Bukirev street, Perm, 614068, Russia.

**The relevance.** The results of the study allow developing a technology for improving the adsorption activity of clays and obtaining modified clay samples with the necessary adsorption properties used for installation of impervious screens and curtains, waterproofing material for industrial and domestic waste storage sites, new pharmaceutical compositions of medicines, including for the technology of solid dosage forms, as well as additives in food supplements for animals with high sorption characteristics. The adsorption capacity of clays is determined by their structure, mineral composition, granulometry, pore solution and sorbate.

**The main aim:** evaluation of the influence of the structure and properties of the pore solution on the adsorption of pressure-activated bentonite clay.

**The object:** enriched bentonite clay, activated by pressure up to 800 MPa.

**The methods.** Information processing was carried out by geological and probabilistic-statistical methods.

**The results.** When clay is activated by pressure up to 150 MPa, the energy potential of the colloid has the greatest influence on its adsorption; with an increase in pressure to 800 MPa – the energy potential of the mineral surface, that is, the energy potential of a structural element of a lower level. The next indicator according to the degree of impact is the pH value of the clay pore solution. Other indicators, including the specific surface area of pores increasing by 25 m<sup>2</sup>/g, are of secondary importance. A technique for processing information based on a multivariate stepwise regression analysis is proposed, which makes it possible to rank the studied parameters according to the degree of their influence on clay adsorption activity. The authors developed the mathematical models which allow predicting the adsorption activity of pressure-treated clays in terms of water vapor.

### Key words:

Clay, structure, clay activation, adsorption, mineral, packet, colloid.

### REFERENCES

- Karaseva T.I., Tikhonov V.P. *Prirodno-tekhnogennyye sistemy: ekologicheskie perspektivy ispolzovaniya* [Natural-technogenic systems: ecological prospects for use]. Perm, Perm State National Research University Publ., 2015. 150 p.
- Kalinina E.V., Rudakova L.V. Decrease of toxic properties of soda production sludge and its utilization. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 6, pp. 85–96. In Rus.
- Bondarev A.V., Zhilyakova E.T., Agarina A.V. Razrabotka sostava i tekhnologii granul s adsorbtsionnym deystviem [Development of the composition and technology of granules with adsorption action]. *Nauchnyy rezultat. Meditsina i farmatsiya*, 2016, vol. 2, no. 4, pp. 101–107.
- Yurin D.A. Izucheniye sorbtsionnykh svoystv kormovoy dobavki na osnove kremniya [Study of the sorption properties of a silicon-based feed additive]. *Sbornik nauchnykh trudov Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta ovtsevodstva i kozovodstva*, 2016, vol. 1, no. 9, pp. 248–250.
- Deng L., Yuan P., Liu D., Zhou J., Chen F., Annabi-Bergaya F., Liu Z. Effects of microstructure of clay minerals, montmorillonite, kaolinite and halloysite, on their benzene adsorption behaviors. *Applied Clay Science*, 2017, vol. 143, pp. 184–191.
- He Y., Li Y.Y., Evans T.J., Yu A.B., Yang R.Y. Effects of particle characteristics and consolidation pressure on the compaction of non-spherical particles minerals engineering. *Minerals Engineering*, 2019, vol. 137, pp. 241–249.
- Chang Z., Chen X., Peng Y. The adsorption behavior of surfactants on mineral surfaces in the presence of electrolytes – a critical review. *Minerals Engineering*, 2018, vol. 121, pp. 66–76.
- Cui J., Zhang Z., Han F. Effects of pH on the gel properties of montmorillonite, palygorskite and montmorillonite-palygorskite composite clay. *Applied Clay Science*, 2020, vol. 190, 105543.
- Seredin V.V., Rastegaev A.V., Medvedeva N.A., Parshina T.Yu. Influence of pressure on the active surface area of clay soil particles. *Engineering Geology*, 2017, no. 3, pp. 18–27. In Rus.
- Sokolova T.A., Trofimov S.Ya. *Sorbtsionnyye svoystva pochv. Adsorbtsiya. Kationnyy obmen* [Sorption properties of soils. Adsorption. Cation Exchange]. Tula, Grif i K Publ., 2009. 172 p.
- Hills J.F., Pettifer G.S. The clay mineral content of various rock types compared with the methylene blue value. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 1985, vol. 35A, pp. 168–180.
- Kara-Sal B.K., Sapelkina T.V. Povysheniye adsorbtsionnykh svoystv glinistykh porod Tuvy v zavisimosti ot metodov aktivatsii [Increasing the adsorption properties of Tuva clay rocks depending on activation methods]. *Aktualnyye problemy sovremennoy nauki*, 2012, no. 5, pp. 158–162.
- Binnatova L.A., Shiraliev A.E.M., Yagubov A.I., Muradova N.M., Nuriev A.N. Termoobrabotka bentonita i adsorbtsiya metilena golubogo [Heat treatment of bentonite and adsorption of methylene blue]. *Kondensirovannyye sredy i mezhfaznyye granitsy*, 2007, vol. 9, no. 2, pp. 99–101.
- Belchinskaya L.I., Bondarenko A.V., Gubkina M.L., Petukhova G.A., Selemenev V.F. Vliyaniye termicheskogo modifitsirovaniya na adsorbtsionnyye svoystva prirodnnykh silikatov [The effect of thermal modification on the adsorption properties of natural silicates].

- Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*, 2006, vol. 6, Iss. 1, pp. 80–81.
15. Mostalygina L.V., Chernova E.A., Bukhtoyarov O.I. Kislotnaya aktivatsiya bentonitovoy gliny [Acid activation of bentonite clay]. *Vestnik YUUrGU*, 2012, no. 24, pp. 57–61.
  16. Kanygina O.N., Chetverikova A.G., Strekalova A.D., Varlamova O.V. K voprosu o sorbtsionnoy ochildke vody montmorillonit soderzhashchey glinoy [On the issue of sorption purification of water with montmorillonite-containing clay]. *Vestnik OGU*, 2014, no. 9 (170), pp. 160–163.
  17. Vezentsev A.I., Korolkova S.V., Volovicheva N.A. Physical and chemical characteristics of natural and modified clay from the Polyana deposit, Belgorod Region. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*, 2008, vol. 8, no. 5, pp. 790–795. In Rus.
  18. Wang X., Nguyen A.V. Characterisation of electrokinetic properties of clinoptilolite before and after activation by sulphuric acid for treating CSG water. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2016, vol. 16, pp. 175–182.
  19. Tuchkova A.I., Tyupina E.A., Rakhimov M.G. Influence of alkaline activation of clay minerals on their sorption ability to extract Cs-137 from used oil. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii: sb. nauchn. tr.*, 2012, vol. XXVI, no. 6 (135), pp. 92–95. In Rus.
  20. Kurtukova L.V., Somn V.A., Komarova L.F. Studies on the removal of hardness salts from water using sorbents based on mineral fibers and bentonite clays. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2011, no. 12, pp. 29–31. In Rus.
  21. Seredin V.V., Rastegaev A.V., Galkin V.I., Isaeva G.A., Parshina T.Y. Changes of energy potential on clay particle surfaces at high pressures. *Applied Clay Science*, 2018, vol. 155, pp. 8–14.
  22. Seredin V.V., Andrianov A.V., Isaeva G.A. The effect of high pressure on the kaolinite structure. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2022, vol. 342 LNNS, pp. 194–204.
  23. Welch M.D., Montgomery W., Balan E., Lerch P. Insights into the high-pressure behavior of kaolinite from infrared spectroscopy and quantum-mechanical calculations. *Physics and Chemistry of Minerals*, 2012, vol. 39, pp. 143–151.
  24. Fang Z.-J., Zhai X.-S., Li Z.-L., Pan R.-J., Mo M. Pressure dependence of the electronic structure in kaolinite: A first-principles study. *Modern Physics Letters B*, 2017, vol. 31, no. 12, 1750194 (10).
  25. Çağın T., Demiralp E., Goddard III W.A. Pressure induced phase transformations in silica. *MRS Online Proceedings Library*, 1997, vol. 492, pp. 287–292.
  26. Vyakhirev N.P. Promezhutochnye formy v nepreryvnom ryadu amorfnoe veshchestvo – kaolinit [Intermediate forms in a continuous series of amorphous substance – kaolinite]. *Rentgenografiya mineralnogo syrta: sb. statey*, 1966, no. 5, pp. 128–131.
  27. Korovkin M.V. *Infrakrasnaya spektroskopiya karbonatnykh mineralov* [Infrared spectroscopy of carbonate minerals]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. House, 2012. 80 p.
  28. Frank-Kamenetskiy V.A. *Rentgenografiya osnovnykh tipov porodoobrazuyushchikh mineralov (sloistye i karkasnye silikaty)* [Radiography of the main types of rock-forming minerals (layered and framework silicates)]. Leningrad, Nedra Publ., 1983. 359 p.
  29. Belenkii D., Balakhanov D., Lesnikov E. Measurement of the zeta potential. Brief review of the main methods. *Analytica*, 2017, no. 3, pp. 82–89. In Rus.
  30. Zhilkina A.V., Gordienko A.A., Prokudina N.A., Kuzmicheva G.M., Savinkina E.V., Trusov L.I., Dulina N.A. Determination of the size of particles of highly dispersed materials by low temperature nitrogen adsorption. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2013, vol. 87, no. 4, pp. 674–679. In Rus.
  31. Seredin V.V., Alvanian K.A., Andrianov A.V. High-pressure effect on change of pH of kaolin and bentonite clays suspensions. *Engineering Geology*, 2020, vol. 15, no. 2, pp. 6–15. In Rus.
  32. Alvanian K.A., Andrianov A.V., Selezneva Yu.N. Regularities of changes in the granulometric composition of the bentonite clay of the zhyryansk deposit activated by pressure. *Bulletin of Perm University. Geology*, 2020, vol. 19, no. 4, pp. 380–387. In Rus.
  33. Siteva O.S., Medvedeva N.A., Seredin V.V., Ivanov D.V., Alvanian K.A. Influence of pressure on kaolinite structure in fire-clays of the Nizhne-Uvelskoe deposit by IR spectroscopy. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 6, pp. 208–217. In Rus.
  34. Oku T., Hattori R., Sato K. Mechanism for breakage of Si-O networks of SiO<sub>2</sub> films in HF solutions. *MRS Online Proceedings Library*, 1997, vol. 492, pp. 213–218.
  35. Galkin V., Seredin V. Absorption properties of pressure activated bentonite clay. *AIP Conference Proceedings*, 2021, vol. 2442, p. 030009.
  36. Doi A., Ejtemaei M., Nguyen A.V. Effects of ion specificity on the surface electrical properties of kaolinite and montmorillonite. *Minerals Engineering*, 2019, vol. 143, 105929.
  37. Vollath D., Fischer F.D., Holec D. Surface energy of nanoparticles – influence of particle size and structure. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 2018, vol. 9, no. 1, pp. 2265–2276.

Received: 17 January 2022.

Reviewed: 26 October 2022.

#### Information about the authors

**Valeriy V. Seredin**, Dr. Sc., professor, head of the Department of Engineering Geology, Perm State National Research University.

**Karine A. Alvanyan**, Cand. Sc., associate professor, Perm State National Research University.

**Oleg A. Makovetskiy**, Dr. Sc., associate professor, Perm State National Research University.

**Marina R. Yadzinskaya**, Cand. Sc., associate professor, Perm State National Research University.

УДК 908.470.40+547

## РТУТЬ В ПОЧВАХ И РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ЗАПОВЕДНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ ПРИМОРСКОГО КРАЯ

Барановская Наталья Владимировна<sup>1</sup>,  
nata@tpu.ru

Чекрыжов Игорь Юрьевич<sup>2</sup>,  
chekr2004@mail.ru

Иванов Владимир Викторович<sup>2</sup>,  
d159327@yandex.ru

Доронина Валерия Дмитриевна<sup>1</sup>,  
vddoronina@mail.ru

Осипова Нина Александровна<sup>1</sup>,  
osipova-nina@yandex.ru

Хвощевская Альбина Анатольевна<sup>1</sup>,  
unpc\_voda@mail.ru

Паничев Александр Михайлович<sup>3</sup>,  
sikhote@mail.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

<sup>2</sup> Дальневосточный геологический институт,  
Россия, 690022, г. Владивосток, пр. 100 лет Владивостоку, 159.

<sup>3</sup> Тихоокеанский институт географии ДВО РАН,  
Россия, 690091, г. Владивосток, ул. Радио, 7.

**Актуальность.** Неуклонный рост в мире геохимических и экологических исследований ртути в локально-регионально-планетарном плане связан с активной циркуляцией и вездесущностью ее различных форм в наземных и водных средах биосферы, а также с ее супертоксичностью и высокой биодеструктивностью. Актуальность настоящего исследования определяет применение современных инструментальных средств высокочувствительного анализа при биогеохимическом изучении разнотипных компонентов системы растение–подстилка–почва на трех полигонах заповедных горнолесных территорий юга Дальнего Востока.

**Цель:** установить содержание ртути в растительности и почвах Приморского края.

**Объекты:** почвы, растительный опад, лесная подстилка, растения Приморского края.

**Методы.** Определение содержания массовой доли общей ртути проведено в МИНОЦ «Урановая геология» в отделении геологии ТПУ без предварительного химического разложения проб методом беспламенной атомно-абсорбционной спектрометрии. Применен ртутный анализатор РА-915+ с пиролитической приставкой РП-91С (ООО Люмэкс, г. Санкт-Петербург) и ИСП-МС в Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии.

**Результаты.** Полученные результаты характеризуют содержание ртути соседствующих почв, растительного опада и растительности в совокупности трех природораздельных участков хребта Сихотэ-Алинь, которые расположены в пределах охраняемых, потенциально геохимически «девственных» природных территорий Приморского края. Среднее содержание ртути для почв районов окрестностей ручья Ванчин-Угольный, Шандуйских озер и притока реки Бикин составило, соответственно (мг/кг): 0,162 (размах 0,046–0,298), 0,098 (размах 0,015–0,264) и 0,117 (размах 0,021–0,28). Различия в содержании ртути в почвах исследуемых территорий зависят от количества органогенной составляющей и ландшафтных особенностей местности. Содержание ртути в разных видах растительности составило: лишайник (0,135 мг/кг), папоротник (0,0383 мг/кг), лабазник (0,023 мг/кг), осока (0,016 мг/кг), что объясняется различной способностью растений к физиолого-биологическому фиксации водорастворимых форм ртути. Более высокие содержания ртути в почвах, по сравнению с растительной подстилкой и самой растительностью, – свидетельство многолетнего скапливания запасов этого металла и связывания его основной массы в органоминеральной форме в почвах.

### Ключевые слова:

биогеохимия ртути, почвы, растительный опад, растения, заповедные территории, Сихотэ-Алинь.

### Введение

Неуклонный рост в мире геохимических и экологических исследований ртути в локально-регионально-планетарном плане связан с активной циркуляцией и вездесущностью ее различных форм в наземных и водных средах биосферы, а также с ее супертоксичностью и высокой биодеструктивностью. Интерес к содержанию ртути в природных средах огромен во всем мире в связи с ее высокой летучестью, токсичностью органических форм [1–3]. Содержание ртути в почвах зависит от типа и подтипа почв, их агрофизической и агрохимической характеристики [4]. Об-

зор литературы по вопросам, связанным с загрязнением ртутью земной поверхности, почвы и растений и трансформацией соединений ртути [5, 6], показывает, что на поверхности суши осаждение ртути происходит в основном в окисленной форме ( $Hg^{2+}$ ) и ее превращения связаны в первую очередь с окислительно-восстановительным потенциалом окружающей среды и биологическими и химическими процессами метилирования. Осаждение ртутных загрязняющих веществ на земле с низкой растительностью в 3–5 раз ниже, чем в лесах. Наибольшее количество ртути выбрасывается из тропических регионов, за ко-

торыми следует умеренная зона, а самые низкие уровни – из полярных регионов. Районы с растительностью в соответствии с размером выбросов располагаются в следующей последовательности: леса > другие районы (тундра, саванны и чапараль) > сельскохозяйственные районы > пастбищные экосистемы. Участки суши, лишённые растительности, выделяют больше ртути, чем участки с растениями.

Устойчив интерес к содержанию ртути в почвах крупных промышленных городов и промышленных центров с высокой антропогенной нагрузкой. На территориях с высоким уровнем загрязнения, таких как районы вблизи ртутных шахт, содержание ртути в почве и растений намного выше, чем на территориях другого использования. Загрязнённая ртутью почва встречается вокруг шахт, промышленных площадок и ртутных рудников в пределах провинции Гуйчжоу (Китай), где содержание ртути составляет 2920 мг/кг. В пределах ртутных рудников Учунь и Ланьмучан (Китай) содержание ртути составляет 237–477 мг/кг, в то время как в других местах не превышает 100 мг/кг [6–8]. На территории России в горнорудных районах Алтайского края содержание ртути в почвах составляет от 250 до 66000 мг/кг [9]. Обширные ореолы с повышенным содержанием ртути формируются не только в горнорудных районах, но и в районах химических, металлургических, теплоэнергетических комплексов, в районах крупных промышленных аварий, связанных с выбросами ртути в прошлом [10–13].

Содержание ртути в почвах агроценозов России колеблется от 0,01 до 0,16 мг/кг [14]. Вместе с тем для проведения фонового мониторинга, для установления связи между содержанием ртути и свойствами подстилающей поверхности, для выделения реально вклада антропогенной составляющей, представляет интерес установление содержания ртути на фоновых территориях, удалённых от крупных промышленных центров. Так, на территории Воронежского заповедника содержание ртути варьируется от 0,006 до 0,212 мг/кг в зависимости от типа почв, среднее содержание ртути в почвах Окского заповедника составляет 0,021 мг/кг [15], содержание ртути в почвах Северной Осетии составляет 0,500 мг/кг, в Республике Крым – 0,012–0,037 мг/кг [16, 17].

На территории Дальнего Востока также проводились исследования по установлению содержания ртути в почве. В почвах территории г. Благовещенска среднее содержание ртути составляет 0,092 мг/кг, на территориях островов Русский и Шкота средние содержания ртути составляют от 0,058 до 0,158 мг/кг [18]. На территориях Приморского и Хабаровского краёв коэффициент концентрации ртути относительно кларка в верхней части континентальной земной коры по А.П. Виноградову составляет от 25 до 75 [18].

Данные по содержанию ртути в растительности используются достаточно широко для выявления источников техногенного загрязнения [2]. Ртутметрии биолого-почвенных объектов дальневосточных экосистем посвящены немногочисленные публикации эколого-геохимической проблематики. Так, в полынях и в листьях дуба содержание ртути варьируется от 0,007 до

0,013 мг/кг и от 0,014 до 0,033 мг/кг, соответственно, для территорий острова Русский, острова Шкота [19]. Как правило, ранее при анализе ртути применялось недостаточно совершенное по настоящим меркам аналитическое оборудование. В большинстве случаев были опробованы территории с заметной антропогенной нагрузкой на природную среду (районы Краснореченской обогатительной фабрики, Дальнегорского рудного узла, Абрамовского рудопроявления, Вознесенского рудного района). Вместе с тем исследования по содержанию ртути в компонентах природных сред на заповедных особо охраняемых территориях явно недостаточно, что обуславливает актуальность данной работы.

В настоящем исследовании изучено содержание ртути в разнотипных компонентах системы растение–подстилка–почва на трёх полигонах заповедных горнолесных территорий юга Дальнего Востока с применением современных инструментальных средств высокочувствительного анализа. Целесообразно охарактеризовать ртутьносность в совокупности соседствующих почв, растительного опада и растительности трёх приводораздельных участков хребта Сихотэ-Алинь, что в пределах охраняемых, потенциально геохимически «девственных» природных территорий Приморского края.

#### Материал и методы исследования

Отбор проб почв, растительного опада и растительности для многоцелевых исследований по проекту РНФ, в том числе ртутметрических, произведен в летний полевой период 2020 г.

Для проботбора природного биолого-почвенного материала были выбраны геолого-геоморфологические и ботанически сравнительно «индивидуальные» районы (полигоны) на западном склоне Сихотэ-Алиния, неодинаково приподнятые относительно уровня моря и отстоящие друг от друга на первые сотни километров в меридиональной полосе протяженностью порядка 400 км. Они по-разному удалены от крупных населённых пунктов и очагов хозяйственной деятельности (в т. ч. Приморской ГРЭС в г. Лучегорске), равно как и от геологических объектов (в первую очередь, месторождений угля и рудного сырья), которые принадлежат к потенциальным местным (локальным) источникам антропогенной и естественной эмиссии ртути (рис. 1). Это районы: 1) окрестностей руч. Ванчин-Угольный, приток р. Милоградовки в Национальном парке «Зов тигра» (далее В-район); 2) Шандуйских озёр в Сихотэ-Алинском государственном биосферном заповеднике (далее Ш-район) и 3) верховья р. Пещерки, приток р. Бикин в национальном парке «Бикин» (далее Б-район).

На этих территориях низко- и среднегорья, что пространственно относятся к Восточно-Сихотэ-Алинскому вулканическому поясу, развиты верхнемеловые–среднепалеогеновые кремнекислые и среднекислые вулканические и вулканогенно-осадочные породы.

Почвы данных территорий относятся к подбурям и бурозёмам, согласно Классификации и диагностике почв России [20]. Они имеют слабо дифференцированный мелкозёмисто-щебнистый профиль с высоким содержанием в верхней части слабо разложившегося органического вещества [21]. Такие почвы, как из-

вестно, имеют кислую реакцию среды почвенного раствора, невысокую насыщенность почвенного поглощающего комплекса основаниями и в средней части профиля обилие силикатных и оксалаторасторимых оксидов Al и Fe [20]. Для бурозёмов подобных мест отбора проб характерно незначительное увеличение фракции ила в нижней части профиля [22, 23].

Во всех случаях для ртутметрии параллельно отбирались пробы почв и растительного опада. Так, в В-районе было отобрано 11 проб почв и 7 проб растительного опада; в Ш-районе – 22 пробы почв и 15 проб растительного опада и в Б-районе – 18 проб почв и 16 проб растительного опада [24].

Опробование и определение содержания ртути в растительности проводилось только для Шандуйского участка, характеризуемого образцами: лишайники рода *Usnea* – 5 шт., лабазник рода *Filipéndula* – 18 шт., осоки (*Cárex*) – 26 шт. и папоротники рода *Polypodióphyta* – 23 шт. При полевом сборе на каждой точке наблюдений отщипывались листья от нескольких растений в радиусе до 3 м. Лишайники чаще всего отбирались с нескольких деревьев в радиусе до 10 м.

Пробоподготовка проб почв и растений происходит в несколько этапов: предварительное подсушивание, удаление каких-либо включений, растирание и просеивание [25, 26].

Пробоподготовка к проведению анализа проводится в соответствии с методическими указаниями для определения ртути атомно-абсорбционным методом согласно ПНД Ф 16.1:2.2.80-2013 (М 03-09-2013) [27], методическими указаниями для пробоподготовки [28].

Определение содержания массовой доли общей ртути проведено в МИНОЦ «Урановая геология» в отделении геологии ИШПР ТПУ без предварительного химического разложения проб, методом беспламенной атомно-абсорбционной спектрометрии (ААС). Применен ртутный анализатор РА-915+ с пиролизической приставкой РП-91С (ООО Люмэкс, г. Санкт-Петербург). Принцип его действия основан на термическом разложении пробы с последующим детектированием образующейся атомарной ртути методом атомной абсорбции с зеемановской коррекцией неселективного поглощения. Дозатор, содержащий известную массу или объём образца, помещают в атомизатор. При разогреве и разложении пробы по заданному температурному режиму из нее выделяется атомарная ртуть  $Hg^0$ , которая переносится потоком газа-носителя (воздуха) в аналитическую кювету. Спектрометр измеряет поглощение резонансного излучения с длиной волны 254 нм атомами ртути. Для градуировки использовали образцы почв СДПС ГСО 2498-83–2500-83 (НПО «Тайфун», г. Обнинск, Россия).

Методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой выполнен элементный анализ почв, в том числе анализ ртути в 11 пробах, с использованием масс-спектрометра NexION 300D (Perkin Elmer, США), для определения сходимости результатов двух методов. Предварительно проба почв проходила процедуру пробоподготовки (разложения) в кислой среде путем ее окисления под действием температуры и добавления смеси концентрированной соляной и азотной кислот в

герметичных контейнерах при повышенном давлении в микроволновой системе МС-6 с соблюдением соответствующего режима минерализации [29].

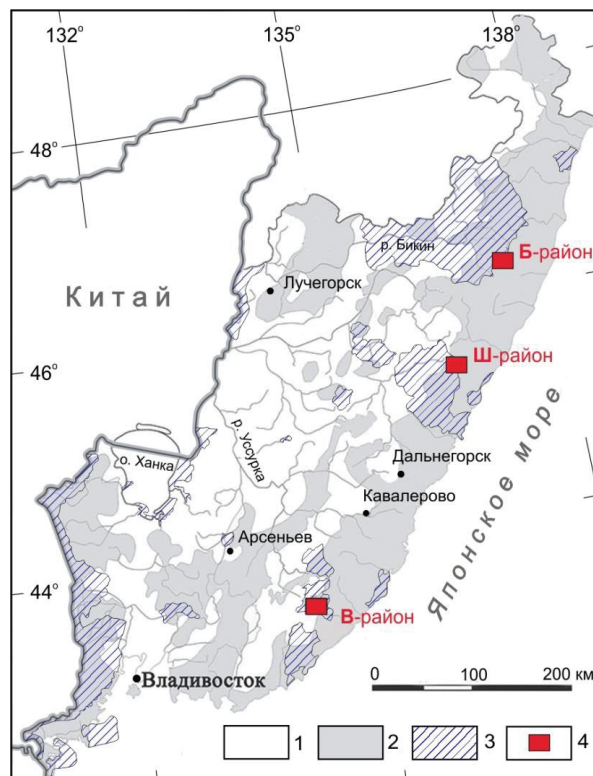


Рис. 1. Карта мест отбора проб в границах Восточно-Сихотэ-Алинского вулканического пояса и заповедных территорий: 1, 2 – породные комплексы: 1 – докайнозойские осадочные, 2 – разновозрастные вулканические; 3 – заповедные территории; 4 – полигоны пробоотбора почвы, растительного опада и растительности

Fig. 1. Map of sampling locations within the Eastern Sikhotealin volcanic belt and protected areas: 1, 2 – rock complexes: 1 – Pre-Cenozoic sedimentary, 2 – different-age volcanic; 3 – protected areas; 4 – sampling sites of soil, vegetation fallout and vegetation

После разложения минерализат исследовался на масс-спектрометре при условиях съемки, указанных в [30].

Сравнение данных по определению ртути в почвах В-района, полученных методами ААС и ИСП-МС, показывает хорошую сходимость результатов указанных методов спектрометрии, коэффициент корреляции 0,92 (рис. 2).

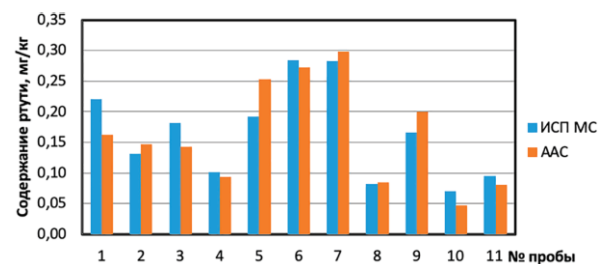


Рис. 2. Сравнение результатов определения ртути в почвах из В-района методами ААС и ИСП-МС

Fig. 2. Comparison of results of mercury determination in soils from the B-region by AAS and ICP-MS methods

### Результаты исследования

Атомно-абсорбционным методом в пробах почв, отобранных на трех обозначенных выше полигонах заповедных территорий западных отрогов Сихотэ-Алиня, выявлен широкий диапазон колебания содержания в них массового количества ртути – от 0,013 до 0,298 мг/кг (табл. 1).

Среднее ее содержание для почв районов **В**, **Ш** и **Б** составило, соответственно (мг/кг): 0,162 (размах 0,046–0,298); 0,098 (размах 0,015–0,264) и 0,117 (размах 0,021–0,28).

**Таблица 1.** Содержание ртути в почвах характеризующих районов Приморского края, мг/кг

**Table 1.** Mercury content in soils of the characterized areas of Primorsky Krai, mg/kg

Статистика Statistics	Район/Region		
	<b>В</b>	<b>Ш</b>	<b>Б</b>
N	11	22	18
Min	0,046	0,013	0,021
Max	0,298	0,264	0,280
X	0,162	0,098	0,117
M	0,147	0,084	0,100
S	0,085	0,069	0,079

*Примечание/Note:* N – количество проб (number of samples), M – медиана (median), Min – минимум (minimum), Max – максимум (maximum), X – среднее арифметическое (arithmetic mean), S – стандартное отклонение (standard deviation).

В порядке увеличения среднего содержания ртути в почве эти полигоны выстраиваются в следующий ряд (мг/кг): **Ш**-район (0,098), **Б**-район (0,117) и **В**-район (0,162).

Характер распределения содержания ртути в изученных пробах показан на рис. 3 (слева), где приведены коэффициенты концентрации ртути относительно среднего содержания ртути в кларке верхней части континентальной земной коры по А.П. Виноградову, которое составляет 0,083 мг/кг [31].

Из рис. 3 видно, что в характеризующих почвах при общем диапазоне варьирования содержания ртути 0,013–0,298 мг/кг (табл. 1) модальный интервал частных значений ее содержания не превышает значения 0,05–0,15 мг/кг.

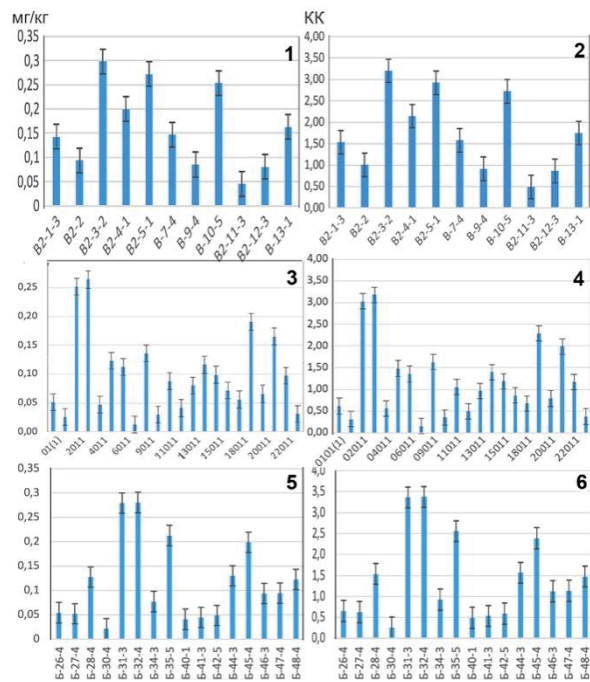
В табл. 2 приведены статистические данные о содержании ртути в растительном опаде на изученных заповедных территориях.

**Таблица 2.** Содержание ртути в растительном опаде характеризующих районов Приморского края, мг/кг

**Table 2.** Mercury content in vegetation fallout of the characterized areas of Primorsky Krai, mg/kg

Статистика Statistics	Район/Region		
	<b>В</b>	<b>Ш</b>	<b>Б</b>
N	7	15	16
Min	0,041	0,035	0,027
Max	0,053	0,136	0,161
X	0,045	0,076	0,092
M	0,045	0,069	0,085
S	0,004	0,033	0,046

*Примечание/Note:* N – количество проб (number of samples), M – медиана (median), Min – минимум (minimum), Max – максимум (maximum), X – среднее арифметическое (arithmetic mean), S – стандартное отклонение (standard deviation).



**Рис. 3.** Ртуть в почвах заповедных территорий Приморского края: валовые содержания (слева) и коэффициенты концентрации относительно средних содержаний в почвах мира (А.П. Виноградов, 0,083 м/кг): 1, 2 – **В**-район, 3, 4 – **Ш**-район, 5, 6 – **Б**-район

**Fig. 3.** Mercury in the soils of the protected territories of Primorsky Krai: gross contents (left) and concentration coefficients relative to the average contents in the upper part of the continental crust (A.P. Vinogradov, 0,083 m/kg): 1, 2 – **V**-district, 3, 4 – **Sh**-district, 5, 6 – **B**-district

Растительный опад данных полигонов имеет менее широкий, чем для почв, диапазон вариации содержания ртути – 0,027–0,161 мг/кг (табл. 2). По ртутоносности проб сравнительно однородна лишь выборка Ванчин-Угольного полигона, а размах значений содержания ртути в пробах остальных двух объектов соизмерим с приведенным выше общим диапазоном колебания (в мг/кг): **В**-район 0,041–0,053, **Ш**-район 0,035–0,136 и **Б**-район 0,027–0,161.

Средние содержания ртути в растительном опаде в целом варьируют от 0,045 до 0,092 мг/кг. Для исследуемых районов они выстраиваются в следующий ряд (по убыванию, мг/кг): **Б** (0,092) > **Ш** (0,076) > **В** (0,045).

Сравнение ртутоносности растительного опада показало, что в большинстве случаев для пар «опад–почва» в пробах районов **Ш** и **Б** содержание ртути в опаде, как правило, несколько меньше, чем в почве, а в **В**-районе эта разница существеннее (рис. 4).

Содержание ртути в растительности изучено только для **Ш**-района на примере лесных растений напочвенного покрова – лишайников, папоротников, осок и лабазника (табл. 3, рис. 5, А, Б). Средняя концентрация ртути в сухом веществе четырех видов недревесных растений этого фитоценоза в одном и том же месте широко колеблется от 0,016 до 0,135 мг/кг (табл. 3). При этом в конкретных пробах папоротников, лабазника и осок величина ртутоносности обычно ниже 0,05 мг/кг (рис. 5, А).

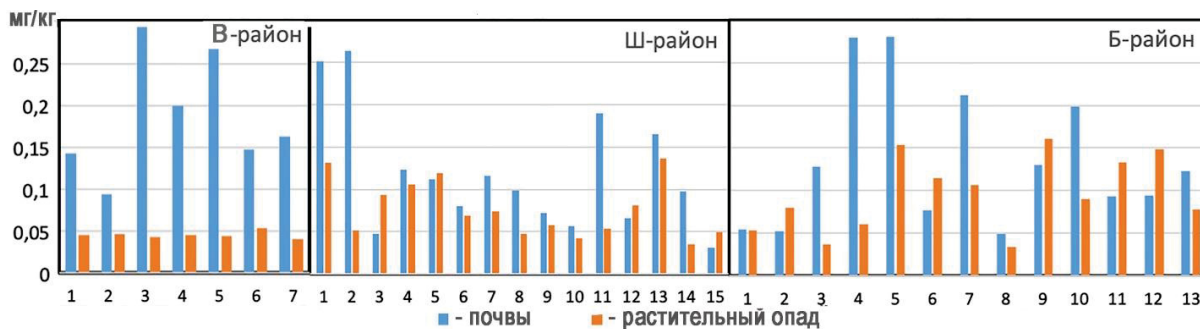


Рис. 4. Сравнение содержание ртути в почве и в растительном опаде в трех районах Приморского края

Fig. 4. Comparison of mercury content in soil and in vegetation fallout plant litter in three districts of Primorsky Krai

Таблица 3. Содержание ртути в почве, растительном опаде и растительности в пробах с территории Ш-района, мг/кг

Table 3. Mercury content in soil, vegetation fallout and vegetation in samples from the territory of the Sh-district, mg/kg

Статистика Statistics	Почва Soils	Растительный опад Vegetation fallout	Лишайники Lichen	Лабазник Dropwort	Папоротник Fern	Осока Sedge
N	22	15	5	18	23	26
Min	0,0128	0,035	0,088	0,0112	0,0144	0,0065
Max	0,2639	0,1361	0,2047	0,0361	0,0696	0,0298
$X \pm \delta m$	0,098±0,01	0,076±0,008	0,135±0,02	0,023±0,02	0,0383±0,003	0,016±0,001
S	0,069	0,033	0,051	0,0074	0,013	0,005

Примечание/Note: N – количество проб (number of samples), M – медиана (median), Min – минимум (minimum), Max – максимум (maximum), X – среднее арифметическое (arithmetic mean),  $\delta m$  – стандартная ошибка стандартного отклонения (standard error of standard deviation), S – стандартное отклонение (standard deviation).

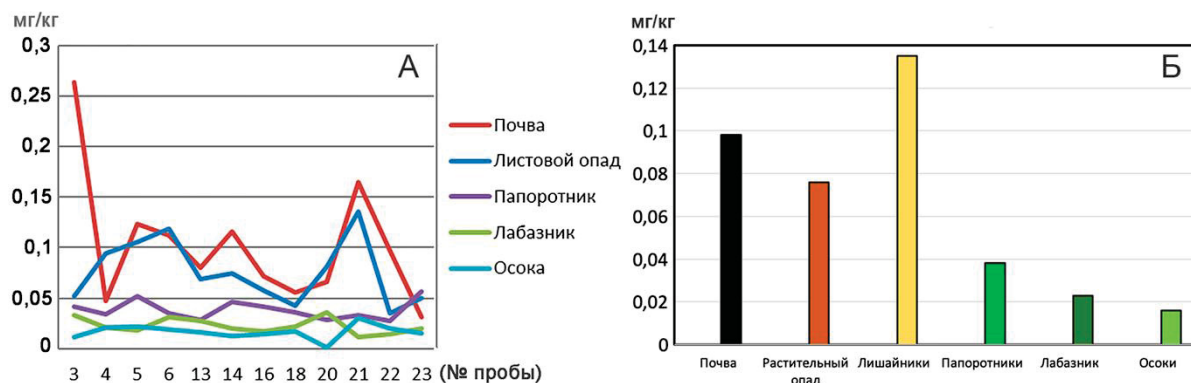


Рис. 5. Содержание ртути в пробах почв, растительного опада, лабазника, осок и папоротников Ш-района (А) и средние содержания ртути в пробах (Б)

Fig. 5. Mercury content in samples of soils, vegetation fallout, lichens, dropwort, sedges and ferns of the Sh-region (A) and average mercury content in samples (B)

Среднее содержание ртути в пробах названных видов растительности не контрастно уменьшается (рис. 5, Б) в ряду (мг/кг): лишайники (0,135) > папоротники (0,0383) > лабазник (0,023) > осоки (0,016).

#### Обсуждение

В глобальном плане размах средних содержаний ртути 0,013–0,046 мг/кг в почвах данных объектов меньше среднего содержания ртути 0,065 мг/кг [32] и 0,07 мг/кг [33] в верхней части континентальной коры.

Выявленный для сравниваемых районов модальный интервал 0,05–0,15 мг/кг (при диапазоне 0,013–0,298 мг/кг) не выходит за рамки колебания содержания ртути 0,04–0,23 мг/кг в сухой массе проб из поверхностного слоя лесных почв различных стран [34].

Указанный модальный интервал содержания ртути в почвах характеризуемой полосы протяженностью 400 км среднего и центрального Сихотэ-Алиня сопо-

ставим с диапазонами содержания ртути (0,09–0,147; 0,036–0,159 и 0,059–0,104 мг/кг [35, 36]) в почвах и буроземах смешанных хвойно-лиственных лесов на островах Русский и Шкота в Японском море. Административно это малоосвоенная окраина г. Владивостока длиной 16 км [19].

Средние содержания ртути в почвах из придорожных полигонов, удаленных от крупных промышленных центров в Амурской области, Хабаровского и Приморского краев, составляют соответственно: 0,72; 1,0 и 1,2 мг/кг [18]. При этом средний показатель для подобных почв Приморья с антропогенным заражением почти на порядок выше средних концентраций ртути в изученных нами лесных почвах горных районов.

Исследователи изотопии ртути для системы почва – материнская порода полагают, что литогенная ртуть не является возможным ее основным источником в минеральных почвах [32]. Поэтому закономер-

но, что средневзвешенное среднее содержание ртути 0,12 мг/кг в почвах западного фланга Восточно-Сихотэ-Алинского вулканогена (рис. 1) в половину меньше, чем средневзвешенное среднее содержание ртути 0,24 мг/кг в кайнозойских вулканитах Дальнего Востока в целом. Последнее значение (при размахе средних 0,01–1,10 мг/кг) установлено по 22-м выборкам ряда вулканоструктур Приморья и других регионов Востока России [37].

По литературным данным [3,38], повышенными содержаниями ртути от 0,15 до 0,47 мг/кг характеризуются наиболее богатые органическим веществом горизонты почв, в том числе торфяные горизонты с разной степенью разложения растительных остатков в пойменных лесных и торфяных почвах, а также бурые горнолесные почвы.

Торфяные отложения на территории Хабаровского и Камчатского краев, Амурской и Сахалинской областей содержат ртуть в концентрации 0,2–0,3 мг/кг, при этом торфа низинного и переходного типа содержат значительно больше этого элемента, чем торфа верхового типа [39].

Общеизвестно, что при формировании поверхностного почвенного горизонта происходит унаследование вещественных особенностей лесного опада и подстилки соответственно. Так, более высокие накопления ртути наблюдаются в почвах, что находятся под растительным опадом, продуцентом органики для их гумуса, хвойных пород деревьев (сосна, пихта и ель) и буков, чем в почвах под листовым опадом дуба, ольхи и березы [40]. Это подтверждает установленная нами значимая положительная корреляция ( $r_k=0,65$ ) между содержанием ртути в почве и в лесной подстилке **Ш**-района (Шандуйские озера).

В связи с этим установленное на протяжении 400 км последовательное возрастание (0,045→0,076→0,092 мг/кг) среднего содержания ртути в лесном опаде данных районов с юга на север, вероятнее всего, отражает тренд биоклиматического влияния на общую меридиональную и локальную высотную смену растительности. Соответственно можно ожидать и смены микроэлементного состава горнолесной подстилки в неодинаково расположенных над уровнем моря этих территорий: от низкогогорного **В**-района к умеренно среднегорному **Ш**-району и среднегорному **Б**-району. Поэтому для наиболее «ртутистого» последнего полигона очевидны сравнительно более высокие: солнечная активность, частота атмосферных осадков и доля в лесах хвойных растений. А значит, более высокие поступления в почву ртути от сухого или влажного (*очистка от газообразной и аэрозольной Hg-содержащих фаз*) осаждения вещества, принесенного воздушными потоками из региональных и локальных естественных и антропогенных источников эмиссии ртути.

Наблюдаемые в нашем случае более высокие содержания ртути в почве по сравнению с растительной подстилкой и тем более с самой растительностью – свидетельство многолетнего скапливания запасов этого металла в ее верхнем гумусово-аккумулятивном слое. Поступающие в этот горизонт почвы и в лесную подстилку различные формы ртути претерпевают

трансформацию в ходе биогеохимических процессов. Происходит ключевое связывание ее основной массы в различные металлокомплексы с органическими лигандами в органоминеральной массе. В качестве Hg-содержащих комплексных соединений в почвах удерживается до 70–80 % валовой ртути [41].

Кроме того, в почвах происходит связывание ртути при физической и химической ее сорбции неорганическим аутигенным минеральным веществом (каолинит, монтмориллонит и гидрослюда, оксиды Fe, Al и Si; и др. [42, 43].

Оценивая содержание ртути в тканях растительности, отметим, что в осоках оно аналогично мировому кларку ртути, а в остальных растениях этого фитоценоза в 2–10 раз выше кларка, равного 0,012 мг/кг (для сухой фитомассы) [44], в приросте растительности Мировой суши. Это можно трактовать избирательно-селективными способностями различных культур растительности к физиолого-биохимическому листовому и корневому фиксированию водорастворимых форм ртути. Известно, что лишайники и мхи показывают более выраженную способность биоаккумулировать ртуть комбинированно из почвы и атмосферы [45]. Но надо иметь в виду, что ртуть настолько сильно связывается почвенно-поглощающим комплексом, что даже при очень высоком содержании (50–100 мг/кг) она не накапливается в растениях в токсичных концентрациях [46].

Антропогенная региональная составляющая некоторого повышения содержания ртути в различных компонентах биосферы заповедных территорий Юга Дальнего Востока отчасти связана с непосредственной близостью стран азиатско-тихоокеанского региона.

Предполагается, что антропогенная доля ртути над северо-западной частью Японского моря контролируется в основном переносом воздушных масс из Китая. С его территории происходит самая значительная эмиссия ртути в мире [34, 47, 48].

Среди региональных природных причин возможного влияния с востока на общий фон ртути в Приморье отметим, прежде всего, такие геогенные источники эмиссии ее в газовой и аэрозольной формах, как многочисленные вулканы (даже потухшие), а также кипящие источники и паровые струи термальных источников и высокотемпературных гидротермальных систем Курило-Камчатской «огненной дуги».

В локальном плане воздушный приток ртути с запада, дополняющий ее суммарный вклад в неравномерное местное загрязнение почвы и растительности обозначенной территории, логично связать с природной газононостью тектонизированных зон угольных залежей Партизанского и Бикино-Уссурийского палеобассейнов, а также с антропогенными источниками ртути в виде продуктов преднамеренного сжигания углей, особенно на Приморской ГРЭС в г. Лучегорске.

Тем не менее, согласно медико-экологическим нормативам, содержание ртути в почвах с максимумом среднего 0,162 мг/кг, что зафиксировано нами в районе бассейна р. Ванчин-Угольной, практически не превышает значения минимально действующей концентрации (ISQG) 0,130 мг/кг, а тем более уровня ве-



роютного эффекта (PEL) 0,700 мг/кг [49]. Столь невысокие валовые содержания металла объясняются, в первую очередь, низким уровнем хозяйственного и промышленного освоения этих территорий, что потенциально минимизирует роль антропогенной составляющей в поставке ртути в природную среду и позволяет расценивать геоэкологическое состояние обозначенной территории по содержанию ртути в почве и растительной подстилке как благополучное.

#### Заключение

Таким образом, в работе представлены результаты по биогеохимическому изучению содержания ртути в разнотипных компонентах системы растение–подстилка–почва на трех полигонах заповедных горнолесных территорий юга Дальнего Востока.

Среднее содержание ртути для почв районов окрестностей ручья Ванчин-Угольный, Шандуйских озер и притока реки Бикин составило, соответственно (мг/кг): 0,162 (размах 0,046–0,298), 0,098 (размах 0,015–0,264) и 0,117 (размах 0,021–0,28). Эти значения несколько ниже содержаний ртути верхней части континентальной земной коры, а диапазон их содержаний не выходит за рамки колебаний содержания ртути в поверхностном слое лесных почв различных стран. Близкие значения получены ранее для почв буроземов на островах Русский и Шкота.

Наблюдается значимая положительная корреляция содержаний ртути в почве и лесной подстилке ( $r_k=0,65$ ) для территории Шандуйских озер. Таким

образом, в составе поверхностного почвенного горизонта отражаются вещественные особенности лесного опада и подстилки. В свете сказанного, различие почв трех рассматриваемых объектов Сихотэ-Алиня по их ртутьности объяснимо неодинаковым количеством в них органогенной составляющей и, что примечательно, ее составом, который отражает ландшафтные особенности местности.

Наблюдаемое уменьшение содержания ртути в разных видах растительности: лишайник (0,135 мг/кг) > папоротник (0,0383 мг/кг) > лабазник (0,023 мг/кг) > осока (0,016 мг/кг), связано со способностью различных видов растений к физиолого-биологическому фиксации водорастворимых форм ртути. Наибольшие содержания ртути в лишайниках и папоротниках связаны с тем, что они имеют более выраженную способность биоаккумулировать ртуть из почвы и атмосферы.

Полученные результаты характеризуют ртутьность в совокупности соседствующих почв, растительного опада и растительности трех приводораздельных участков хребта Сихотэ-Алинь, которые находятся в пределах охраняемых, потенциально геохимических «девственных» природных территорий Приморского края (Национальный парк «Зов тигра», национальный парк «Бикин», Сихотэ-Алиньский государственный биосферный заповедник).

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Янин Е.П. Ртуть, человек, окружающая среда: краткий очерк. – М.: Изд-во ИМГРЭ, 2005. – 29 с.
2. Poplar tree (*Populus balsamifera* L.) as indicator of mercury emission from a point source / D.V. Yusupov, E.E. Lyapina, E.M. Tursunaliyeva, N.A. Osipova, N.V. Baranovskaya // *Chemosphere*. – 2022. – V. 287. – P. 3.
3. Rózański S.L., Castejón J.M.P., Fernández G.G. Bioavailability and mobility of mercury in selected soils profiles // *Environmental Earth Sciences*. – 2016. – V. 75. – № 13 – P. 1–11.
4. Побилат А.Е., Волошин Е.И. Мониторинг микроэлементов в почвах (обзор) // *Микроэлементы в медицине* – 2021. – Т. 22. – № 4. – С. 14–26.
5. Gworek B., Dmuchowski W., Baczewska-Dąbrowska A.H. Mercury in the terrestrial environment: a review // *Environmental Sciences Europe*. – 2020. – V. 32. – № 1. – P. 1–19.
6. Pacyna J.M. Recent advances in mercury research // *The Science of the total environment*. – 2020. – V. 738. – P. 139955.
7. Mercury pollution in vegetables, grains and soils from areas surrounding coal-fired power plants / R. Li, H. Wu, J. Ding, W. Fu, L. Gan, Y. Li // *Scientific reports*. 2017. – V. 7. – № 1. – P. 1–9.
8. Status and environmental management of soil mercury pollution in China: a review / S. Liu, X. Wang, G. Guo, Z. Yan // *Journal of Environmental Management*. – 2021. – V. 277. – P. 111442.
9. Распределение ртути в компонентах окружающей среды горно-рудных районов Республики Алтай / Д.В. Юсупов, Ю.В. Робертус, Л.П. Рихванов, Р.В. Любимов, Е.Е. Ляпина, Е.М. Турсуналиева // *Оптика атмосферы и океана*. – 2018. – Т. 31. – № 1. – С. 73–78.
10. Ртуть в отходах горно-обогатительных предприятий Республики Хакасия / С.В. Азарова, Н.А. Осипова, Е.Е. Ляпина, Е.Г. Язиков // *Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты: Третий международный симпозиум*. – Иркутск: Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук, 2022. – С. 29–32.
11. Determination, speciation and distribution of mercury in soil in the surroundings of a former chlor-alkali plant: assessment of sequential extraction procedure and analytical technique / T. Frentiu, B. Pintican, S. Butaciu, M. Ironim, M. Ponta, M. Frentiu // *Chemistry Central Journal*. – 2013. – V. 7. – № 1. – P. 1–14.
12. Mercury in soils and plants in an abandoned cinnabar mining area (SW Spain) / A. García-Sánchez, A. Murciegob, E. Alvarez-Ayuso, I. Santa Regina, M.A. Rodríguez-González // *Journal of Hazardous Materials*. – 2009. – V. 168. – № 2–3. – P. 1319–1324.
13. Occurrence, distribution and risk assessment of mercury in multimedia of Soil-Dust-Plants in Shanghai, China / Y. Liu, S. Song, C. Bi, J. Zhao, D. Xi, Z. Su // *International journal of environmental research and public health*. – 2019. – V. 16. – № 17. – P. 3028.
14. Raj D., Maiti S.K. Sources, toxicity, and remediation of mercury: an essence review // *Environmental monitoring and assessment*. – 2019. – V. 191. – № 9. – P. 1–22.
15. Удоденко Ю.Г., Девятова Т.А., Комов В.Т. Ртуть в гидроморфных почвах Воронежского государственного природного биосферного заповедника // *Вестник Воронежского государственного университета*. Серия: Химия. Биология. Фармация. – 2011. – № 2. – С. 148–153.
16. Дзодзикова М.Э. Исследование загрязненности солями тяжелых металлов некоторых участков заповедных территорий в Северной Осетии // *Научные труды государственного природного заповедника «Присурский»*. – 2015. – Т. 30. – № 2. – С. 154–156.
17. Евстафьева Е.В., Богданова А.М. Комплексный анализ содержания ртути в подсистемах окружающей среды Крымского полуострова // *Теоретические основы химической технологии*. – 2021. – Т. 55. – № 4. – С. 452–461.
18. Изучение биогеохимического накопления микроэлементов в почвах и растениях Дальнего Востока / Н.И. Стеблевская, М.А. Медков, В.П. Молчанов, Н.В. Полякова, Л.И. Моисеенко, П.С. Зориков, Н.В. Батырбаева // *Вестник ДВО РАН*. – 2006. – № 2 (126). – С. 57–63.
19. Содержание ртути в почвенно-растительном покрове островов Русский и Шкота (залив Петра Великого, Приморский край) /

- К.С. Ганзей, Н.Ф. Пшеничникова, А.Г. Киселёва, С.Г. Юрченко, И.М. Родникова // Геохимия. – 2021. – Т. 66. – № 5. – С. 473–480.
20. Классификация и диагностика почв России / отв. ред. Г.В. Добровольский. – Смоленск: Ойкумена, 2004. – 342 с.
21. Ващенко И.М., Миронычев К.А., Коничев В.С. Основы почвоведения, земледелия и агрохимии. – М.: Прометей, 2013. – 174 с.
22. Почвы заповедников и национальных парков Российской Федерации. – М.: Фонд «Иносфера» – НИА-Природа, 2012. – 476 с.
23. Origin, baseline contents and vertical distribution of selected trace lithophile elements in soils from nature reserves, Russian Far East / Ya. Timofeeva, Yu. Kosheleva, V. Semal, M. Burdukovskii // Journal of Soils and Sediments. – 2018. – V. 18. – P. 968–982.
24. Паничев А.М., Барановская Н.В. Геофагия как способ выживания растительноядных животных в ландшафтах с аномальным содержанием редкоземельных элементов // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы VI Международной конференции. – Томск, 20–24 сентября 2021. – Томск: Томский политехнический университет, 2021. – Т. 2. – С. 59–63.
25. Язиков Е.Г., Шатилов А.Ю. Геоэкологический мониторинг. – Томск: ТПУ, 2003. – 287 с.
26. ГОСТ 17.4.4.02-2017. Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. – М.: Стандартинформ, 2018. – 14 с.
27. Методика измерений массовой доли общей ртути в пробах почв, грунтов, в том числе тепличных, глин и донных отложений атомно-абсорбционным методом с использованием анализатора ртути РА-915М. ПНД Ф 16.1.2:2.2.80-2013 (М 03-09-2013). URL: <https://www.lumex.ru/> (дата обращения: 24.06.2022).
28. Атомно-абсорбционное определение массовой концентрации ртути в биоматериалах животного и растительного происхождения (пищевых продуктах, кормах и др.). МУК 4.1.1472-03. URL: <https://base.garant.ru/12154259/> (дата обращения: 24.06.2022).
29. Определение элементного состава природных и питьевых вод методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. НСАМ № 480-Х (ред. 2016 г., взамен ред. 2006 г. с изм. № 1 от 13.04.2011 г.).
30. Микроволновая установка пробоподготовки МС-6. Методика подготовки проб. – СПб.: ООО НТФ «ВОЛЬТА», 2016. – 19 с.
31. Касимов Н.С., Власов Д.В. Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2015. – № 2. – С. 7–17.
32. Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – 383 с.
33. Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants. 4<sup>th</sup> ed. – USA: CRC Press, 2011. – 505 p.
34. Атомарная ртуть в приземном слое воздуха северо-западной части Японского моря осенью 2011 г. / В.В. Калинин, К.И. Аксентов, М.В. Иванов, Е.А. Лопатников // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. – 2012. – № 3. – С. 58–66.
35. Иванов М.В. Ртутые метрические исследования о. Русский залива Петра Великого Японского моря // Молодой ученый. – 2015. – № 22 (102). – С. 84–87.
36. Mercury isotope compositions across North American forests / W. Zheng, D. Obrist, D. Weis, B.A. Bergquist // Global Biogeochemical Cycles. – 2016. – V. 30. – № 10. – P. 1475–1492.
37. Основные результаты научно-исследовательских работ за 2020 г. – Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2021. – 146 с.
38. Айдинян Р.Х. Содержание и формы соединений серы в различных почвах СССР и ее значение в обмене веществ между почвой и растениями // Агрохимия. – 1964. – № 10. – С. 84–87.
39. Климин М.А., Ри Т.Д., Сиротский С.Е. Валовое содержание ртути в торфяниках Дальнего Востока России // Биогеохимия и гидроэкология наземных и водных экосистем. – Хабаровск: Изд-во ФГБУН Института водных и экологических проблем ДВО РАН, 2015. – С. 111–118.
40. Tree species affects the concentration of total mercury (Hg) in forest soils: evidence from a forest soil inventory in Poland / P. Gruba, J. Socha, M. Pietrzykowski, D. Pasichnyk // Science of The Total Environment. – 2019. – V. 647. – P. 141–148.
41. Распределение ртути по профилю почв равнинной части Северной Осетии / Н.Г. Зырин, Б.А. Звонарев, Л.К. Садовникова, Н.И. Воронова // Почвоведение. – 1981. – № 9. – С. 40–50.
42. Радченко А.И. Формы нахождения ртути в биосфере // Минералогический журнал. – 1999. – Т. 21. – № 5/6. – С. 48–56.
43. Mercury in the Tapajós River basin, Brazilian Amazon: a review / B.J.J. Nevado, R.C.R. Martin-Doimeadios, F.J.G. Bernardo, M. Jiménez Morenób, A.M. Herculanó, J.L.M. Nascimento, M.E. Crespo-López // Environment International. – 2010. – V. 36. – № 6. – P. 593–600.
44. Добровольский В.В. Основы биогеохимии. – М.: ИЦ «Академия». 2003. – 400 с.
45. Vegetation uptake of mercury and impacts on global cycling / J. Zhou, D. Obrist, A. Dastoor, M. Jiskra, A. Ryjkov // Nature Reviews Earth and Environment. – 2021. – № 2. – P. 269–284.
46. Dastoor A.P., Larocque Y. Global circulation of atmospheric mercury: a modeling study // Atmospheric Environment. – 2004. – № 38. – P. 147–161.
47. Fu X., Feng X., Sommar J. A review of studies on atmospheric mercury in China // Sci. Total Environ. – 2011. – № 421. – P. 73–81.
48. Travníkov O. Atmospheric transport of mercury // Environmental Chemistry and Toxicology of Mercury. – N.Y.: Wiley, 2012. – P. 331–365.
49. Canadian Council of Ministers of the Environment. 2001 Canadian sediment quality guidelines for the protection of aquatic life: summary tables. Updated // Canadian environmental quality guidelines. – Winnipeg: Canadian Council of Ministers of the Environment, 1999.

Поступила 01.07.2022 г.

Прошла рецензирование 25.09.2022 г.

#### Информация об авторах

**Барановская Н.В.**, доктор биологических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Иванов В.В.**, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории микро- и нано исследований, Дальневосточный геологический институт.

**Осипова Н.А.**, кандидат химических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Паничев А.М.**, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экологии и охраны животных, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН.

**Чекрыжов И.Ю.**, научный сотрудник лаборатории геохимии, Дальневосточный геологический институт.

**Доронина В.Д.**, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Хвощевская А.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент заведующая проблемной научно-исследовательской лабораторией гидрогеохимии Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 908.470.40+547

**MERCURY IN SOILS AND VEGETATION IN PROTECTED AREAS OF PRIMORSKY KRAI****Natalia V. Baranovskaya**<sup>1</sup>,  
nata@tpu.ru**Vladimir V. Ivanov**<sup>2</sup>,  
d159327@yandex.ru**Nina A. Osipova**<sup>1</sup>,  
osipova-nina@yandex.ru**Alexander M. Panichev**<sup>3</sup>,  
sikhote@mail.ru**Igor Yu. Chekryzhov**<sup>2</sup>,  
chekr2004@mail.ru**Valeriya D. Doronina**<sup>1</sup>,  
vddoronina@mail.ru**Albina A. Khvashchevskaya**<sup>1</sup>,  
unpc\_voda@mail.ru<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.<sup>2</sup> Far East Geological Institute,  
159, 100 let Vladivostoku avenue, Vladivostok, 690022, Russia.<sup>3</sup> Pacific Institute of Geography,  
7, Radio street, Vladivostok, 690041, Russia.

**The relevance.** The steady growth in the world of geochemical and ecological studies of mercury in local-regional-planetary plans is associated with the active circulation and omnipresence of its various forms in terrestrial and aquatic environments of biosphere, as well as with its supertoxicity and high biodestructivity. The relevance of this study determines the use of modern tools for highly sensitive analysis in the biogeochemical study of different types of components of the plant-bedding-soil system at three landfills of protected mining areas in the south of the Far East.

**The main aim** of the research is to establish mercury content in the vegetation and soils of Primorsky Krai.

**Objects:** soils, vegetation fallout, forest litter, plants of Primorsky Krai.

**Methods.** Content of the mass fraction of total mercury was determined in International Research Centre «Uranium geology» (TPU) without preliminary chemical decomposition of samples by flame-free atomic absorption spectrometry. Mercury analyzer RA-915+ with pyrolytic prefix RP-91C (Lumex LLC, St. Petersburg) was used.

**Results.** The obtained results characterize the mercury content of adjacent soils, vegetation fallout and vegetation in a combination of three naturally separate sections of the Sikhote-Alin ridge, which are located within the protected, potentially geochemical «primary» natural territories of the Primorsky Krai. The average mercury content for soils in the vicinity of the Vanchin-Ugolny stream, Shandui lakes and the tributary of the Bikin river was, respectively (mg/kg): 0,162 (range 0,046–0,298), 0,098 (range 0,015–0,264) and 0,117 (range 0,021–0,28). Differences in mercury content in the soils of the studied areas depend on the amount of organogenic component and landscape characteristics of the area. Mercury content in different types of vegetation was: lichen (0,135 mg/kg), fern (0,0383 mg/kg), labaznik (0,023 mg/kg), sedge (0,016 mg/kg), which is explained by the different ability of plants to physiologically and biologically fix water-soluble forms of mercury. Higher mercury content in soils compared to plant litter and vegetation itself is the evidence of long-term accumulation of reserves of this metal and binding of its main mass in organomineral form in soils.

**Key words:**

biogeochemistry of mercury, soils, vegetation fallout, plants, protected areas, Sikhote-Alin.

The research was financially supported by the RSF grants no. 20-64-47021 and 20-67-47005.

**REFERENCES**

1. Yanin E.P. *Rtut, chelovek, okruzhayushchaya sreda: kratkiy ocherk* [Mercury, man, environment: brief history]. Moscow, IMGRE Publ., 2005. 29 p.
2. Yusupov D.V., Lyapina E.E., Tursunaliyeva E.M., Osipova N.A., Baranovskaya N.V. Poplar tree (*Populus balsamifera* L.) as indicator of mercury emission from a point source. *Chemosphere*, 2022, vol. 287, pp. 3.
3. Rózański S.L., Castejón J.M.P., Fernández G.G. Bioavailability and mobility of mercury in selected soils profiles. *Environmental Earth Sciences*, 2016, vol. 75, no. 13, pp. 1–11.
4. Pobilat A.E., Voloshin E I. Monitoring of trace elements in soils (review). *Trace elements in medicine*, 2021, vol. 22, no. 4, pp. 14–26. In Rus.
5. Gworek B., Dmichowski W., Baczevska-Dąbrowska A.H. Mercury in the terrestrial environment: a review. *Environmental Sciences Europe*, 2020, vol. 32, no. 1, pp. 1–19.
6. Pacyna J.M. Recent advances in mercury research. *The Science of the total environment*, 2020, vol. 738, pp. 139955.
7. Li R., Wu H., Ding J., Fu W., Gan L., Li Y. Mercury pollution in vegetables, grains and soils from areas surrounding coal-fired power plants. *Scientific reports*, 2017, vol 7, no. 1, pp. 1–9.
8. Liu S. Wang X., Guo G., Yan Z. Status and environmental management of soil mercury pollution in China: a review. *Journal of Environmental Management*, 2021, vol. 277, pp. 111442.
9. Yusupov D.V., Robertus Yu.V., Rikhvanov L.P., Lyubimov R.V., Lyapina E.E., Tursunaliyeva E.M. Mercury distribution in the environment of mining areas in the Altai Republic (Russia). *Atmospheric Optics*, 2018, vol. 31, no. 1, pp. 73–78. In Rus.
10. Azarova S.V., Lyapina E.E., Osipova N.A., Yazykov E.G. Rtut v otkhodakh gorno-obogatitelnykh predpriyatiy Respubliki Khakassiya [Mercury in the waste of mining and processing enterprises of the Republic of Khakassia]. *Tretiy mezhdunarodny simpozium. Rtut v biosfere: ekologo-geokhimicheskie aspekty* [The third international symposium. Mercury in the biosphere: ecological and ge-

- ochemical aspects]. Irkutsk, Limnological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2022. pp. 29–32.
11. Frentiu T., Pintican B., Butaciu S., Ironim M., Ponta M., Frentiu M. Determination, speciation and distribution of mercury in soil in the surroundings of a former chlor-alkali plant: assessment of sequential extraction procedure and analytical technique. *Chemistry Central Journal*, 2013, vol. 7, no. 1, pp. 1–14.
  12. García-Sánchez A., Murciegob A., Álvarez-Ayuso E., Santa Regina I., Rodríguez-González M.A. Mercury in soils and plants in an abandoned cinnabar mining area (SW Spain). *Journal of Hazardous Materials*, 2009, vol. 168, no. 2–3, pp. 1319–1324.
  13. Liu Y., Song S., Bi C., Zhao J., Xi D., Su Z. Occurrence, distribution and risk assessment of mercury in multimedia of Soil-Dust-Plants in Shanghai, China. *International journal of environmental research and public health*, 2019, vol. 16, no. 17, pp. 3028.
  14. Raj D., Maiti S.K. Sources, toxicity, and remediation of mercury: an essence review. *Environmental monitoring and assessment*, 2019, vol. 191, no. 9, pp. 1–22.
  15. Udodenko Yu.G. Mercury in hydromorphic soils of the Voronezh State Natural Biosphere Reserve. *Bulletin of the Voronezh State University. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy*, 2011, no. 2, pp. 148–153. In Rus.
  16. Dzodzokova M.E. The study of contamination by salts of heavy metals of some part of protected areas in North Ossetia. *Scientific works of the state nature reserve «Prisursky»*, 2015, vol. 30, no. 2, pp. 154–157. In Rus
  17. Evstafieva E.V., Bogdanova A.M. Kompleksny analiz sodержaniya rtuti v podsystemakh okruzhayushchey sredy Krymskogo poluostrova [Comprehensive analysis of mercury content in environmental subsystems of the Crimean Peninsula]. *Theoretical foundations of chemical technology*, 2021, vol. 55, no. 4, pp. 452–461.
  18. Steblevskaya N.I., Medkov M.A., Molchanov V.P., Polyakova N.V., Moiseenko L.I. Study of biogeochemical accumulation of trace elements in soils and plants of the Far East. *Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2006, vol. 2 (126), pp. 57–63. In Rus.
  19. Ganzei K.S., Pshenichnikova N.F., Kiseleva A.G., Yurchenko S.G., Rodnikova I.M. Soderzhanie rtuti v pochvenno-rastitelnom pokrove ostrovov Russkii i Shkota [Mercury content in the soil and vegetation cover of the Russian and Shkota Islands (Peter the Great Bay, Primorsky Krai)]. *Geokhimiya*, 2021, vol. 66, no. 5, pp. 473–480.
  20. Dobrovolsky G.V. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* [Classification and diagnostics of soils in Russia]. Smolensk, Oikumena Pbl., 2004. 342 p.
  21. Vaschenko I.M., Mironichev K.A., Konichev V.C. *Osnovy pochvovedeniya, zemledeliya i agrokhimii* [Fundamentals of soil science, agriculture and agrochemistry]. Moscow, Prometheus Publ., 2013. 174 p.
  22. Pochvy zapovednikov i natsionalnykh parkov Rossiyskoy Federatsii [Soils of nature reserves and national parks of the Russian Federation]. Moscow, Fond «Inocfera»-NIA- Priroda Publ., 2012. 476 p.
  23. Timofeeva Ya.O., Kosheleva Yu., Semal V., Burdukovskii M. Origin, baseline contents and vertical distribution of selected trace lithophile elements in soils from nature reserves. *Russian Far East. Journal of Soils and Sediments*, 2018, vol. 18, pp. 968–982. In Rus.
  24. Panichev A.M., Baranovskaya N.V. Geofagiya kak sposob vyzhivzniya rastitelnoyadnykh zhivotnykh v landshaftakh s anomalnym sodержaniem redkozemelnykh elementov [Geophagy as a way of survival of herbivorous animals in landscapes with abnormal content of rare earth elements]. *Radioaktivnost i radioaktivnye elementy v srede obitaniya cheloveka. Materialy VI Mezhdunarodnoy konferentsii* [Radioactivity and radioactive elements in the human environment. Proceedings of the VI International Conference]. Tomsk, 20–24 September 2021. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2021. Vol. 2, pp. 59–63.
  25. Yazikov E.G., Shatilov A.Yu. *Geoekologicheskii monitoring* [Geoeological monitoring]. Tomsk, TPU Publ., 2003. 287 p.
  26. GOST 17.4.4.02-2017. *Mezhhgosudarstvenny standart. Okhrana prirody. Pochvy. Metody otbora i podgotovki prob dlya khimicheskogo, bakteriologicheskogo, gelmintologicheskogo analiza* [State standard 17.4.4.02-2017. Interstate standard. Nature conservation. Soils. Methods of sampling and preparation of samples for chemical, bacteriological, helminthological analysis]. Moscow, StandardInform Publ., 2018. 14 p.
  27. *Metodika izmereniy massovoy doli obshchey rtuti v probakh pochv, gruntov, v tom chisle teplichnykh, glin i donnykh otlozheniy atomno-absorbtsionnym metodom s ispolzovaniem analizatora rtuti RA-915M. PND F 16.1.2:2.2.80-2013 (M 03-09-2013)* [The method of measuring the mass fraction of total mercury in samples of soils, soils, including greenhouses, clays and bottom sediments by atomic absorption method using the mercury analyzer RA-915M. PND F 16.1.2:2.2.80-2013 (M 03-09-2013)]. Available at: <https://www.lumex.ru/> (accessed: 24 June 2022).
  28. *Atomno-absorbtsionnoe opredelenie massovoy kontsentratsii rtuti v biomaterialakh zhivotnogo i rastitel'nogo proiskhozhdeniya (pishchevnykh produktakh, kormakh i dr. MUK 4.1.1472-03)* [Atomic absorption determination of mercury mass concentration in biomaterials of animal and vegetable origin (food waste, feed etc.). MUK 4.1.1472-03]. Available at: <https://www.lumex.ru/> (accessed: 24 June 2022).
  29. *Opredelenie elementnogo sostava prirodnykh i pitevykh vod metodom mass-spektrometrii s induktivno-svyazannoy plazmoy. NSAM №480-X* [Determination of the elemental composition of natural and drinking waters by inductively coupled plasma mass spectrometry. NSAM № 480-X].
  30. *Mikrovolnovaya ustanovka probopodgotovki MS-6. Metodika podgotovki prob* [Microwave sample preparation unit MS-6. Methods of sample preparation]. St-Petersburg, OOO NTF «VOLTA» Publ., 2016. 19 p.
  31. Kasimov N.S., Vlasov D.V. Clarks of chemical elements as reference standards in ecogeochemistry. *Bulletin of the Moscow University. Series 5. Geography*, 2015, vol. 2, pp. 7–17.
  32. Grigorev N.A. *Raspredelenie khimicheskikh elementov v verkhney chasti kontinentalnoy kory* [Distribution of chemical elements in the upper part of the continental crust]. Ekaterinburg, RAN Publ., 2009. 383 p.
  33. Kabata-Pendias A. *Trace elements in soils and plants*. 4<sup>th</sup> ed. USA, CRC Press, 2011. 505 p.
  34. Kalinchuk V.V., Aksentov K.I., Ivanov M.V., Lopatnikov E.A. Atomic mercury in a surface layer of air in the northwestern part of the Sea of Japan in autumn 2011. *Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2012, vol. 3, pp. 58–66. In Rus.
  35. Ivanov M.V. *Rtutometricheskie issledovaniya o. Russkiy zaliva Petra Velikogo Yaponskogo moray* [Mercury studies of Russky Island of Peter the Great Bay of the Sea of Japan]. *XXII Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya (shkola) po morskoy geologii. Geologiya morey i okeanov* [XXII International scientific conference (school) on marine geology. Geology of the seas and oceans]. Moscow, Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences P.P. Shirshov Publ., 2017. pp. 307–311.
  36. Zheng W., Obrist D., Weis D., Bergquist B.A. Mercury isotope compositions across North American forests. *Global Biogeochemical Cycles*, 2016, vol. 30, no. 10, pp. 14751492.
  37. *Osnovnye rezultaty nauchno-issledovatel'skikh rabot za 2020 g.* [The main results of research work for 2020]. Vladivostok, TOI FEB RAS Publ., 2021. 146 p.
  38. Aydinyan R.H. Soderzhanie i formy soedineniy sery v razlichnykh pochvakh SSSR i ee znachenie v obmene veshchestv mezhdru pochvoy i rasteniyami [The content and forms of sulfur compounds in various soils of the USSR and its significance in the metabolism between soil and plants]. *Agrokhimiya*, 1964, no. 10, pp. 84–87.
  39. Klimin M.A., Ri T.D., Sirotskiy S.E. Valovoe sodержanie rtuti v torfyanikakh Dalnego Vostoka Rossii [Gross mercury content in the peat bogs of the Russian Far East]. *Biogeoekhimiya i gidroekologiya nazemnykh i vodnykh ekosistem* [Biogeochemistry and hydrogeology of terrestrial and water ecosystems]. Khabarovsk, Institute of water and ecological problems FEB RAS Publ., 2015. pp. 111–118.
  40. Gruba P., Socha J., Pietrzykowski M., Pasichnyk D. Tree species affects the concentration of total mercury (Hg) in forest soils: evidence from a forest soil inventory in Poland. *Science of The Total Environment*, 2019, vol. 647, pp. 141–148.
  41. Zyrin N.G., Zvonarev B.A., Sadovnikova L.K., Voronova N.I. *Raspredelenie rtuti po profilyu pochv ravninnoy chasti Severnoy*

- Osetii [Distribution of mercury in the soil profile of the lowland part of North Ossetia]. *Pochvovedenie*, 1981, vol. 9, pp. 40–50.
42. Radchenko A.I. Formy nakhozhdeniya rtuti v biosfere [Forms of mercury in the biosphere]. *Mineralogicheskiy zhurnal*, 1999, vol. 21, no. 5–6, pp. 48–56.
43. Nevado B.J. J., Martín-Doimeadios R.C.R., Bernardo F.J.G. Mercury in the Tapajós River basin, Brazilian Amazon: a review. *Environment International*, 2010, vol. 36, no. 6 pp. 593–600.
44. Dobrovolsky V.V. *Osnovy biogeokhimii* [Fundamentals of Biogeochemistry]. Moscow, Akademiya Publ. house, 2003. 400 p.
45. Zhou J., Obrist D., Dastoor A., Jiskra M., Ryjkov A. Vegetation uptake of mercury and impacts on global cycling. *Nature Reviews Earth and Environment*, 2021, no. 2, pp. 269–284.
46. Dastoor A.P., Larocque Y. Global circulation of atmospheric mercury: a modeling study. *Atmospheric Environment*, 2004, no. 38, pp. 147–161.
47. Fu X., Feng X., Sommar J. A review of studies on atmospheric mercury in China. *Sci. Total Environ.*, 2011, no. 42, pp. 73–81.
48. Travnikov O. Atmospheric transport of mercury. *Environmental Chemistry and Toxicology of Mercury*. N.Y., Wiley, 2012. pp. 331–365.
49. Canadian Council of Ministers of the Environment. 2001 Canadian sediment quality guidelines for the protection of aquatic life: summary tables. Updated. *Canadian environmental quality guidelines*. Winnipeg, Canadian Council of Ministers of the Environment, 1999.

Received: 1 July 2022.  
Reviewed 25 September 2022.

#### Information about the authors

**Natalia V. Baranovskaya**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Vladimir V. Ivanov**, Cand Sc., head of Laboratory of Micro- and Nanoscale Researches, Far East Geological Institute FEB RAS.

**Nina A. Osipova**, Cand. Sc, associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Alexander M. Panichev**, Dr. Sc., leading researcher, Pacific Institute of Geography FEB RAS.

**Igor Yu. Chekryzhov**, researcher, Far East Geological Institute FEB RAS.

**Valeriya D. Doronina**, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Albina A. Khvashchevskaya**, Cand. Sc., head of the scientific laboratory, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 66.01

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕАКЦИЙ ПОЛУЧЕНИЯ НИЗШИХ ОЛЕФИНОВ В ТЕХНОЛОГИИ FCC НА ОСНОВЕ УЧЕТА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ГРУПП В МОЛЕКУЛАХ УГЛЕВОДОРОДОВ И КВАНТОВОЙ ХИМИИ

Ивашкина Елена Николаевна<sup>1</sup>,  
ivashkinaen@tpu.ru

Форотан Саба Казвини<sup>1</sup>,  
Foroutan.Saba@hotmail.com

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность** работы обусловлена ростом потребления низших олефинов как ценного нефтехимического сырья и развитием технологий их производства, таких как каталитический крекинг. Наиболее востребованными продуктами нефтехимии являются низшие олефины, такие как пропилен, бутилен. Ежегодно 400 млн т олефинов производятся различными способами. Около 60 % мирового нефтяного сырья используется в процессе каталитического крекинга, с применением этой технологии производится 59 % всех олефинов. В соответствии с анализом современного состояния нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности для увеличения выхода олефинов необходим глубокий анализ процесса и реакций каталитического крекинга. Установление термодинамических закономерностей является первым этапом анализа химического процесса.

**Цель:** установление влияния структуры изомеров углеводородов на термодинамическую вероятность реакций с образованием непредельных газообразных продуктов крекинга.

**Методы:** математические расчеты на основе метода функциональных групп (Constantinou–Gani и Joback) и методов квантовой химии с целью определения термодинамических параметров, таких как энтальпия и свободная энергия Гиббса реакций каталитического крекинга при различной температуре; оценка эффективности методов на основе сравнения результатов математических расчетов с литературными данными.

**Результаты.** Установлено, что влияние структуры образующихся изомеров на термодинамические закономерности реакций гораздо более значительно, чем изменение температуры каталитического крекинга. В результате термодинамического анализа сделаны выводы о том, что для получения газообразных продуктов наиболее предпочтителен крекинг: 1) 2,2,3-триметилбутана для получения пропилена; 2) 2-метилгексана, 3-метилгексана и 3-этилпентана для получения пропана и изобутилена; 3) октен-1 для получения бутилена. Вышеперечисленные реакции образования газообразных продуктов получаются при вторичном крекинге углеводородов бензиновой фракции. Таким образом, достичь максимальной селективности процесса по олефинам можно, подбирая условия проведения процесса (температура, время контакта). Показано, что метод функциональных групп на основе Constantinou–Gani достаточно точно описывает термодинамические закономерности реакций крекинга, но вместе с тем не рассматривает превращения неароматических соединений и влияние вариаций цис- и транс-конфигураций в структуре молекулы. Таким образом, в этих случаях рекомендуется использовать методы квантовой химии.

### Ключевые слова:

каталитический крекинг, термодинамика, изомеры, углеводороды, функциональные группы, квантовая химия.

### Введение

Рост численности населения на планете прогнозируется с 7,7 в 2019 г. до 9,2 млн человек к 2040 г. Мировое городское население составляет 56 % в 2019 г. и, как ожидается, вырастет до 64 % в 2040 г. [1]. В связи с этим современному обществу необходим источник для поддержания качества жизни и экономики. Нефть и газ по-прежнему остаются надежными источниками энергии. Современная нефтегазовая отрасль обладает зрелыми технологиями и развитой инфраструктурой. Хотя пандемия COVID-19 повлияла на спрос на нефть в 2019 г., все же он устойчиво растет. Потребление тока составляет 100 мб/сутки и будет увеличиваться со скоростью 1 мб/сутки ежегодно. Спрос на углеводородное сырье для нефтехимии увеличивается со скоростью 4 мб/сутки. На сегодняшний день нефтехимия составляет 15 % спроса на нефть и будет равна 34 и 50 % соответственно в 2040 и 2050 гг. [2, 3].

Наиболее востребованными продуктами нефтехимии являются низшие олефины, такие как этилен, пропилен, бутилен. Ежегодно 400 млн т олефинов

производятся различными способами, такими как каталитический крекинг, паровой крекинг и дегидрирование. Около 60 % мирового нефтяного сырья используется в процессе каталитического крекинга, с применением этой технологии производится 59 % всех олефинов [4–6]. Кроме того, производство светлых нефтепродуктов с выходом до 70 % является одной из важных задач нефтяной отрасли в Российской Федерации до 2035 г. [7]. Производство пропилена и бутилена характеризуется одним из самых высоких темпов роста в год, около 4–5 % [8, 9].

Для увеличения выхода олефинов необходим глубокий анализ процесса и реакций каталитического крекинга. Установление термодинамических закономерностей является первым этапом анализа процесса. Теоретические модели для описания и расчета молекулярных структур, их оптимальных конфигураций и энергий связей и, следовательно, термодинамических свойств подразделяются на две основные группы: 1) теоретические модели молекулярной механики, основанные на оценке влияния функциональных

групп в структуре молекулы на термодинамические и термохимические свойства компонента и реакции и 2) квантово-химические теоретические модели, основанные на фундаментальных законах квантовой механики [10].

В классической истории науки разные ученые предлагали квантовые уравнения для расчета свойств молекул. K.S. Pitzer предложил  $(H^0 - H_0^0)/T$  и  $-(F^0 - H_0^0)/T$  функции для газообразных парафинов, в которых рассматривались постоянные для всех молекул коэффициенты для связи С-С растяжения, изгиба и внутреннего вращения соответственно, а также коэффициент вибрации связи С-Н. В качестве функций рассматривались параметры группового взаимодействия и симметрии молекулы типа цис и транс. Основой работы Pitzer являются статистико-механические расчеты [11, 12]. J.L. Franklin разработал функции Pitzer для разветвленных парафинов. Научная работа Franklin основана на установлении влияния атомных групп на свойства молекул. Им показано, что суммарное влияние различных групп в молекуле предсказывает свойство молекулы довольно точно, и результаты расчетов свойств углеводородов показали высокую точность с погрешностью 1 ккал/моль [13]. Метод Franklin позволил получить результаты при конкретных температурах, таких как 0, 298, 400, 500, 600, 800, 1000, 1200 и 1500 К. По этой причине D.W. van Krevelen рассматривал вклад атомных групп как линейную функцию от температуры. Научная работа была направлена на изучение энтальпии образования неуглеводородных атомных групп, таких как –ОН, –СН=О, –С=О,  $\text{CH}_2=\text{C}=\text{O}$ , –О–, –NH<sub>2</sub>, –NO<sub>2</sub>, –SH, –S–, SO<sub>2</sub>, –F, Cl, –B<sub>2</sub> и –I. Результаты научной работы van Krevelen показали среднюю погрешность  $\pm 0,6$  ккал/моль [14].

В работе D.R. Stull для первых 92 элементов табулированы экспериментальные термодинамические параметры для диапазона температур от 298 до 3000 К. Это такие параметры, как  $C_p^0$ ,  $H_T^0 - H_{298,15}^0$ ,  $S_T^0$ ,  $-(F^0 - H_{298,15}^0)/T$ ,  $\Delta H_f^0$ ,  $\Delta F_f^0$ , а также даны вспомогательные параметры, такие как температура и теплота фазового перехода, температура плавления и испарения и давление пара [15]. В дальнейшем на основе экспериментальных данных Stull в научной работе S.W. Benson были предложены различные подходы к расчету термодинамических функций. В работе рассматривалось приближение первого и второго порядка, показывающее аддитивность свойств связи и аддитивность свойств атомов в молекуле соответственно. В работе Benson рассматривались 250 функциональных групп и 25 поправок для эффектов кольца и соседней группы. С одной стороны, достигнутые автором функции сложны, и рассмотрение функциональных групп затруднено, с другой стороны, функции метода Benson показали наиболее точные результаты [16]. В полученных функциях при исследовании van Krevelen [14] представлены разные коэффициенты в двух диапазонах температур: 300–600 и 600–1500 К для каждой функциональной группы. В связи с этим в работе K.K. Verma разработаны линейные температурные зависимости функции для новых температурных диа-

пазонов, а именно 300–750, 750–1500 или 300–850, 850–1500 К. Погрешность результатов теплоты образования для углеводородных компонентов составляет 0,35 ккал/г-моль и неуглеводородных компонентов 0,26 ккал/г-моль [17]. Параллельно D.N. Rihani представил функции теплоемкости органических компонентов из функциональных групповых вкладов. В отличие от предыдущих линейных функций, в работе Rihani была предложена функция, зависящая от температуры в виде  $a+bt+ct^2+dt^3$ . Средняя погрешность результатов при 300 К составляет 3 %, а в диапазоне 400–1500 К – менее 2 % [18].

Хотя в работах авторов [14, 17, 18] были предложены полиномиальные уравнения, в исследованиях T.P. Thinh получена экспоненциальная функция вида  $A + B_1 e^{\frac{-c_1}{T^{n_1}}} - B_2 e^{\frac{-c_2}{T^{n_2}}}$  для получения теплоемкости углеводородов с помощью техники группового вклада [19]. В работе K.G. Joback предложены полиномиальные функции термодинамических свойств, такие как  $\Delta H_{f,298,15}^0$ ,  $\Delta G_{f,298,15}^0$ ,  $C_p^0$ ,  $\Delta H_{vb}$ ,  $T_b$ ,  $T_f$ ,  $T_c$ ,  $P_c$ ,  $V_c$ , для 42 функциональных групп. Представляется важным метод Joback, который позволяет рассчитывать многие термодинамические параметры в постоянном диапазоне температур. Кроме того, 42 функциональные группы охватывают многие углеводородные компоненты [20]. В работе L. Constantinou, R. Gani получены полиномиальные функции термодинамических свойств, учитывающие структуру молекул. В методе Constantinou–Gani молекулярная структура представляет собой набор двух типов групп: простые функциональные группы, то есть группы первого порядка, и функциональные группы, составляющими которых являются группы первого порядка, то есть группы второго порядка. Группы второго порядка добавляют больше информации к структуре, по этой причине в методе Constantinou–Gani возможны расчеты термодинамических параметров изомеров. Кроме того, представляется важным, что метод Constantinou–Gani рассматривает разные термодинамические параметры, такие как  $\Delta H_{f,298,15}^0$ ,  $\Delta G_{f,298,15}^0$ ,  $C_p^0$ ,  $\Delta H_v$ ,  $T_b$ ,  $T_m$ ,  $T_c$ ,  $P_c$ ,  $V_c$  [21]. В работе Coniglio были рассмотрены теплофизические свойства тяжелых углеводородов на основе функций Peng–Robinson. В работе Coniglio были рассмотрены несколько функциональных групп, таких как CH<sub>3</sub>, CH<sub>2</sub>, CH, C, и ароматических колец [22]. После того как был учтен вклад функциональных групп Constantinou–Gani [21], Coniglio разработал расчетный метод для значительного количества веществ. Однако метод не был исчерпывающим для многих углеводородов [23].

Квантовая химическая механика возникла из уравнения Schrödinger, названного в честь Erwin Schrödinger, который сформулировал уравнение в 1925 г. и опубликовал в 1926 г., в результате чего ему была присуждена Нобелевская премия по физике в 1933 г. [24]. Уравнение Schrödinger – это линейное дифференциальное уравнение в частных производных, или, точнее, дифференциальное уравнение многих тел, управляющее волновой функцией квантово-механической системы [25]. Это уравнение описывает

молекулы с точки зрения взаимодействия между ядрами и электронами. Уравнения (1), (2), соответственно, показывают зависящее от времени и независимое от времени уравнение Schrödinger в целом. Это зависит от физического состояния системы, например, система развивается со временем или нет.

$$i\hbar \frac{d}{dt} |\Psi(t)\rangle = \hat{H} |\Psi(t)\rangle. \quad (1)$$

Здесь  $t$  – время;  $|\Psi(t)\rangle$  – вектор состояния квантовой системы;  $\hat{H}$  – оператор Hamiltonian (наблюдаемый).

$$\hat{H} |\Psi\rangle = E |\Psi\rangle. \quad (2)$$

Здесь  $E$  – энергия системы, которая применима, когда Hamiltonian не зависит от времени, даже в этом случае полная волновая функция зависит от времени [26]. Оператор Hamiltonian соответствует полной энергии системы, а волновая функция  $\Psi(x,t)$  включает в себя всю измеримую информацию о системе. Для системы с  $N$  электроном и  $M$  ядрами уравнение (3) показывает нерелятивистский молекулярный оператор Hamiltonian.

$$\hat{H} = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{-\nabla_i^2}{2} + \sum_{A=1}^M \frac{-Z_A}{|\vec{r}_i - \vec{R}_A|} \right] + \sum_{i>j}^N \frac{1}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|} + \sum_{A=1}^M \frac{-\nabla_A^2}{2m_A} + \sum_{A>B}^M \frac{Z_A Z_B}{|\vec{R}_A - \vec{R}_B|}. \quad (3)$$

Здесь  $|\vec{r}_i - \vec{r}_j|$  – электрон-электронное взаимодействие; четвертый член – кинетическая энергия ядер, а последний член – отталкивание между ядрами, поэтому остальные члены показывают электронное движение уравнения Schrödinger, описывающего движение  $N$  электронов в поле  $M$  точечных зарядов (электронное и ядерное движение разделены). Решение этого уравнения выражается в терминах движения электронов, молекулярной структуры и энергии, а также информации о связях.

Одной из стратегий решения этого сложного уравнения является разделение переменных. В некоторых случаях этого разделения достаточно, но во многих случаях разделение не является точным и должно рассматриваться как приближение, используемое для облегчения численной процедуры. Приближение Born–Oppenheimer, широко известно как теория электронной структуры, в которой электронное и ядерное движения разделены. Так как ядра намного тяжелее электронов, во время движения электронов ядра можно считать стационарными, зафиксированными в определенном положении в пространстве. Кроме того, предполагается, что электроны мгновенно реагируют на изменения в ядерной конфигурации. В рамках этого приближения можно пренебречь членом кинетической энергии, отталкивание между ядрами может быть постоянным, поэтому можно решить другие члены, рассматриваемые как электронный Hamiltonian. В электронном Hamiltonian можно решить член электрон-электронного взаимодействия, но электронное уравнение Schrödinger нельзя решить точно, поэтому для решения уравнения можно сле-

датель дополнительное приближение [27]. Были предложены различные приближения с точки зрения надежности, экономических и временных затрат, такие как орбитальное приближение, метод волновой функции и теория функционала плотности (DFT).

#### Орбитальное приближение

Волновая функция квантовой системы  $\Psi(x,t)$  содержит информацию для определения всех свойств системы. Эта волновая функция очень сложна, и для ее определения для многоэлектронных атомов и молекул обязательно использование приближения. Одно из приближений называется орбитальным приближением, в котором говорится, что каждый электрон занимает одноэлектронную функцию, обозначаемую как орбиталь. Поэтому волновая функция зависит от  $3N$  координат электронов (в  $N$ -электронной системе). Более того, волновая функция должна быть антисимметричной из-за обмена координатами двух электронов.

#### Метод волновой функции

Важнейшим представителем этого семейства является метод Hartree–Fock. Орбитальное приближение используется для построения волновой функции и набора несвязанных одночастичных уравнений, поэтому получается уравнение Hartree–Fock. Этот метод предполагает, что каждый электрон движется независимо в поле, создаваемом остальными электронами и ядрами. Метод HF обеспечивает очень хорошее описание равновесной молекулярной геометрии и конформации, за исключением случаев, когда речь идет о переходных металлах. Но, с другой стороны, этот метод очень плохо действует для предсказания термодинамики реакций расщепления и образования связи. Может быть, это из-за неполного описания корреляции электронов, того, как движение одного электрона влияет на движение всех других электронов. Для решения этой проблемы было разработано несколько квантово-химических методов, таких как метод post Hartree–Fock [28]. Наиболее важными моделями этого семейства являются конфигурационное взаимодействие (Configuration Interaction – CI) [29], теория возмущений Moller–Plesset (MP) [30] и подходы связанных кластеров (Coupled-Cluster Approach – CC) [31]. Эти методы улучшили гибкость метода HF за счет смешивания волновых функций основного и возбужденного состояний. Кроме того, эти методы являются более дорогостоящими, но обеспечивают превосходное описание равновесной геометрии и конформационных и термодинамических свойств при разрыве и образовании связей.

#### Теория функционала плотности (Density Functional Theory – DFT)

по сравнению с методом волновой функции DFT имеет другую концептуальную методологию. Эта теория основана на электронной плотности,  $\rho$ , в отличие от многоэлектронной волновой функции  $\Psi(x,t)$ . Этот фундаментальный принцип делает DFT более экономичным, поскольку вероятность распределения электронов в пространстве зависит от трех координат,



а не от  $3N$  пространственных координат в теории волновой функции. О первом опыте применения DFT сообщалось в работах Р. Hohenberg [32] и Lu J. Sham [33]. В истории квантовой механики Т. Fermi в первую очередь предложил работу по DFT, но ей уделялось мало внимания [33]. Принцип DFT в работе Kohn-Sham был формализован таким образом, что энергия основного состояния представляет собой сумму кинетической энергии ( $E_T$ ), энергии электронно-ядерного взаимодействия ( $E_V$ ), энергии Коломба ( $E_J$ ) и энергии обменной корреляции ( $E_{xc}$ ), показанных в уравнении (4)

$$E = E_T + E_V + E_J + E_{xc}. \quad (4)$$

Единственным неизвестным термином является обменно-корреляционный функционал  $E_{xc}$ , который включает эффекты электрон-электронного взаимодействия. Этот член обычно подбирается эмпирически с использованием экспериментальных данных [32]. Зависимая от времени функция DFT (TD-DFT), разработанная на основе анализа линейного отклика плотности основного состояния на зависящее от времени внешнее возмущение, привела к точным значениям энергии возбужденного состояния и силы осциллятора [34, 35].

В данной работе представлены результаты расчетов термодинамических параметров реакций каталитического крекинга, таких как энтальпия и свободная энергия Гиббса, с помощью: 1) классических математических функций функциональных групп в постоянном температурном диапазоне; 2) квантово-химического метода и 3) экспериментальных данных, представленных в справочной литературе. В работах [20, 21] представлен вклад функциональных групп первого и второго порядков в значения термодинамических параметров. В то же время в методе Constantinou–Gani функциональная группа неароматического кольца не рассматривалась, по этой причине при проведении расчетов в данной работе использовался метод Joback для нескольких неароматических циклических изомеров, участвующих в реакциях каталитического крекинга. Математические расчеты, выполненные квантово-химическим методом, реализованы с использованием программного пакета Gaussian 9.0 (метод DFT). Таким образом, в настоящей работе обсуждается точность перечисленных методов и рекомендуется применение каждого метода на примере термодинамического анализа реакций, протекающих в процессе каталитического крекинга, с получением газообразных углеводородных продуктов, таких как пропилен, пропан, бутилен, бутан.

#### Объект и методы исследования

Каталитический крекинг характеризуется разными реакциями. Реакции делятся на 9 групп: крекинг (первичный и вторичный крекинг), изомеризация, перенос водорода, dealкилирование, трансалкилирование, ароматизация олефинов, дегидрирование, конденсация, коксообразование. Получение целевых продуктов (пропан, пропилен, бутан, бутилен, изобутилен) осуществляется с помощью нескольких реак-

ций. В табл. 1 показаны основные реакции, приводящие к образованию целевых продуктов, в частности, пропана, пропилена, бутана и бутилена [36–39].

**Таблица 1.** Реакции вторичного крекинга с целью получения газообразных продуктов

**Table 1.** Reactions of secondary cracking for obtaining gaseous products

№	Реакции/Reactions	Уравнения реакции Reaction equations
1	Крекинг n-парафинов в парафины и олефины Cracking of n-parafins to parafins and olefins	$n-C_7H_{16} \rightarrow C_3H_6 + C_4H_{10}$
2	Крекинг изопарафинов в парафины и изоолефины Cracking of iso-parafins to parafins and iso-olefins	$i-C_7H_{16} \rightarrow i-C_4H_8 + C_3H_8$
3	Крекинг олефинов с получением пропан-пропиленовой фракции Cracking of olefins for obtaining propane and propylene fractions	$C_6H_{12} \leftrightarrow C_3H_6 + C_3H_6$
4	Крекинг непредельных углеводородов с производством бутан-бутиленовой фракции Cracking of unsaturated hydrocarbons for production of butane and butylene fractions	$C_8H_{16} \leftrightarrow C_4H_8 + C_4H_8$

#### Термодинамический анализ на основе вклада функциональных групп

В данном исследовании классические методы Constantinou–Gani и Joback использовались для расчета таких термодинамических параметров, как стандартная энтальпия образования газа, теплоемкость, энтальпия, свободная энергия Гиббса. Суть указанных методов заключается в том, что термодинамические параметры рассчитывают на основе влияния каждой функциональной группы в молекулярной структуре соединения. На первом этапе для каждого углеводородного компонента и изомеров рассчитывались термодинамические параметры: стандартная энтальпия образования газа, теплоемкость, энтальпия и свободная энергия Гиббса при различной температуре каталитического крекинга: 490 °C (788,15 K), 550 °C (845,15 K) и 605 °C (903,15 K). На втором этапе для каждой реакции рассчитывались термодинамические параметры: энтальпия реакции, а также свободная энергия Гиббса реакции при минимальной и максимальной температуре процесса каталитического крекинга. Уравнения (5)–(7) демонстрируют метод получения термодинамических параметров по Constantinou–Gani.

$$\Delta H_f^0(298,15 \text{ K}) = 10,835 + \left[ \sum_k N_k (hf1k) + W \sum_j M_j (hf2j) \right] (kJ \text{ mol}^{-1}), \quad (5)$$

$$\Delta G_f^0(298,15 \text{ K}) = 14,83 + \left[ \sum_k N_k (gf1k) + W \sum_j M_j (gf2j) \right] (kJ \text{ mol}^{-1}), \quad (6)$$

$$C_p^0(T) = \left[ \sum_k N_k (C_{pA1k}) + W \sum_j M_j (C_{pA2j}) - 19,7779 \right] +$$

$$+ \left[ \sum_k N_k (C_{pB1k}) + W \sum_j M_j (C_{pB2j}) + 22,5981 \right] \theta + \left[ \sum_k N_k (C_{pC1k}) + W \sum_j M_j (C_{pC2j}) - 10,7983 \right] \theta^2 \quad (7)$$

(J mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>).

здесь  $\theta = \frac{T-298}{700}$ ;  $N_k$  – количество функциональных групп первого порядка в молекуле;  $M_j$  – количество функциональных групп второго порядка в молекуле;  $hf1$  и  $hf2$  – параметры расчета стандартной энтальпии образования;  $gf1$  и  $gf2$  – параметры расчета свободной энергии Гиббса;  $C_{pA1k}$ ,  $C_{pA2}$ ,  $C_{pB1}$ ,  $C_{pB2}$ ,  $C_{pC1}$ ,  $C_{pC2}$  – параметры расчета стандартной теплоемкости образования. В методе Constantinou–Gani функциональная группа неароматического кольца не рассматривается, по этой причине в расчетах использовался метод Joback, содержащий коэффициенты для функциональной группы неароматического кольца.

Уравнения (8)–(10) показывают метод получения термодинамических параметров по Joback.

$$\Delta H_f^0(298,15 \text{ K}) = \left[ 68,29 + \sum_k N_k (\Delta hfk) \right] (kJ \text{ mol}^{-1}), \quad (8)$$

$$\Delta G_f^0(298,15 \text{ K}) = \left[ 53,88 + \sum_k N_k (\Delta gfk) \right] (kJ \text{ mol}^{-1}), \quad (9)$$

$$C_p^0(T) = \left\{ \sum_k N_k (C_{pAk}) - 37,93 \right\} + \left\{ \sum_k N_k (C_{pBk}) + 0,210 \right\} T + \left\{ \sum_k N_k (C_{pCk}) - 3,91E - 04 \right\} T^2 + \left\{ \sum_k N_k (C_{pDk}) + 2,06E - 07 \right\} T^3 \quad (J \text{ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}), \quad (10)$$

**Таблица 3.** Функциональные группы и их коэффициенты в методе Joback

**Table 3.** Functional groups and their coefficients in the method of Joback

Функциональные группы Functional groups	$\Delta hfk$	$\Delta gfk$	$C_{pAk}$	$C_{pBk}$	$C_{pCk}$	$C_{pDk}$
CH <sub>2</sub>	-20,64	-8,42	-0,909	0,095	-5,44E-05	1,19E-08
CH <sub>3</sub>	-76,45	-43,96	19,5	-8,08E-03	1,53E-04	-9,67E-08
C (ss)	79,72	87,88	-90,9	0,557	-0,0009	4,69E-07
CH (ss)	8,67	40,99	8,67	0,162	-1,6E-04	6,24E-08
CH <sub>2</sub> (ss)	-26,8	-3,68	-6,03	8,54E02	-8E-06	-1,8E-08

Термодинамический анализ  
на основе квантово-химического метода DFT

Квантово-химические методы основаны на квантовой механике из уравнения Schrödinger (уравнение (1)). Для решения электронного уравнения Schrödinger были предложены различные приближения, такие как орбитальное приближение, метод волновой функции и теория функционала плотности (DFT). Самым популярным и эффективным методом с точки зрения точности является метод DFT, теоре-

$N_k$  – количество функциональных групп в структуре молекулы;  $\Delta hf$  – параметры расчета стандартной энтальпии образования;  $\Delta gf$  – параметры расчета стандартной энтальпии образования;  $C_{pA}$ ,  $C_{pB}$ ,  $C_{pC}$  – параметры расчета стандартной теплоемкости образования.

В табл. 2 показаны функциональные группы и их коэффициенты, используемые в методе Constantinou–Gani. Здесь рассматриваются углеводородные компоненты и их изомеры, участвующие в реакциях (табл. 1), которые имеют только функциональные группы первого порядка, поэтому  $M_j$  равно нулю при использовании метода Constantinou–Gani. В табл. 3 показаны функциональные группы и их коэффициенты в методе Joback.

**Таблица 2.** Функциональные группы и их коэффициенты в методе Constantinou–Gani

**Table 2.** Functional groups and their coefficients in the method of Constantinou–Gani

Функциональные группы Functional groups	hflk	gflk	$C_{pA1k}$	$C_{pB1k}$	$C_{pC1k}$
C (4)	17,119	37,977	0,3456	74,0368	-45,7878
CH	-3,766	19,848	8,9272	59,9786	-29,5143
CH <sub>2</sub>	-20,763	8,231	22,6346	45,0933	-15,703
CH <sub>3</sub>	-45,947	-8,03	35,1152	39,5923	-9,9232
CH <sub>2</sub> =CH	53,712	84,926	49,2506	59,384	-21,7908
CH <sub>2</sub> =C	64,145	88,402	37,6299	62,1218	-26,0637
CH=CH	69,939	92,9	35,2248	62,1924	-24,8156
CH=C	82,528	93,745	21,3528	66,3947	-29,3703
C=C	104,293	116,613	10,2797	65,5372	-30,6057

Уравнения (11), (12) позволяют рассчитать энтальпию и свободную энергию Гиббса реакции соответственно.

$$\Delta H_{\text{реакция}}(T) = \Delta H_f^0(\text{реакция}) + \sum \mathcal{G}_i \Delta H_{\text{продукты}}(T) - \sum \mathcal{G}_i \Delta H_{\text{реагенты}}(T), \quad (11)$$

$$\Delta G_{\text{реакция}}(T) = \sum \mathcal{G}_i \Delta G_{\text{продукты}}(T) - \sum \mathcal{G}_i \Delta G_{\text{реагенты}}(T). \quad (12)$$

тическое приближение B3LYP, базис 3-21G в отношении таких исследуемых термодинамических параметров, как энтальпия и энергия Гиббса [7, 37, 40]. В данной работе использовался метод DFT, реализованный в программе Gaussian 9.0, а также метод DFT для расчетов термодинамических параметров и оптимальной 3D молекулярной конфигурации (в которой молекула имеет минимальную энергию) каждого компонента. Также рассчитывались термодинамические параметры каждой реакции, такие как энтальпия и свободная энергия Гиббса.

Экспериментальные данные, представленные в справочной литературе

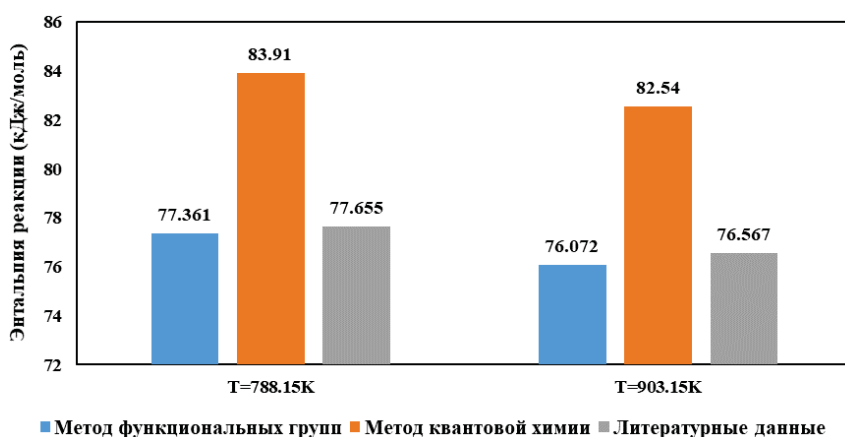
Stull [41] представил табулированные параметры для органических соединений до  $C_{20}$ . Здесь обсуждены данные для группы алканов  $C_1$ – $C_{10}$ . Для углеводородов от  $C_{11}$  до  $C_{20}$  обсуждены только нормальные парафины, а данные для углеводородов  $C_{20+}$  не представлены. Для группы алкенов  $C_1$ – $C_6$  представлены данные для всех изомеров. Из углеводородов ряда  $C_7$ – $C_{20}$  представлены только нормальные алкены, сведений для  $C_{20+}$  не приведено.

### Результаты и обсуждение

Выполненный термодинамический анализ позволил установить принципиальную возможность протекания реакций каталитического крекинга. На графиках 1, 2 показаны результаты математических расчетов (метод функциональных групп и метод квантовой химии) термодинамических параметров, таких как энтальпия для реакций 1 и 2, соответственно. В табл. 4 представлены результаты расчетов реакции 3 и 4 (все реакции показаны в табл. 1) при минимальной и максимальной температуре процесса каталитического крекинга. Также показано сравнение результатов расчетов энтальпии реакций с литературными данными [41–43]. Сравнение подтверждает достаточную точность полученных результатов. Энтальпия всех рассмотренных реакций положительна, что свидетельствует об их эндотермическом эффекте и подтверждается экспериментальными данными. Анализ энтальпии реакций важен при анализе теплового баланса реактора. Установлено, что изменение температуры каталитического крекинга не влияет на энтальпию реакции. С другой стороны, влияние структуры изомеров на термодинамические параметры реакции значительно.

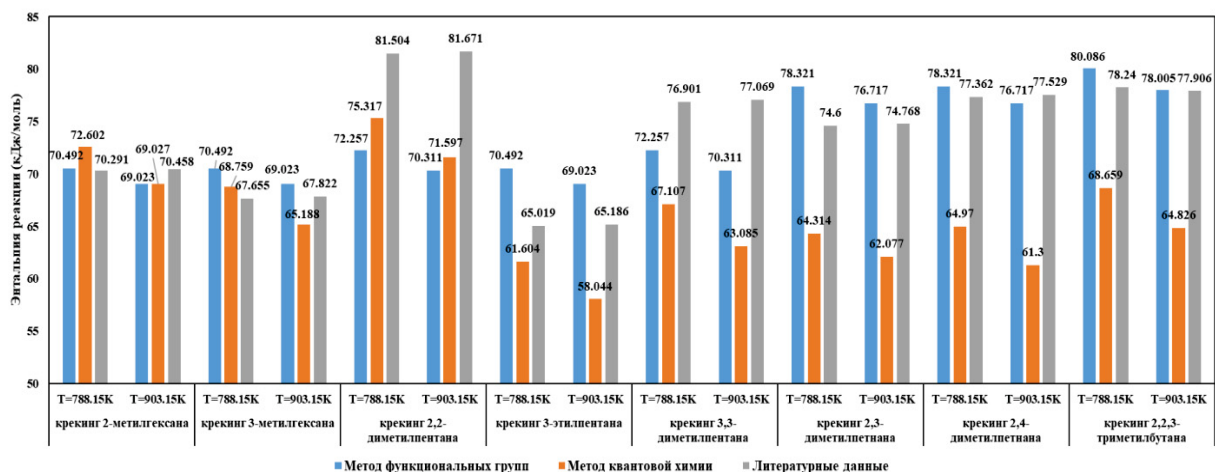
Анализ реакций 1 и 2 показывает, что изомеры парафина ( $i$ - $C_7H_{16}$ ) реагируют легче, чем изомеры  $n$ -парафина ( $n$ - $C_7H_{16}$ ), которые потребляют меньше энергии на основе меньшей энтальпии по результатам математических расчетов. Среди изомеров  $i$ - $C_7H_{16}$  2-метилгексан, 3-метилгексан и 3-этилпентан показы-

вают наименьшую и одинаковую энтальпию. Анализ реакции 3 показывает, что крекинг изомера гексен-1 для получения пропилена имеет наименьшую среднюю энтальпию – 76,71 и 73,66 кДж/моль – между температурами 788,15 и 903,15 К на основе метода функциональных групп и квантовой химии соответственно. В реакции получения пропана максимальный вклад строения изомеров на энтальпии реакции составляет 10 кДж/моль (реакция 2), в то время как для получения пропилена – почти 50 кДж/моль (реакция 3) на основе того и другого методов. Анализ вариаций цис- и транс-конфигураций в структуре молекулы по энтальпии невозможен в методе функциональных групп, поэтому рекомендуется использовать метод квантовой химии, хотя его применение требует гораздо больше времени. Для реакции крекинга циклогексана с использованием методов квантовой химии не удалось определить значение энтальпии с достаточной точностью. Поэтому в этом случае рекомендуется использовать метод функциональных групп. При анализе реакции 4 для получения бутилена в каталитическом крекинге определено, что среди изомеров октена октен-1 показал почти на 50 % меньше энтальпии на основе двух методов. В промышленном масштабе это снижение имеет большое значение. Крекинг изомера циклооктана с целью получения бутен-1 имеет наибольшую среднюю энтальпию (143,16 кДж/моль на основе метода функциональных групп) среди всех вариантов. Как и в случае крекинга циклогексана, метод квантовой химии не представил удовлетворительного результата по определению энтальпии для крекинга циклооктана. Вместе с тем, если неароматическое кольцо имеет метил-, этилрадикалы или несколько метиленовых радикалов, метод квантовой химии является достаточно точным. В методе Constantinou–Gani (на основе учета функциональных групп) математические расчеты неароматических колец не рассматриваются. В этом случае использовался метод Joback. Выполненные расчеты показали, что метод Constantinou–Gani более точен, чем метод Joback.



**График 1.** Энтальпия реакции 1 (крекинг  $n$ -гептана) на основе функционально-группового метода и квантово-химического метода и сравнение результатов со справочником при минимальной и максимальной температурах процесса каталитического крекинга

**Figure 1.** Enthalpy of reaction 1 ( $n$ -heptane cracking) based on methods of functional groups and quantum chemistry and comparison of results with literature data in minimum and maximum temperature of catalytic cracking



**График 2.** Энтальпия реакции 2 (крекинг изомеров гептана) на основе функционально-группового метода и кванто-химического метода и сравнение результатов со справочником при минимальной и максимальной температурах процесса каталитического крекинга

**Figure 2.** Enthalpy of reaction 2 (cracking of heptane isomers) based on methods of functional groups and quantum chemistry and comparison of results with literature data in minimum and maximum temperature of catalytic cracking

**Таблица 4.** Энтальпия целевых реакций 3 и 4 на основе функционально-группового метода и кванто-химического метода и сравнение результатов со справочником при минимальной и максимальной температурах процесса каталитического крекинга

**Table 4.** Enthalpy of desired reactions 3, 4 based on methods of functional groups and quantum chemistry and comparison of results with literature data in minimum and maximum temperature of catalytic cracking

Продукты Products	Реагенты Reactans	Энтальпия реакции/Reactions enthalpy $\Delta H_f$ , кДж/моль/kJ/mole					
		788,15 К			903,15 К		
		Метод функциональных групп Method of functional groups	Метод квантовой химии Method of quantum chemistry	Литературные данные [15, 41] Literature data [15, 41]	Метод функциональных групп Method of functional groups	Метод квантовой химии Method of quantum chemistry	Литературные данные [15, 41] Literature data [15, 41]
<b>Реакция 3/Reaction 3</b>		<b>С<sub>3</sub>H<sub>6</sub></b>					
Пропилен Propylene	Циклогексан Cyclohexane	130,605	74,249	162,046	128,912	76,483	159,619
	Метилциклопентан Methylcyclopentane	128,029	152,796	147,569	122,491	154,392	146,398
	Гексен-1 1-hexene	77,361	67,829	77,864	76,072	79,508	76,776
	2-этил-1-бутен 2-ethyl-1-butene	92,058	87,765	86,525	90,813	86,352	85,311
	2-гексен (транс) 2-hexene (trans)	87,124	86,715	90,709	86,061	91,089	89,872
	2-метил-1-пентен 2-methyl-1-pentene	92,058	90,949	87,194	90,813	89,508	85,939
	2-метил-2-пентен 2-methyl-2-pentene	100,739	96,500	97,738	99,866	95,675	96,901
	2,3-диметил-1-бутен 2,3-dimethyl-1-butene	99,887	91,272	88,073	98,506	89,676	86,650
	2,3-диметил-2-бутен 2,3-dimethyl-2-butene	104,198	97,784	99,788	103,415	93,824	99,118
	Гексен-3 (транс) 3-hexene (trans)	87,324	85,113	90,541	86,261	89,878	89,537
	3-метил-1-пентен 3-methyl-1-pentene	85,189	72,324	77,194	83,765	77,134	75,688
	3-метил-2-пентен (транс) 3-methyl-2-pentene (trans)	100,739	74,561	96,650	99,866	93,231	95,813
	3,3-диметил-1-бутен 3,3-dimethyl-1-butene	86,954	88,012	80,876	85,053	86,413	80,039
	4-метил-1-пентен 4-methyl-1-pentene	85,189	78,413	82,466	83,765	84,701	81,797
	4-метил-2-пентен (транс) 4-methyl-2-pentene (trans)	95,154	73,978	87,989	93,955	95,310	86,692

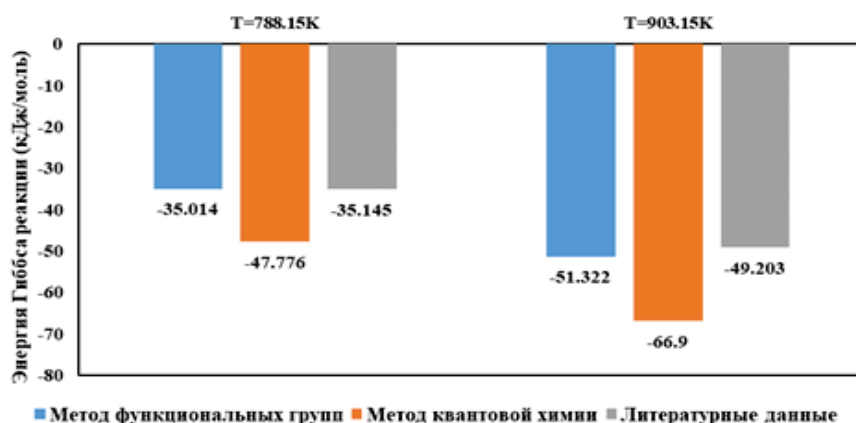
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>		Реакция 4/Reaction 4					
		C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>					
Бутен-1 1-butene	Октен-1 1-octene	77,361	82,490	78,198	76,071	78,098	77,069
	1,1-диметилциклогексан 1,1-dimethylcyclohexane	134,583	78,814	176,062	132,728	80,752	172,841
	1,2-диметилциклогексан (транс) 1,2-dimethylcyclohexane (trans)	139,006	182,545	167,192	129,333	181,453	164,263
	1,3-диметилциклогексан (транс) 1,3-dimethylcyclohexane (trans)	139,006	159,564	171,878	129,333	158,535	169,075
	1,4-диметилциклогексан (цис) 1,4-dimethylcyclohexane (cis)	139,006	159,864	171,962	129,333	158,800	169,159
	Циклооктан cyclooctane	144,158	92,191	127,402	142,175	92,323	125,603
	Этилциклогексан Ethylcyclohexane	134,689	151,798	166,272	129,071	150,813	163,385
	Пропилциклопентан propylcyclopentane	127,795	146,492	147,737	122,388	145,394	146,442
Бутен-2 (цис) 2-butene (cis)	Октен-1 1-octene	57,431	64,201	58,534	55,691	64,666	56,735
	1,1-диметилциклогексан 1,1-dimethylcyclohexane	114,653	60,525	156,397	112,348	67,320	152,506
	1,2-диметилциклогексан (транс) 1,2-dimethylcyclohexane (trans)	119,076	164,256	147,527	108,953	168,021	143,929
	1,3-диметилциклогексан (транс) 1,3-dimethylcyclohexane (trans)	119,076	141,275	152,213	108,953	145,103	148,741
	1,4-диметилциклогексан (цис) 1,4-dimethylcyclohexane (cis)	119,076	141,574	152,297	108,953	145,368	148,824
	Циклооктан Cyclooctane	124,228	73,902	107,738	121,795	78,891	105,269
	Этилциклогексан Ethylcyclohexane	114,759	133,509	146,607	108,691	137,381	143,050
	Пропилциклопентан propylcyclopentane	107,865	128,203	128,072	102,008	131,962	126,105
2-метилпропен 2-methylpropene	Октен-1 1-octene	74,965	60,278	45,898	46,589	51,706	47,362
	1,1-диметилциклогексан 1,1-dimethylcyclohexane	105,187	56,603	143,762	103,246	54,360	143,134
	1,2-диметилциклогексан (транс) 1,2-dimethylcyclohexane (trans)	109,61	160,334	134,892	99,851	155,062	134,557
	1,3-диметилциклогексан (транс) 1,3-dimethylcyclohexane (trans)	109,61	137,353	139,578	99,851	132,144	139,369
	1,4-диметилциклогексан (цис) 1,4-dimethylcyclohexane (cis)	109,61	137,652	139,661	99,851	132,409	139,452
	Циклооктан cyclooctane	114,762	69,980	95,102	112,693	65,931	95,897
	Этилциклогексан Ethylcyclohexane	105,293	129,586	133,971	99,589	124,422	133,678
	Пропилциклопентан propylcyclopentane	98,399	124,280	115,436	92,906	119,003	116,733

На графиках 3, 4 показаны результаты расчетов свободной энергии Гиббса реакций 1 и 2, соответственно, на основе метода функциональных групп и метода квантовой химии. В табл. 5 представлены результаты расчетов параметров реакции 3 и 4, а также приведены результаты сравнения термодинамических параметров реакций крекинга с литературными данными. Энергия Гиббса для всех реакций и изомеров отрицательна, и это значит, что все реакции при данных условиях термодинамически возможны. В отличие от энтальпии реакции, на величину которой температура практически не влияет, значение энергии Гиббса реакции изменяется значительно при изменении температуры из-за увеличения энтропии системы. Для всех рассматриваемых реакций с ростом температуры энергия Гиббса реакции увеличивается. Анализ реакций 1 и 2 показал, что свободная энергия Гиббса реакции крекинга 2,2,3-триметилбутан наибольшая абсолютная величина (–52,25| кДж/моль при 788,15 К и –

|71,41| кДж/моль при 903,15 К на основе метода функциональных групп). Это означает, что крекинг 2,2,3-триметилбутана более вероятен среди всех изомеров. Реакции крекинга с участием многоветвленных молекул углеводородов более вероятны. По причине трехмерной молекулярной структуры повышение температуры более значительно влияет на увеличение энтропии, таким образом наблюдается большее абсолютное значение величины энергии Гиббса реакции крекинга. На основе этого принципа в реакции 3 крекинга 3,3-диметил-1-бутена наблюдается наибольшее значение абсолютной величины энергии Гиббса реакции для получения пропилена (–53,41| кДж/моль при 788,15 К и –73,75| кДж/моль при 903,15 К на основе метода функциональных групп). Расчеты, выполненные с использованием метода квантовой химии, не представили точных результатов, поэтому здесь рекомендуется использовать литературные данные и метод функциональных групп. В случае других изомеров все исполь-

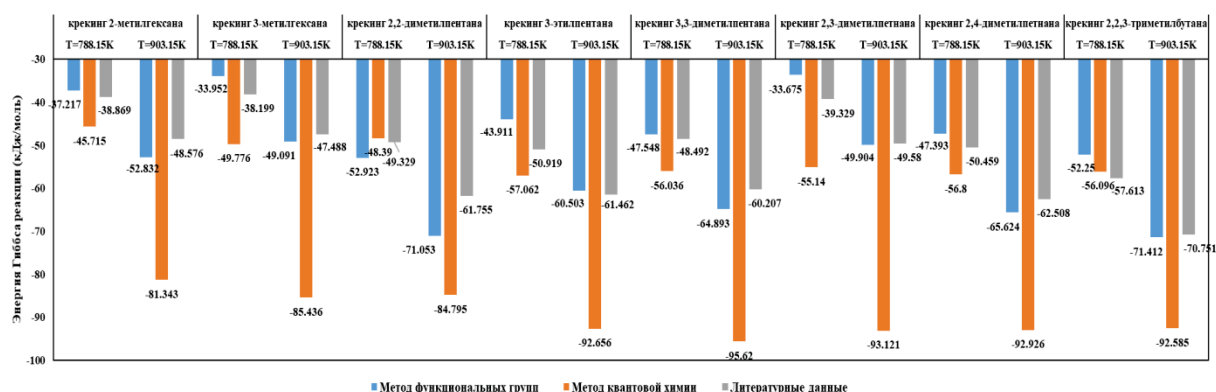
зубые в данной работе методы показали достаточную точность. Анализ реакции 4 показал, что для получе-

ния бутилена в крекинге изомеров октана более вероятно образование 2-метилпропена.



**График 3.** Энергия Гиббса реакций 1 (крекинг *n*-гептана) на основе функционально-группового метода и кванто-химического метода и сравнение результатов со справочником при минимальной и максимальной температурах процесса каталитического крекинга

**Figure 3.** Gibbs free energy of reaction 1 (cracking of *n*-heptane) based on methods of functional groups and quantum chemistry and comparison of results with literature data in minimum and maximum temperature of catalytic cracking



**График 4.** Энергия Гиббса реакций 2 (крекинг изомеров гептана) на основе функционально-группового метода и кванто-химического метода и сравнение результатов со справочником при минимальной и максимальной температурах процесса каталитического крекинга.

**Figure 4.** Gibbs free energy of reaction 2 (cracking of heptane isomers) based on methods of functional groups and quantum chemistry and comparison of results with literature data in minimum and maximum temperature of catalytic cracking

**Таблица 5.** Энергия Гиббса целевых реакций на основе функционально-группового метода и кванто-химического метода и сравнение результатов со справочником при минимальной и максимальной температурах процесса каталитического крекинга

**Table 5.** Gibbs free energy of desired reactions based on methods of functional groups and quantum chemistry and comparison of results with literature data in minimum and maximum temperature of catalytic cracking

Продукты Products	Реагенты Reactants	Энергия Гиббса реакции/Gibbs energy of reactions $\Delta G_f$ , кДж/моль/kJ/mole					
		788,15 К			903,15 К		
		Метод функциональных групп Method of functional groups	Метод квантовой химии Method of quantum chemistry	Литературные данные [15, 41] Literature data [15, 41]	Метод функциональных групп Method of functional groups	Метод квантовой химии Method of quantum chemistry	Литературные данные [15, 41] Literature data [15, 41]
Реакция 3/Reaction 3							
$C_3H_6$	$C_6H_{12}$						
Пропилен Propylene	Циклогексан Cyclohexane	-48,757	-138,390	-26,359	-74,814	-169,581	-49,831
	Метилциклопентан Methylcyclopentane	-1,950	-6,975	-9,539	-20,535	-22,253	-29,162
	Гексен-1 1-hexene	-35,080	-63,069	-34,601	-51,397	-67,131	-48,618

	2-этил-1-бутен 2-ethyl-1-butene	-26,532	-43,798	-30,459	-43,749	-62,912	-45,061
	2-гексен (транс) 2-hexene (trans)	-25,389	-40,758	-24,016	-41,733	-53,733	-38,367
	2-метил-1-пентен 2-methyl-1-pentene	-22,146	-35,811	-25,145	-38,723	-54,216	-38,325
	2-метил-2-пентен 2-methyl-2-pentene	-19,345	-62,171	-22,677	-36,807	-46,471	-37,739
	2,3-диметил-1-бутен 2,3-dimethyl-1-butene	-26,946	-37,786	-32,969	-45,357	-56,889	-48,074
	2,3-диметил-2-бутен 2,3-dimethyl-2-butene	-26,682	-35,011	-35,856	-45,725	-45,492	-52,843
	Гексен-3 (транс) 3-hexene (trans)	-29,805	-41,708	-29,539	-46,823	-54,164	-44,517
	3-метил-1-пентен 3-methyl-1-pentene	-31,043	-63,828	-34,810	-47,903	-74,994	-11,129
	3-метил-2-пентен (транс) 3-methyl-2-pentene (trans)	-19,345	-50,976	-21,087	-36,807	-49,926	-35,773
	3,3-диметил-1-бутен 3,3-dimethyl-1-butene	-53,411	-50,099	-58,659	-73,757	-70,142	-85,520
	4-метил-1-пентен 4-methyl-1-pentene	-40,178	-58,047	-47,070	-58,371	-66,451	-63,262
	4-метил-2-пентен (транс) 4-methyl-2-pentene (trans)	-31,3078	-55,017	-33,011	-49,676	-51,606	-48,116
Реакция 4/Reaction 4							
$C_4H_8$	$C_8H_{16}$						
Бутен-1 1-butene	Октен-1 1-octene	-34,618	-48,983	-33,932	-50,869	-67,971	-47,864
	1,1-диметилциклогексан 1,1-dimethylcyclohexane	-61,377	-147,952	-16,694	-89,851	-181,172	-40,542
	1,2-диметилциклогексан (транс) 1,2-dimethylcyclohexane (trans)	-4,066	2,559	-17,572	-24,275	-23,587	-40,459
	1,3-диметилциклогексан (транс) 1,3-dimethylcyclohexane (trans)	-4,428	-14,154	-11,840	-24,691	-39,529	-34,601
	1,4-диметилциклогексан (цис) 1,4-dimethylcyclohexane (cis)	-8,880	-14,847	-16,359	-29,792	-40,214	-39,706
	Циклооктан cyclooctane	-54,974	-101,956	-74,182	-83,899	-130,282	-99,244
	Этилциклогексан Ethylcyclohexane	-24,045	-22,560	-11,045	-46,821	-47,923	-33,011
	Пропилциклопентан propylcyclopentane	-2,066	-8,485	-8,911	-20,642	-30,933	-28,367
Бутен-2 (цис) 2-butene (cis)	Октен-1 1-octene	-36,728	-46,841	-36,191	-50,346	-89,112	-47,948
	1,1-диметилциклогексан 1,1-dimethylcyclohexane	-63,487	-145,809	-18,953	-89,328	-202,313	-40,626
	1,2-диметилциклогексан (транс) 1,2-dimethylcyclohexane (trans)	-6,175	4,702	-19,832	-23,752	-44,728	-40,542
	1,3-диметилциклогексан (транс) 1,3-dimethylcyclohexane (trans)	-6,538	-12,011	-14,100	-24,168	-60,670	-34,685
	1,4-диметилциклогексан (цис) 1,4-dimethylcyclohexane (cis)	-10,990	-12,704	-18,618	-29,269	-61,355	-39,789
	Циклооктан cyclooctane	-57,084	-99,813	-76,441	-83,376	-151,423	-99,328
	Этилциклогексан Ethylcyclohexane	-26,155	-20,418	-13,305	-46,298	-69,063	-33,095
	Пропилциклопентан propylcyclopentane	-4,176	-6,343	-11,171	-20,119	-52,074	-28,451
2-метилпропен 2-methylpropene	Октен-1 1-octene	-45,450	-43,129	-49,413	-58,986	-94,972	-61,253
	1,1-диметилциклогексан 1,1-dimethylcyclohexane	-72,209	-142,097	-32,174	-97,968	-208,173	-53,931
	1,2-диметилциклогексан (транс) 1,2-dimethylcyclohexane (trans)	-14,897	8,414	-33,053	-32,392	-50,588	-53,848
	1,3-диметилциклогексан (транс) 1,3-dimethylcyclohexane (trans)	-15,260	-8,299	-27,321	-32,807	-66,530	-47,990
	1,4-диметилциклогексан (цис) 1,4-dimethylcyclohexane (cis)	-19,712	-8,992	-31,840	-37,909	-67,215	-53,094
	Циклооктан cyclooctane	-65,806	-96,101	-89,663	-92,015	-157,283	-112,633
	Этилциклогексан Ethylcyclohexane	-34,876	-16,706	-26,526	-54,938	-74,923	-46,400
	Пропилциклопентан propylcyclopentane	-12,898	-2,630	-24,392	-28,759	-57,934	-41,756

## Заключение

Сравнивая описанные выше методы и подходы к определению термодинамических параметров органических соединений, можно сделать вывод о том, что функционально-групповой термодинамический подход основан на оценке влияния функциональной группы в структуре молекулы на такие свойства веществ, как энтальпия и свободная энергия Гиббса. Этот метод более практичен, чем квантово-химические расчеты. В справочной литературе не приводятся значения термодинамических параметров для углеводородов с длиной цепи  $C_{20+}$ , что ограничивает применение данных источников для анализа реакций с участием высокомолекулярных соединений нефти.

Таким образом, можно заключить, что квантово-химические методы, в частности DFT (B3LYP, 3-21G), достаточно точно позволяют рассчитать параметры реакций крекинга  $C_8$ . Метод функциональных групп

на основе Constantinou–Gani достаточно точен и малозатратен по времени для углеводородов  $C_6$ – $C_7$  (алканы и алкены).

Сравнительная оценка различных методов расчетов показала, что для углеводородов  $C_6$ – $C_7$  (алканы и алкены) наиболее применим метод функциональных групп (погрешность расчетов энтальпии от 0,38 до 7,28 % и энергии Гиббса от 0,37 до 14,96 %). Для непредельных углеводородов  $C_8$  наиболее применим метод DFT (B3LYP, 3-21G), погрешность расчетов энтальпии 12,22 % и энергии Гиббса 35,84 %).

Выбор того или иного метода определяется областью его использования, будь то нефтехимия, биотехнология или, как в нашем случае, процессы нефтепереработки.

*Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 19-71-10015-П.*

## Список сокращений

T	температура
P	давление
V	объем
$T_b$	нормальная температура кипения
$T_f$	нормальная температура замерзания
$T_c$	критическая температура
$P_c$	критическое давление
$V_c$	критический объем
$C_p^0$	теплоемкость
$H_T^0 - H_{298.15}^0$	теплосодержание

$S_T^0$	энтропия
$-(F^0 - H_{298.15}^0)/T$	функция свободной энергии
$\Delta F_f^0$	свободная энергия
$\Delta H_f^0$	энтальпия
$\Delta H_{f,298.15}^0$	энтальпия образования
$\Delta H_f(T)$	энтальпия при температуре T
$\Delta G_{f,298.15}^0$	свободная энергия Гиббса образования
$\Delta G_f(T)$	свободная энергия Гиббса при температуре T
$\Delta H_{vb}$	энтальпия парообразования при $T_b$
$v_i$	коэффициент молекулы в реакции

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- World Energy Model Documentation. 2020. IEA Report. URL: [https://iea.blob.core.windows.net/assets/fa87681d-73bd-4719-b1e569670512b614/WEM\\_Documentation\\_WEO2020.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/fa87681d-73bd-4719-b1e569670512b614/WEM_Documentation_WEO2020.pdf) (дата обращения 10.06.2022).
- A view on the refinery of the future: catalyst and process challenges // M. Alabdullah, A.R. Gomez, J. Vittenet, A. Bendjtrious-Sedjerari, W. Xu, A.I. Abba, J. Gascon // ACS Catalysis. – 2020. – V. 10. – P. 8131–8140.
- Oil 2021: analysis and forecast to 2026. 2021. IEA Report. URL: <https://www.iea.org/reports/oil-2021> (дата обращения 10.06.2022).
- Zacharopoulou V., Lemonidou A.A. Olefins from biomass intermediates: a review // Catalysts. – 2017. – V. 8. – P. 2–21.
- Corma A., Corresa E., Mathieu Y., Sauvanaud L., Al-Bogami S., Al-Ghrami M.S., Bourane A. Crude oil to chemicals: light olefins from crude oil // Catalysis Science and Technology. – 2017. – V. 7. – P. 12–46.
- Gholami Z., Gholami F., Tisler Z., Tomas M., Vakili M. A review on production of light olefins via fluid catalytic cracking // Energies. – 2021. – V. 14. – P. 1089–1125.
- Назарова Г.Ю. Повышение эффективности процесса каталитического крекинга вакуумного дистиллята в лифт-реакторе с применением метода математического моделирования: дис. ... канд. тех. наук. – Томск, 2020. – 191 с.
- Седghi Р.Б. Получение пропилена и легких олефинов в процессе каталитического крекинга вакуумного дистиллята: дис. ... канд. тех. наук. – М., 2013. – 240 с.
- Campos A.C.C., Azevedo dos Reis R., Ortiz A., Gorri D., Ortiz I. A perspective of solutions for membrane instabilities in olefin/paraffin separation: a review // Industrial and Engineering Chemistry Research. – 2018. – V. 57. – P. 10071–10085.
- Jensen F. Introduction to computational chemistry. 3rd ed. – New York: Wiley, 2001. – 664 p.

- Pitzer K.S. The vibration frequencies and thermodynamic functions of long chain hydrocarbons // Journal of Chemical Physics. – 1940. – V. 8. – P. 711–720.
- Pitzer K.S., Gwinn W.D. Energy levels and thermodynamic functions for molecules with internal rotation: I. Rigid frame with attached tops // Journal of Chemical Physics. – 1942. – V. 10. – P. 428–440.
- Franklin J.L. Prediction of heat and free energies of organic compounds // Industrial and Engineering Chemistry. – 1949. – V. 41. – P. 1070–1079.
- Van Krevelen D.W., Chermis H.A.G. Estimation of the free enthalpy (Gibbs free energy) of formation of organic compounds from group contributions // Chemical Engineering Science. – 1951. – V. 1. – P. 66–80.
- Stull D.R., Sinke G.C. Thermodynamic properties of the elements // Advances in Chemistry Series. – Washington DC: American Chemical Society, 1956. – 237 p.
- Benson S.W., Buss J.H. Additivity rules for the estimation of molecular properties. Thermodynamic properties // Journal of Chemical Physics. – 1958. – V. 29. – P. 546–572.
- Verma K.K., Doraiswamy L.K. Estimation of heats of formation of organic compounds // Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals. – 1965. – V. 4. – P. 389–396.
- Rihani D.N., Doraiswamy L.K. Estimation of heat capacity of organic compounds from group contributions // Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals. – 1965. – V. 4. – P. 17–21.
- Thinh T.P., Duran J.L., Ramalho R.S. Estimation of ideal gas heat capacities of hydrocarbons from group contribution techniques // Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development. – 1971. – V. 10. – P. 576–582.
- Joback K.G., Reid R.C. Estimation of pure-component properties from group-contributions // Chemical Engineering Communications. – 1981. – V. 57. – P. 233–243.
- Constantinou L., Gani R. New group contribution for estimating properties of pure compounds // AIChE Journal. – 1994. – V. 40. – P. 1697–1710.



22. Coniglio L., Rauzy E., Berro C. Representation and prediction of thermophysical properties of heavy hydrocarbons // *Fluid Phase Equilibria*. – 1993. – V. 87. – P. 53–88.
23. Coniglio L., Daridon J.L. A group contribution method for estimating ideal gas heat capacities of hydrocarbons // *Fluid Phase Equilibria*. – 1997. – V. 139. – P. 15–35.
24. Schrödinger E. An undulatory theory of the mechanics of atoms and molecules // *Physical Review*. – 1926. – V. 28. – P. 1049–1070.
25. Griffiths David J. Introduction to quantum mechanics. 2nd ed. – New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2004. – 480 p.
26. Shankar R. Principles of Quantum Mechanics. 2nd ed. – New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 1994. – 453 p.
27. Born M., Oppenheimer R. Zur Quantentheorie der Molekeln // *Annalen der Physik*. – 1927. – V. 84. – P. 457–484.
28. Szabo A., Ostlund N.S. Modern quantum chemistry: introduction to advanced electronic structure theory. – New York: Dover, 1996. – 480 p.
29. Kutzelnigg W. Present and future trends in quantum chemical calculations // *Journal of Molecular Structure: THEOCHEM*. – 1988. – V. 181. – P. 33–54.
30. Møller C., Plesset M.S. Note on an approximation treatment for many-electron systems // *Physical Review*. – 1934. – V. 46. – P. 618–622.
31. Bartlett R.J. Recent Advances in Coupled-Cluster Methods. – Singapore: World Scientific, 1997. – 340 p.
32. Hohenberg P., Kohn W. Inhomogeneous electron gas // *Physical Review*. – 1964. – V. 136. – B864.
33. Kohn W., Sham L.J. Self-consistent equations including exchange and correlation effects // *Physical Review*. – 1965. – V. 140. – A1133.
34. Runge E., Gross E.K.U. Density-functional theory for time-dependent systems // *Physical Review Letters*. – 1984. – V. 52. – P. 997–1000.
35. Gross E.K.U., Kohn W. Local density-functional theory of frequency-dependent linear response // *Physical Review Letters*. – 1985. – V. 55. – P. 2850–2852.
36. Sadeghbeigi R. Fluid Catalytic Cracking Handbook: Design, Operation and Troubleshooting of FCC Facilities. 2nd ed. – Houston: Gulf Publishing Co., 2000. – 384 p.
37. Ivanchina E., Ivashkina E., Nazarova G. Mathematical modeling of catalytic cracking riser reactor // *Chemical Engineering Journal*. – 2017. – V. 329. – P. 262–274.
38. Kinetic model based on a molecular description for catalytic cracking of vacuum gas oil // I. Pitault, D. Nevicato, M. Forissier, J.R. Bernard // *Chemical Engineering Science*. – 1994. – V. 49. – P. 4249–4262.
39. A model of catalytic cracking: product distribution and catalyst deactivation depending on saturates, aromatics and resins content in feed // G. Nazarova, E. Ivashkina, E. Ivanchina, A. Vosmerikov, L. Vosmerikov, A. Antonov // *Catalysts*. – 2021. – V. 11. – P. 701–717.
40. Игнатов С.К. Квантовая химия- Химическая связь и теория молекул. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2016. – 136 p.
41. Stull D.R. The chemical thermodynamics of organic compounds. – New York: Wiley, 1969. – 865 p.
42. Stull D.R. The thermodynamic transformation of organic chemistry. // *American Scientist*. – 1971. – V. 59. – P. 734–743.
43. Integrated mathematical modeling of catalytic cracking and zeolite-containing catalyst oxidative regenerative // G. Nazarova, E. Ivashkina, E. Ivanchina, A. Oreshina, E. Vumyatnin, G. Burumbaeva // *Petroleum Science and Technology*. – 2020. – V. 38. – P. 754–762.

Поступила 15.07.2022 г.

Прошла рецензирование 14.10.2022 г.

#### Сведения об авторах

**Ивашкина Е.Н.**, доктор технических наук, профессор отделения химической инженерии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Форулан С.К.**, аспирант отделения химической инженерии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 66.01

## THERMODYNAMIC ANALYSIS OF FCC REACTIONS BASED ON FUNCTIONAL GROUPS IN HYDROCARBON MOLECULES AND QUANTUM CHEMISTRY FOR PRODUCTION OF LIGHT OLEFINS

Elena N. Ivashkina<sup>1</sup>,  
ivashkinaen@tpu.ru

Saba G. Foroutan<sup>1</sup>,  
Foroutan.Saba@hotmail.com

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance** of the article is caused by the growth of lower olefins consumption as valuable petrochemical feedstock and the development of technologies for their production, such as fluid catalytic cracking. The most popular petrochemical products are lower olefins, such as propylene, butylene. Every year, 400 million tons of olefins is produced from different technological ways. About 60 % of the world's crude oil is used in fluid catalytic cracking, with application of this technology 59 % of all olefins is produced globally. In accordance with the analysis of the current state of the oil refining and petrochemical industry, in order to increase the yield of olefins, it is indispensable deeply analyze fluid catalytic cracking process and reactions. The establishment of thermodynamic laws is the first step in the analysis of a chemical process.

**The main aim** of the research is to determine the influence of the structure of hydrocarbon isomers on thermodynamic parameters and probability of reactions with the aim of formation of unsaturated gaseous cracking products.

**Methods:** mathematical calculations based on the methods of functional groups including Constantinou–Gani and Joback and the quantum chemistry method done to analyze thermodynamic parameters such as enthalpy and Gibbs free energy of catalytic cracking reactions at various temperatures; assessment of the effectiveness of the methods was done based on the comparison of the mathematical calculation results with literature data.

**Results.** It was perceived that the influence of the structure of isomers on the thermodynamic laws of reactions is much more significant than the change of temperature of fluid catalytic cracking process. As a result of thermodynamic analysis, it was concluded that cracking such isomers is more preferable to obtain gaseous products: 1) 2,2,3-trimethylbutane for production of propylene; 2) 2-methylhexane, 3-methylhexane and 3-ethylpentane for production of propane and iso-butylene; 3) 1-octene for production of butylene. The above gaseous products are obtained by secondary cracking of hydrocarbons in the gasoline fraction. Thus, it is possible to achieve the maximum process selectivity for olefins by selecting the process conditions (temperature, contact time). It is concluded that the method of functional groups based on Constantinou–Gani accurately describes the thermodynamic laws of cracking reactions, but at the same time does not consider the transformation of non-aromatic compounds and the effect of variations cis- and trans-configurations in the molecular structure. Thus, in these cases it is recommended to use quantum chemistry methods.

### Key words:

catalytic cracking, thermodynamics, isomers, hydrocarbons, functional groups, quantum chemistry.

*The study was supported by the Russian Science Foundation grant no. 19-71-10015-P.*

### REFERENCES

1. *World Energy Model Documentation*. 2020. IEA Report. Available at: [https://iea.blob.core.windows.net/assets/fa87681d-73bd-4719-b1e569670512b614/WEM\\_Documentation\\_WEO2020.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/fa87681d-73bd-4719-b1e569670512b614/WEM_Documentation_WEO2020.pdf) (accessed 10 June 2022).
2. Alabdullah M., Gomez A.R., Vittenet J., Bendjtrious-Sedjerari A., Xu W., Abba A.I., Gascon J. A view on the refinery of the future: catalyst and process challenges. *ACS Catalysis*, 2020, vol. 10, pp. 8131–8140.
3. Oil 2021: analysis and forecast to 2026. 2021. *IEA Report*. Available at: [iea.org https://www.iea.org/reports/oil-2021](https://www.iea.org/reports/oil-2021) (accessed 10 June 2022).
4. Zacharopoulou V., Lemonidou A.A. Olefins from biomass intermediates: a review. *Catalysts*, 2017, vol. 8, pp. 2–21.
5. Corma A., Corresa E., Mathieu Y., Sauvanaud L., Al-Bogami S., Al-Ghrami M.S., Bourane A. Crude oil to chemicals: light olefins from crude oil. *Catalysis Science and Technology*, 2017, vol. 7, pp. 12–46.
6. Gholami Z., Gholami F., Tisler Z., Tomas M., Vakili M. A review on production of light olefins via fluid catalytic cracking. *Energies*, 2021, vol. 14, pp. 1089–1125.
7. Nazarova G. *Povyshenie effektivnosti protsessy kataliticheskogo krekninga vakuumnogo raspysleniya v lift-reaktore s primeneniye metoda matematicheskogo modelirovaniya*. Dis. Kand. nauk [Improving the efficiency of the process of catalytic cracking of vacuum distillate in a riser reactor using the method of mathematical modeling. Cand. Diss.]. Tomsk, 2020. 191 p.
8. Sedghi R.B. *Poluchenie propilena i legkikh olefinov v protsesse kataliticheskogo krekninga vakuumnogo distillyata*. Dis. Kand. nauk [Obtaining propylene and light olefins in the process of catalytic cracking of vacuum distillate. Cand. Diss.]. Moscow, 2013. 240 p.
9. Campos A.C.C., Azevedo dos Reis R., Ortiz A., Gorri D., Ortiz I. A perspective of solutions for membrane instabilities in olefin/paraffin separation: a review. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2018, vol. 57, pp. 10071–10085.
10. Jensen F. *Introduction to computational chemistry*. 3<sup>rd</sup> ed. New York, Wiley, 2001. 664 p.
11. Pitzer K.S. The vibration frequencies and thermodynamic functions of long chain hydrocarbons. *Journal of Chemical Physics*, 1940, vol. 8, pp. 711–720.
12. Pitzer K.S., Gwinn W.D. Energy levels and thermodynamic functions for molecules with internal rotation: I. Rigid frame with attached tops. *Journal of Chemical Physics*, 1942, vol. 10, pp. 428–440.
13. Franklin J.L. Prediction of heat and free energies of organic compounds. *Industrial and Engineering Chemistry*, 1949, vol. 41, pp. 1070–1079.

14. Van Krevelen D.W., Chermin H.A.G. Estimation of the free enthalpy (Gibbs free energy) of formation of organic compounds from group contributions. *Chemical Engineering Science*, 1951, vol. 1, pp. 66–80.
15. Stull D.R., Sinke G.C. Thermodynamic properties of the elements. *Advances in Chemistry Series*. Washington DC, American Chemical Society, 1956. 237 p.
16. Benson S.W., Buss J.H. Additivity rules for the estimation of molecular properties. Thermodynamic properties. *Journal of Chemical Physics*, 1958, vol. 29, pp. 546–572.
17. Verma K.K., Doraiswamy L.K. Estimation of heats of formation of organic compounds. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, 1965, vol. 4, pp. 389–396.
18. Rihani D.N., Doraiswamy L.K. Estimation of heat capacity of organic compounds from group contributions. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, 1965, vol. 4, pp. 17–21.
19. Thinh T.P., Duran J.L., Ramalho R.S. Estimation of ideal gas heat capacities of hydrocarbons from group contribution techniques. *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1971, vol. 10, pp. 576–582.
20. Joback K.G., Reid R.C. Estimation of pure-component properties from group-contributions. *Chemical Engineering Communications*, 1981, vol. 57, pp. 233–243.
21. Constantinou L., Gani R. New group contribution for estimating properties of pure compounds. *AIChE Journal*, 1994, vol. 40, pp. 1697–1710.
22. Coniglio L., Rauzy E., Berro C. Representation and prediction of thermophysical properties of heavy hydrocarbons. *Fluid Phase Equilibria*, 1993, vol. 87, pp. 53–88.
23. Coniglio L., Daridon J.L. A group contribution method for estimating ideal gas heat capacities of hydrocarbons. *Fluid Phase Equilibria*, 1997, vol. 139, – P. 15-35.
24. Schrödinger E. An undulatory theory of the mechanics of atoms and molecules. *Physical Review*, 1926, vol. 28, pp. 1049–1070.
25. Griffiths D.J. *Introduction to quantum mechanics*. 2<sup>nd</sup> ed. New Jersey, Pearson Prentice Hall, 2004. 480 p.
26. Shankar R. *Principles of quantum mechanics*. 2<sup>nd</sup> ed. New York, Kluwer Academic/Plenum Publishers, 1994. 453 p.
27. Born M., Oppenheimer R. Zur Quantentheorie der Molekeln [On the quantum theory of molecules]. *Annalen der Physik*, 1927, vol. 84, pp. 457–484.
28. Szabo A., Ostlund N.S. *Modern quantum chemistry: introduction to advanced electronic structure theory*. New York, Dover, 1996. 480 p.
29. Kutzelnigg W. Present and future trends in quantum chemical calculations. *Journal of Molecular Structure: THEOCHEM*, 1988, vol. 181, pp. 33–54.
30. Møller C., Plesset M.S. Note on an approximation treatment for many-electron systems. *Physical Review*, 1934, vol. 46, pp. 618–622.
31. Bartlett R.J. *Recent advances in coupled-cluster methods*. Singapore, World Scientific, 1997. 340 p.
32. Hohenberg P., Kohn W. Inhomogeneous electron gas. *Physical Review*, 1964, vol. 136, B864.
33. Kohn W., Sham L.J. Self-consistent equations including exchange and correlation effects. *Physical Review*, 1965, vol. 140, A1133.
34. Runge E., Gross E.K.U. Density-functional theory for time-dependent systems. *Physical Review Letters*, 1984, vol. 52, pp. 997–1000.
35. Gross E.K.U., Kohn W. Local density-functional theory of frequency-dependent linear response. *Physical Review Letters*, 1985, vol. 55, pp. 2850–2852.
36. Sadeghbeigi R. *Fluid catalytic cracking handbook: design, operation and troubleshooting of FCC facilities*. 2<sup>nd</sup> ed. Houston, Gulf Publishing Co., 2000. 384 p.
37. Ivanchina E., Ivashkina E., Nazarova G. Mathematical modeling of catalytic cracking riser reactor. *Chemical Engineering Journal*, 2017, vol. 329, pp. 262–274.
38. Pitault I., Nevicato D., Forissier M., Bernard J.R. Kinetic model based on a molecular description for catalytic cracking of vacuum gas oil. *Chemical Engineering Science*, 1994, vol. 49, pp. 4249–4262.
39. Nazarova G., Ivashkina E., Ivanchina E., Vosmerikov A., Vosmerikov L., Antonov A.A. A model of catalytic cracking: product distribution and catalyst deactivation depending on saturates, aromatics and resins content in feed. *Catalysts*, 2021, vol. 11, pp. 701–717.
40. Ignatov C.K., *Quantum chemistry – chemical bonding and theory of molecules*. Nizhny Novgorod, N.I. Lobachevsky Nizhny Novgorod State University, 2016. 136 p.
41. Stull D.R. *The chemical thermodynamics of organic compounds*, Wiley, New York, 1969. 865 p.
42. Stull D.R. The thermodynamic transformation of organic chemistry. *American Scientist*, 1971, vol. 59, pp. 734–743.
43. Nazarova G., Ivashkina E., Ivanchina E., Oreshina A., Vymyatnin E., Burumbaeva G. Integrated mathematical modeling of catalytic cracking and zeolite-containing catalyst oxidative regenerative. *Petroleum Science and Technology*, 2020, vol. 38, pp. 754–762.

Received: 15 July 2022.

Reviewed: 14 October 2022.

#### Information about the authors

**Elena N. Ivashkina**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Saba G. Foroutan**, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 622.245.6

## АНАЛИЗ И ВЫБОР ТАМПОНАЖНОЙ СМЕСИ, УСТОЙЧИВОЙ К ДИНАМИЧЕСКИМ НАГРУЗКАМ, С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ГЕРМЕТИЧНОСТИ КРЕПИ В ЗАТРУБНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

**Блинов Павел Александрович**<sup>1</sup>,  
Blinov\_PA@pers.spmi.ru

**Шаншеров Александр Владимирович**<sup>1</sup>,  
mr.shansherov@mail.ru

**Черемшанцев Данил Максимович**<sup>1</sup>,  
cheremshantsev@gmail.com

**Кузнецова Наталья Юрьевна**<sup>1</sup>,  
Kuznetsova\_NYu@pers.spmi.ru

**Никишин Вячеслав Валерьевич**<sup>1</sup>,  
Nikishin\_VV@pers.spmi.ru

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет,  
Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2.

*Качество крепления скважин является весьма актуальной проблемой в области цементирования скважин. В ходе разработки месторождения скважина подвергается как статическим, так и динамическим нагрузкам, при этом стоит отметить, что влияние динамической составляющей является более значимым, так как при разрушении цементного камня могут возникнуть осложнения, связанные с преждевременным обводнением скважины, а также велика вероятность заколонных перетоков. В работе рассмотрен анализ причин возникновения нарушения герметичности крепи скважин во время эксплуатации и подобран состав, повышающий прочностные характеристики цементного камня.*

**Актуальность.** Ввиду высокой сложности прогнозирования поведения горных пород с различными типами цементов часто возникают ситуации, связанные с негерметичностью ствола скважины, которые приводят к осложнениям и авариям, а это в свою очередь повышает стоимость работ и затраты на их ликвидацию. Существует ряд трудов, направленных на решение проблемы качества герметичности, но, несмотря на это, проблема не решена и остается актуальной и важной в этой области исследований.

**Цель:** разработать состав для цементирования скважины, обеспечивающий повышение качества крепления скважин в условиях динамических нагрузок.

**Методы.** Для решения поставленной цели был проведен литературный обзор зарубежных и отечественных источников. Проведены лабораторные испытания тампонажного раствора и цементного камня с добавлением эластомеров различной концентрации. Рассмотрены и применены методики определения модуля Юнга и коэффициента Пуассона тампонажного камня. Все исследования проводились в соответствии с ГОСТ 34532-19 «Цементы тампонажные. Методы испытаний», ГОСТ 28985-91 «Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии», ГОСТ 21153.3-85 «Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении».

**Результаты.** В ходе эксперимента были получены цементные растворы с добавками латекса и резиновой крошки разной фракции и концентрации. Установлено, что при рассматриваемых концентрациях снижается плотность раствора, повышается значение растекаемости, кроме раствора с концентрацией латекса 4 %, и происходит снижение его водоотделения. Установлено увеличение прочности на изгиб и растяжение для всех образцов. Определен состав цементной смеси, обладающий наилучшими показателями с содержанием 3 % латекса и 3 % резиновой крошки фракции 1–2 мм.

**Выводы.** Разработанный состав тампонажной смеси с добавлением эластомеров позволит повысить качество крепи и устойчивость к динамическим нагрузкам в процессе эксплуатации скважины.

### **Ключевые слова:**

качество крепления, динамические нагрузки, латекс, резиновая крошка, прочность цементного камня.

### **Введение**

Цементирование является завершающим этапом строительства скважин. Важно понимать, что качество цементирования влияет на дальнейшую эксплуатацию скважины. При некачественном цементировании герметичность заколонного пространства со временем ухудшается, а это в свою очередь приводит к различным осложнениям и авариям [1–5].

Исследования показали, что ремонтно-изоляционные работы по восстановлению герметичности затрубного пространства составляют около 25 % от общего числа всех работ, а их эффективность при этом не превышает 50 %. Следует понимать, что возникающие осложнения – заколонные перетоки и обводнение скважины – приводят к значительному ущербу для окружающей природной среды, а также к увеличению затрат на восстановление скважины. Чтобы предотвратить возможные осложнения, необходимо обра-

тить внимание на качество контакта «горная порода – цементный камень – металл».

Следует отметить, что в ходе работы были изучены материалы трудов следующих российских и зарубежных ученых: А.И. Булатова, Ф.А. Агзамова, Г.М. Саркисова, S. Stryczek, A. Gonet, G.W. Scherer, Hualin Liao, Zhichuan Guan и многих других исследователей, посвященные вопросам качества цементирования и герметичности колонны, а также причинам ухудшения прочностных свойств цементного камня [6–13].

Как известно, наибольшее влияние на качество крепления во время эксплуатации скважины оказывают процессы опрессовки, гидроразрыва пласта и перфорации [14]. Они в свою очередь вызывают динамические (ударные) нагрузки на цементный камень, которые приводят к его растрескиванию и разрушению [15]. Существуют технологии по снижению влияния ударных нагрузок на крепь скважины, направленные на уменьшение потери ее герметичности, которые к тому же увеличивают удароустойчивость. К этой технологии относятся добавление в тампонажный раствор таких добавок, как латекс, каучук, различные армирующие волокна, смолы, сферы и пр. Обзор литературы и патентов показал, что наиболее эффективными являются эластомеры и армирующие волокна. Авторы, занимающиеся похожими исследованиями, рассматривали различные реагенты, которые могут повысить удароустойчивость цемент-

ного камня [16–18]. Таким образом, основной идеей этой работы является возможность создания тампонажной смеси, которая увеличит сопротивляемость цементного камня к динамическим нагрузкам.

#### Методика испытания цементного раствора и камня

Все исследования проводились на базе Горного университета, в частности, в лабораториях тампонажных и буровых жидкостей в научном центре «Арктика» и в центре геомеханики. Так как в работе нет определенной привязки к месторождению и в целях упрощения большого числа экспериментов, в качестве условий для приготовления и выдержки цементного камня были выбраны следующие: температура 22 °С и давление 101708 Па.

В качестве вяжущего вещества был использован ПЦТ-I-50, который имеет относительно невысокую стоимость, температурный диапазон составляет 15–50 °С [19]. Жидкостью затворения является техническая вода, а в качестве рассматриваемых добавок были использованы два типа эластомеров различной концентрации, а именно латекс (концентрацией от 1,0 до 4,0 %), резиновая крошка размером фракции до 0,8 мм и крошка, средний размер частиц которой составлял не более 1–2 мм (концентрации крошки рассматривалась в диапазоне 1,5–4,5 %). На рис. 1 представлены используемые эластомеры.



**Рис. 1.** Рассматриваемые эластомеры: латекс, резиновая крошка фракции 0,8 мм, резиновая крошка фракции 1–2 мм  
**Fig. 1.** Considered elastomers: latex, rubber crumb of 0,8 mm fraction, rubber crumb of 1–2 mm fraction

Резиновая крошка для повышения адгезии к цементу перед проведением исследования обрабатывалась двухмолярным раствором NaOH в течение 20 минут при постоянном перемешивании, с последующей промывкой водой и сушкой при комнатной температуре. В качестве второй добавки в работе был рассмотрен полимерный латекс. Модификация цемента с помощью латекса позволяет увеличить прочность цемента за счет образования в процессе гидратации непрерывных пленок и мембран полимера [20–24]. Стоит отметить, что при высоких концентрациях латекса в структуре цемента могут образовываться разрывы, приводящие к ухудшению прочностных свойств цементного камня [25].

В работе предлагается рассмотреть 13 типов рецептур, их количество обоснованно видом добавки и ее процентным содержанием в составе. В двух рецептурах применялись несколько добавок, придающих

цементному камню оптимальные параметры. В таблице показано количество эластомера в процентах от массы чистого цемента при водосмесевом соотношении (В/С)=0,5.

Для определения плотности тампонажного раствора применяли плотномер Mud Balance 141 компании Fann, диапазон измерения данного оборудования составляет 0,75–2,6 г/см<sup>3</sup>. Растекаемость является важным параметром, который учитывается для оценки возможности прокачки цементного раствора. Определяли ее с помощью конуса АзНИИ. Удовлетворительными считаются значения от 180 до 250 мм. В связи с изучением влияния эластомеров в ходе работы необходимо определить водоотделение. Этот параметр показывает наличие свободной воды и ее отделение от цемента в процессе седиментации. Он определяется с помощью мерного цилиндра и рассчитывается как отношение выделившейся воды к общему объему раствора.

**Таблица.** Составы рецептур и их количество в смеси  
**Table.** Formulations and their quantity in the mixture

№ состава, Composition no.	Количество добавки-эластомера от массы сухого цемента, % Amount of elastomer additive by weight of dry cement, %		
	Ла- текс Latex	Резиновая крошка (≤0,8 мм) Rubber crumb (≤0,8 mm)	Резиновая крошка (1–2 мм) Rubber crumb (1–2 mm)
1	0	0	0
2	0	1,5	0
3	0	3	0
4	0	4,5	0
5	0	0	1,5
6	0	0	3
7	0	0	4,5
8	1	0	0
9	2	0	0
10	3	0	0
11	4	0	0
12	3	4,5	0
13	3	0	3

При рассмотрении прочностных характеристик цементного камня были определены прочности на сжатие ( $\sigma_{сж}$ ), на изгиб ( $\sigma_{и}$ ) и на растяжение ( $\sigma_{рас}$ ). Перед испытанием подготавливали образцы цементного камня заданных размеров в соответствии с ГОСТ 34532-19 и ГОСТ 21153.3-85. Для определения прочно-

сти на изгиб и сжатие применяли гидравлический пресс модели Controls 65-L1132, а для прочности на растяжение – прибор БУ-21 [26].

Для исследования упругих свойств тампонажного камня рассматривали модуль Юнга ( $E$ ) и коэффициент Пуассона ( $\mu$ ). Для их определения использовали сервогидравлическую машину модели MTS 816 [27]. Значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона рассчитывают по формулам (1), (2) в соответствии с ГОСТ 28985-91:

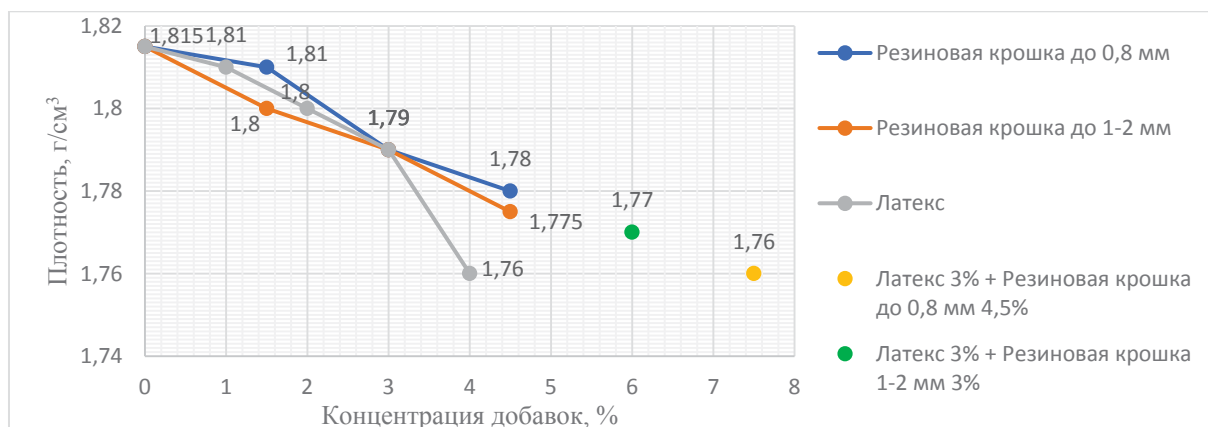
$$E = \frac{\sigma_m - \sigma_0}{\varepsilon_{1m} - \varepsilon_{10}}; \quad (1)$$

$$\mu = \frac{\varepsilon_{2m} - \varepsilon_{20}}{\varepsilon_{1m} - \varepsilon_{10}}; \quad (2)$$

где  $\sigma_m$  и  $\sigma_0$  – значения сжимающего напряжения в диапазоне частичной разгрузки образца;  $\varepsilon_{1m}$ ;  $\varepsilon'_{10}$ ;  $\varepsilon'_{20}$  и  $\varepsilon_{2m}$  – частные значения продольных и поперечных относительных деформаций при частичной разгрузке и пригрузке образца.

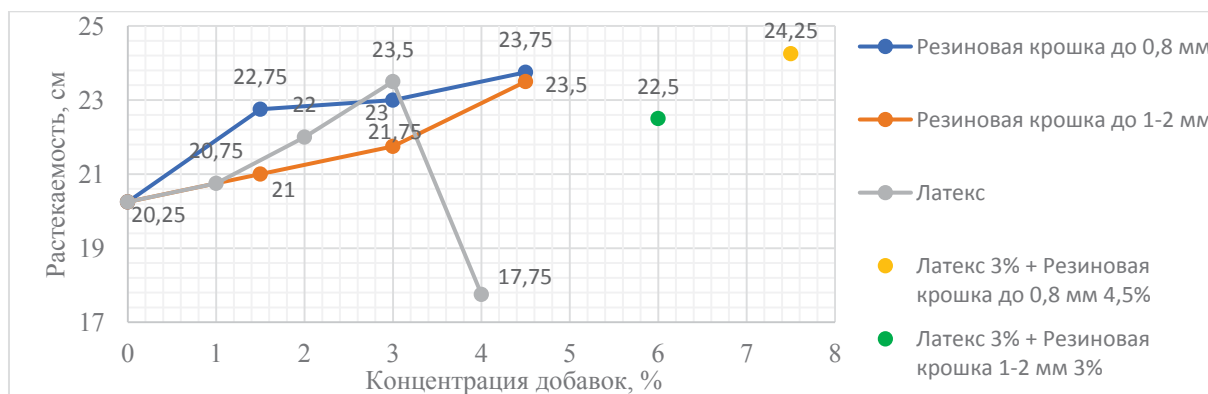
### Результаты исследования и их обсуждение

После приготовления тампонажного раствора необходимо измерить его значения плотности, растекаемости и водоотделения. На рис. 2–4 показаны данные параметры при различной концентрации эластомеров.



**Рис. 2.** График изменения плотности

**Fig. 2.** Density change graph



**Рис. 3.** График изменения растекаемости

**Fig. 3.** Flowability change graph

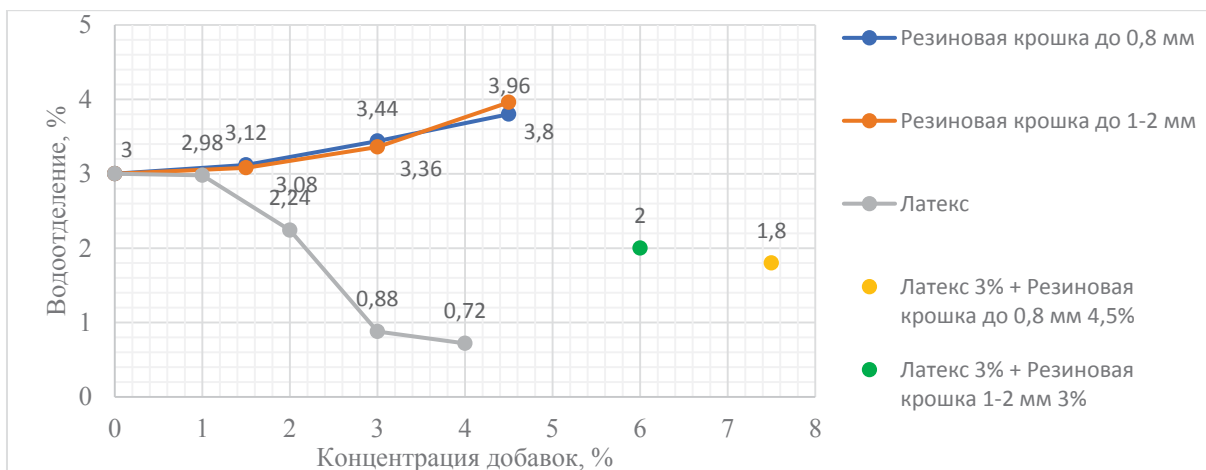


Рис. 4. График изменения водоотделения

Fig. 4. Water separation change graph

Из графиков следует, что при добавлении добавок-эластомеров плотность всегда понижается из-за того, что латекс и резина имеют куда меньшую плотность, чем базовый цемент. Растекаемость увеличивается во всех случаях, кроме состава № 11. При рассматриваемом значении концентрации 4 % латекс связывает свободную воду из дисперсионной системы и подвижность раствора уменьшается. Водоотделение

увеличивается при повышении концентраций резиновой крошки разных фракций.

После определения свойств цементного раствора были изготовлены образцы определенной формы с целью определения прочностных характеристик цементного камня. Все испытания образцов проводились после 48 часов выдержки в водяной бане. На рис. 5–7 показаны графики изменения прочности цементного камня при различных концентрациях эластомеров.

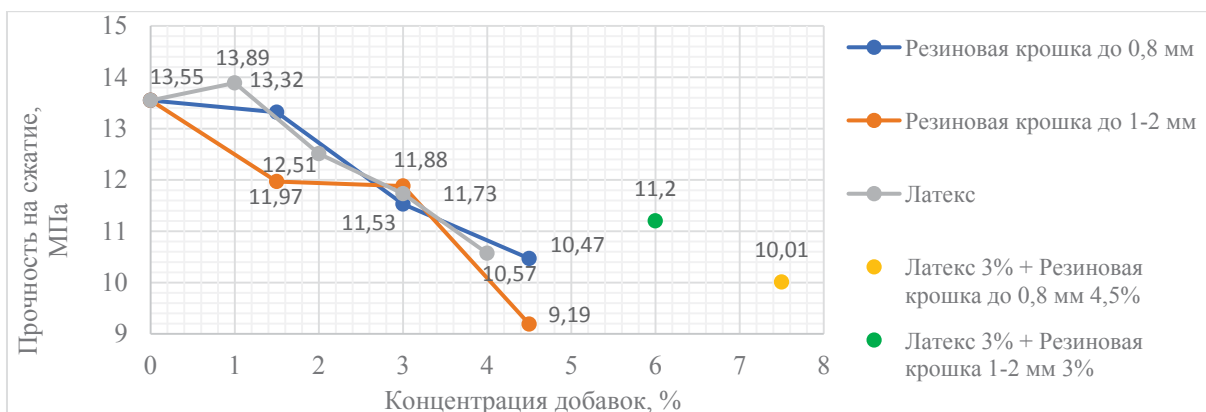


Рис. 5. График изменения прочности на сжатие

Fig. 5. Compressive strength change graph

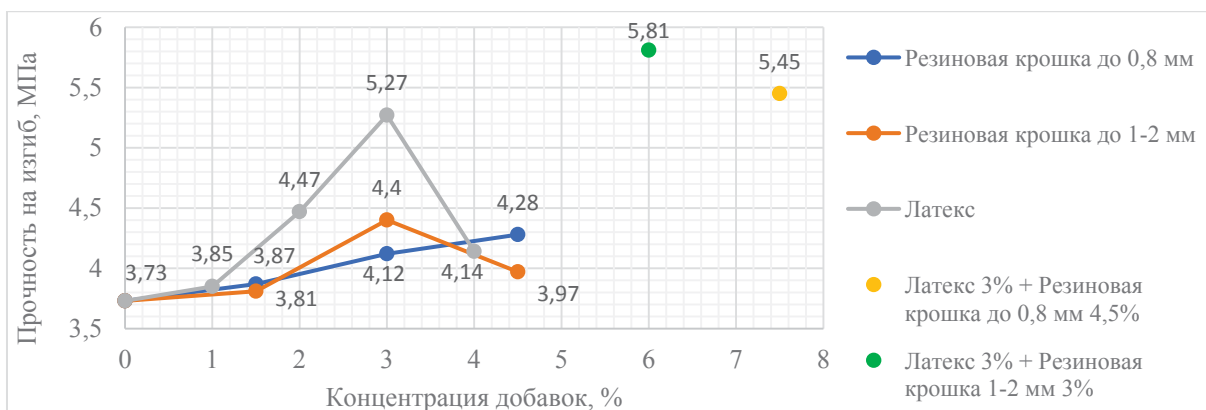
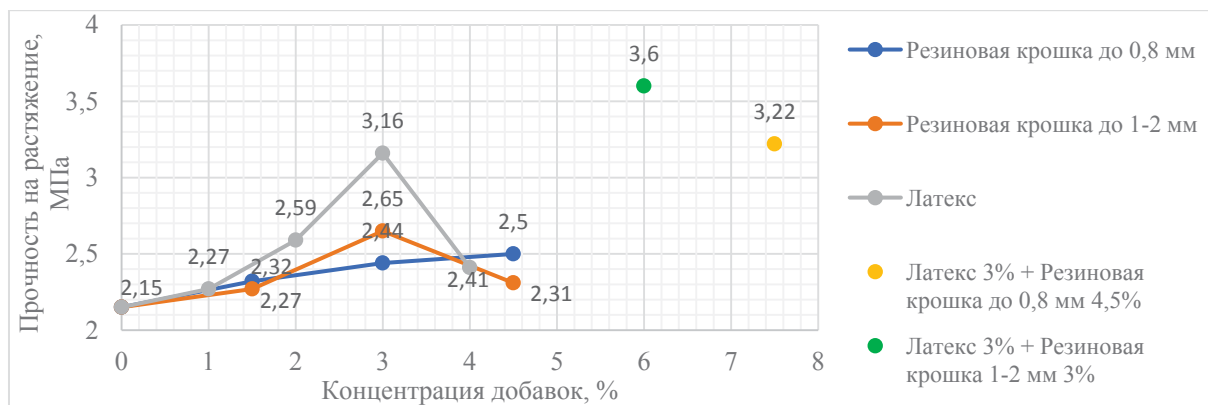


Рис. 6. График изменения прочности на изгиб

Fig. 6. Bending strength change graph



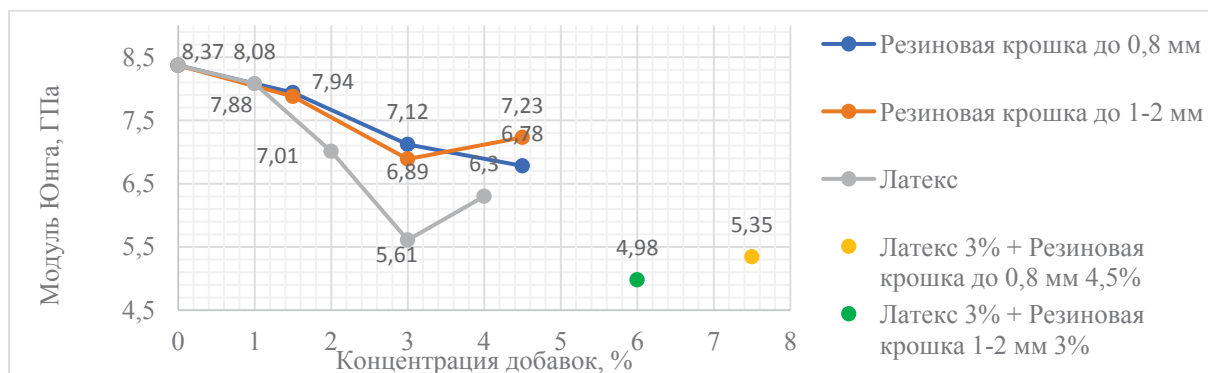
**Рис. 7.** График изменения прочности на растяжение  
**Fig. 7.** Tensile strength change graph

Так как все добавки имеют меньший удельный вес, по сравнению с чистым цементом, то его плотность и прочность на сжатие снижаются, исключением является цементный раствор с латексом концентрации 1 %. Резина является менее жесткой, чем цементный камень, и степень адгезии между резиновой крошкой и цементом также незначительна [28], вследствие этого прочность на сжатие уменьшается. Наибольшее снижение прочности на сжатие достигается при максимальных концентрациях эластомеров (резиновая крошка – 4,5 %, латекс – 4 %).

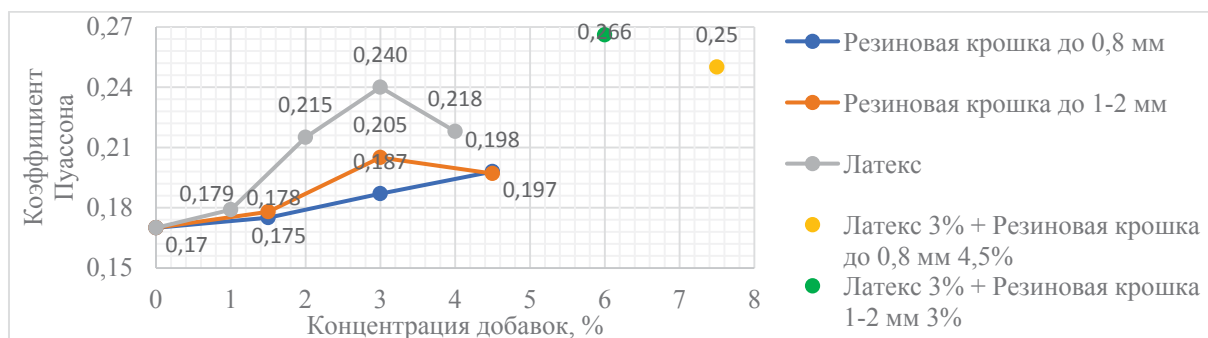
Прямой зависимости прочности на изгиб и растяжение от концентрации добавок не обнаружено, максимальные показатели были достигнуты при 3 %, за исключением резиновой крошки размером фракций

не более 0,8 мм. Следует отметить, что для этой добавки прочность постоянно увеличивалась с повышением концентрации, что в свою очередь приводит к устойчивому росту прочности. Резиновый материал восполняет внутренние недостатки тампонажного камня и увеличивает его эластичность, что вызывает рост прочности тампонажного камня на изгиб и растяжение [29–32]. Это создает предпосылки для дальнейших исследований с более высоким содержанием резиновой крошки малой фракции.

С целью изучения эластических характеристик цементного камня необходимо определить модуль Юнга и коэффициент Пуассона. На рис. 8, 9 представлены графики значений этих показателей при различной концентрации добавок.



**Рис. 8.** График изменения модуля Юнга  
**Fig. 8.** Young's modulus change graph



**Рис. 9.** График изменения коэффициента Пуассона  
**Fig. 9.** Poisson's ratio change graph



Из графиков следует, что все виды эластомеров приводят к улучшению упруго-эластичных свойств тампонажного камня, что подтверждается снижением модуля Юнга и повышением коэффициента Пуассона.

Изменение исследуемых показателей обусловлено большей эластичностью матрицы тампонажного камня за счет добавления резиновой крошки и латекса, что допускает дополнительную упругую деформацию без снижения прочностных характеристик.

Уменьшение показателей при определенных концентрациях связано со снижением прочностных характеристик, которые использовались при расчете коэффициентов эластичности.

На рис. 2–9 отмечены два состава, которые имеют наилучшие параметры при добавлении двух добавок эластомеров в раствор.

#### Заключение

В статье изложены результаты аналитического обзора современного состояния проблемы потери герметичности затрубного пространства скважин, связанные с повышенными динамическими нагрузками на крепь скважины, которые создаются главным образом при проведении операций по перфорации, ГРП и опрессовке.

На основе анализа были приведены существующие решения по увеличению сопротивляемости тампонажного камня динамическим нагрузкам с целью предотвращения потери герметичности затрубного пространства скважин за счет добавления в тампонажную смесь армирующих волокон и эластомеров.

Проведенные исследования основаны на изучении изменения свойств тампонажного раствора и камня за счет добавления в его состав эластомеров. В резуль-

тате были получены данные по их влиянию на такие свойства тампонажного раствора, как плотность, растекаемость и водоотделение. Испытания показали, что все использованные эластомеры приводят к снижению плотности раствора и увеличению его растекаемости (за исключением состава с добавкой 4 % латекса), увеличению водоотделения для составов с резиновой крошкой и уменьшению водоотделения для составов с латексом. Для тампонажного камня определены прочностные характеристики (сжатие, изгиб и растяжение), характеристики эластичности (модуль Юнга и коэффициент Пуассона). По результатам экспериментов выявлено положительное влияние предложенных добавок на упруго-прочностные свойства тампонажного камня, что, в свою очередь, подтверждает теоретические исследования о характере изменения прочностных показателей тампонажных составов при добавлении эластомеров. Выявлены оптимальные концентрации предложенных добавок, позволяющие получить наилучшие упруго-прочностные характеристики:

- 1) резиновая крошка фракцией до 0,8 мм с концентрацией 4,5 % и латекс 3 %;
- 2) резиновая крошка фракцией 1–2 мм с концентрацией 3 % и латекс 3 %.

Полученные данные свидетельствуют о перспективах дальнейших исследований влияния эластомеров за счет изучения свойств тампонажного камня при более длительном выдерживании образцов и повышенных термобарических условиях. Кроме этого, необходимо оценить такие факторы, как их влияние на время загустевания, сроки схватывания, проницаемость и усадку (расширение) тампонажной смеси.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агзамов Ф.А., Белоусов А.О. Комплексный подход к предупреждению нарушения герметичности затрубного пространства скважин при вторичном вскрытии и ГРП // Нефтяная провинция. – 2019. – № 1. – С. 197–214.
2. Targosz-Korecka M. et al. Effect of selected B-ring-substituted oxysterols on artificial model erythrocyte membrane and isolated red blood cells // *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Biomembranes*. – 2020. – V. 1862. – № 2. – P. 183067.
3. Kremieniewski M. et al. Possibilities of limiting migration of natural gas in boreholes in the context of laboratory studies // *Energies*. – 2021. – V. 14. – № 14. – P. 4251.
4. Ахметвалиев Н.Н. Прочностные характеристики полимерцементного вяжущего // *Электронный научный журнал*. – 2019. – С. 28–31.
5. Блинов П.А. и др. Обоснование использования смол для улучшения упруго-прочностных свойств цементного камня и сравнительная оценка с существующими технологическими решениями // *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*. – 2021. – № 9. – С. 31–36.
6. Gupta T., Chaudhary S., Sharma R.K. Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate // *Construction and Building Materials*. – 2014. – V. 73. – P. 562–574.
7. Буглов Н.А., Бутакова Л.А., Буланов Н.С. Влияние микрокремнезема на физические свойства тампонажного камня // *Науки о Земле и недропользование*. – 2019. – Т. 42. – № 2 (67). – С. 201–208.
8. Булатов А.И. Что представляет собой зацементированное колонное пространство // *Бурение и нефть*. – 2016. – № 6. – С. 30–35.
9. Гасумов Р.А., Минченко Ю.С. Повышение качества цементирования скважин применением дисперсно-армированных тампонажных материалов // *Нефтепромысловое дело*. – 2016. – № 8. – С. 53–57.
10. Гнибидин В.Н. Результаты исследований в области предотвращения потери герметичности затрубного пространства скважин в результате воздействия статических и динамических нагрузок // *Булатовские чтения*. – 2017. – Т. 3. – С. 54–59.
11. Долгих Л.Н. Крепление, испытание и освоение нефтяных и газовых скважин. – Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2007. – 189 с.
12. Зварыгин В.И. Тампонажные смеси. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014. – 216 с.
13. Ишбаев Г.Г. и др. Разработка тампонажных материалов повышенной ударной прочности // *Бурение и нефть*. – 2015. – № 9. – С. 38–41.
14. Dvoynikov M.V., Kuchin V.N., Mintzaev M.Sh. Development of viscoelastic systems and technologies for isolating water-bearing horizons with abnormal formation pressures during oil and gas wells drilling // *Journal of Mining Institute*. – 2021. – V. 247. – P. 57–65. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.7
15. Киямов И.К. и др. К вопросу разработки наномодифицированного цемента для тампонажа скважин // *Нефтяная провинция*. – 2015. – № 4. – С. 70–79.
16. Латыпов Р.Ф. Исследование и разработка технологий дифференцированной водоизоляции продуктивных пластов при капитальном ремонте скважин: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Тюмень, 2000. – 22 с.
17. Scherer G.W. Stress from crystallization of salt // *Cement and concrete research*. – 2004. – V. 34. – № 9. – P. 1613–1624.
18. Liu X. et al. A coupled thermo-hydrologic-mechanical (THM) model to study the impact of hydrate phase transition on reservoir damage // *Energy*. – 2021. – V. 216. – P. 119222.

19. Li C. et al. A new method to protect the cementing sealing integrity of carbon dioxide geological storage well: an experiment and mechanism study // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2020. – V. 236. – P. 107213.
20. Kadochnikov V.G., Dvoynikov M.V. Development of Technology for Hydromechanical Breakdown of Mud Plugs and Improvement of Well Cleaning by Controlled Buckling of the Drill String // *Appl. Sci.* – 2022. – V. 12. – 6460.
21. Baghini M.S. et al. Effect of styrene-butadiene copolymer latex on properties and durability of road base stabilized with Portland cement additive // *Construction and Building Materials*. – 2014. – V. 68. – P. 740–749.
22. Wang R., Wang P.M., Yao L.J. Effect of redispersible vinyl acetate and versatate copolymer powder on flexibility of cement mortar // *Construction and Building Materials*. – 2012. – V. 27. – № 1. – P. 259–262.
23. Рамачандран В.С. и др. Добавки в бетон: справ. пособие / под ред. В.С. Рамачандрана / пер с англ. Т.И. Розенберг, С.А. Болдырева / под ред. А.С. Болдырева, В.Б. Ратинова. – М.: Стройиздат, 1988. – 575 с.
24. Рябоконт С.А., Новохатский Д.Ф. Влияние опрессовки обсадных колонн на качество крепления скважин // *Нефтяное хозяйство*. – 2003. – № 9. – С. 41–43.
25. Hou D., Yu J., Wang P. Molecular dynamics modeling of the structure, dynamics, energetics and mechanical properties of cement-polymer nanocomposite // *Composites. B: Engineering*. – 2019. – V. 162. – P. 433–444.
26. Самсыкин А.В. и др. Методика расчета различных динамических нагрузок на крепь скважины // *Нефтегазовое дело*. – 2007. – Т. 5. – № 1. – С. 46–51.
27. Сафиуллин И.К., Комлева С.Ф. Повышение удароустойчивости цементного камня к динамическим нагрузкам методом фиброармирования тампонажных материалов // *Нефтяная провинция*. – 2016. – № 1. – С. 73–82.
28. Bisht K., Ramana P.V. Evaluation of mechanical and durability properties of crumb rubber concrete // *Construction and building materials*. – 2017. – V. 155. – P. 811–817.
29. Early assessment of seismic hazard in terms of Voronezh massif-Moscow Depression contact / I. Movchan, A. Yakovleva, A. Movchan, Z. Shaygallyamova // *Mining of Mineral Deposits*. – 2021. – V. 15. – P. 62–70.
30. Sadykov M.I., Blinov P.A., Nutskova M.V. Use of the water-swallowable polymers (WSP) for wellbore stabilization in intensely fractured rock intervals // *E3S Web of Conferences*. – 2021. – V. 266. – P. 01013.
31. Segre N., Joekes I. Use of tire rubber particles as addition to cement paste // *Cement and concrete research*. – 2000. – V. 30. – № 9. – P. 1421–1425.
32. Yilmaz A., Degirmenci N. Possibility of using waste tire rubber and fly ash with Portland cement as construction materials // *Waste management*. – 2009. – V. 29. – № 5. – P. 1541–1546.
33. Properties of cement-based composites using nanoparticles: a comprehensive review / S.C. Paul, A. van Rooyen, G. van Zijl, L.F. Petrik // *Construction and Building Materials*. – 2018. – V. 189. – P. 1019–1034.

Поступила 02.06.2022 г.

Прошла рецензирование 22.09.2022 г.

#### Информация об авторах

**Блинов П.А.**, кандидат технических наук, доцент кафедры бурения скважин Санкт-Петербургского горного университета.

**Черемшанцев Д.М.**, магистрант кафедры бурения скважин Санкт-Петербургского горного университета.

**Шаньшиеров А.В.**, аспирант кафедры бурения скважин Санкт-Петербургского горного университета.

**Кузнецова Н.Ю.**, кандидат технических наук, доцент кафедры бурения скважин Санкт-Петербургского горного университета (совместитель).

**Никишин В.В.**, кандидат технических наук, доцент кафедры бурения скважин Санкт-Петербургского горного университета.

UDC 622.245.6

## ANALYSIS AND SELECTION OF A GROUTING MIXTURE, RESISTANT TO DYNAMIC LOADS, IN ORDER TO IMPROVE THE SUPPORT TIGHTNESS QUALITY IN THE ANNULUS

**Pavel A. Blinov**<sup>1</sup>,  
Blinov\_PA@pers.spmi.ru

**Aleksandr V. Shansherov**<sup>1</sup>,  
mr.shansherov@mail.ru

**Daniil M. Cheremshantsev**<sup>1</sup>,  
cheremshantsev@gmail.com

**Natalia Yu. Kuznetsova**<sup>1</sup>,  
Kuznetsova\_NYu@pers.spmi.ru

**Vyacheslav V. Nikishin**<sup>1</sup>,  
Nikishin\_VV@pers.spmi.ru

<sup>1</sup> St. Petersburg Mining University,  
21 line 2, Vasilievsky Island, St. Petersburg, 199106, Russia.

The quality of well anchoring is a very urgent problem in the field of well cementing. During the development of the field, the well is subjected to both static and dynamic loads, while it is worth noting that the influence of the dynamic component is more significant, since when the cement stone is destroyed, complications associated with premature watering of the well may occur, and overflows may occur. The paper considers the analysis of the causes of the well support tightness breach during operation and selects a composition that increases cement stone strength characteristics.

**Relevance.** The quality of well cementing is an urgent problem today. Due to the high complexity of predicting the behavior of rocks with various types of cements, situations related to the leakiness of the borehole often arise. They lead to complications and accidents, and this in its turn increases the cost of work and the cost of their elimination. There are many works aimed at solving the problem of tightness quality, but despite this, the problem has not been solved and remains relevant and important in this field of research.

**Purpose:** to develop the composition of a grouting mixture with high resistance to various loads to increase the strength characteristics of cement stone, in addition, it is necessary to consider the most promising additives, in particular, elastomers; to investigate their influence on the basic properties of cement mortar and stone.

**Methods.** To achieve this goal, a literary review of foreign and domestic researchers was conducted. Laboratory tests of grouting mortar and cement stone with the addition of various concentrations of elastomer additives were carried out. The methods of determining the Young's modulus and the Poisson's ratio of the grouting stone are considered and applied. All studies were conducted in accordance with SS 34532-19 «Grouting cements. Test methods», SS 28985-91 «Mountain rocks. Method for determining deformation characteristics under uniaxial compression», SS 21153.3-85 «Mountain rocks. Methods for determining the tensile strength at uniaxial tension».

**Results.** During the experiment, cement mortars with additives: latex and rubber crumb of different fractions (concentrations differ), were obtained. It was found that at the concentrations under consideration, the density of the solution decreases, the spreadability value increases, except for the concentration of 4 % latex, and the water separation of the solution with the addition of latex decreases. There was an increase in flexural and tensile strength for all samples. The composition of the cement mixture with the best indicators of the content of 3 % latex and 3 % rubber crumb fractions of 1–2 mm was determined.

**Conclusions.** The developed composition of the grouting mixture with the addition of elastomers improves the quality of the support and has high resistance to dynamic loads during well operation.

### Key words:

fastening quality, dynamic loads, latex, rubber crumb, cement stone strength.

### REFERENCES

1. Agzamov F.A., Belousov A.O. An integrated approach to the prevention of breach of the tightness of the annular space of wells during secondary opening and hydraulic fracturing. *Oil province*, 2019, no. 1, pp. 197–214. In Rus.
2. Targosz-Korecka M. Effect of selected B-ring-substituted oxysterols on artificial model erythrocyte membrane and isolated red blood cells. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Biomembranes*, 2020, vol. 1862, no. 2, pp. 183067.
3. Kremieniewski M. Possibilities of limiting migration of natural gas in boreholes in the context of laboratory studies. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 14, pp. 4251.
4. Akhmetvaliyev N.N. Prochnostnye kharakteristiki polimertsementnogo vyazhushchego [Strength characteristics of polymer-cement binder]. *Studencheskiy forum: nauchnyy zhurnal*, 2019, no. 2 (53), pp. 28–31.
5. Blinov P.A. Justification of the use of resins to improve the elastic-strength properties of cement stone and a comparative assessment with existing technological solutions. *Construction of oil and gas wells on land and at sea*, 2021, no. 9, pp. 31–36. In Rus.
6. Gupta T., Chaudhary S., Sharma R.K. Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 2014, vol. 73, pp. 562–574.
7. Buglov N.A., Butakova L.A., Bulanov N.S. The effect of microsilicon on the physical properties of grouting stone. *Earth sciences and subsoil use*, 2019, vol. 42, no. 2 (67), pp. 201–208. In Rus.
8. Bulatov A.I. What is a cemented backwater space. *Drilling and oil*, 2016, no. 6, pp. 30–35. In Rus.
9. Gasumov R.A., Minchenko Yu.S. Improving the quality of well cementing using dispersed-reinforced grouting materials. *Oilfield business*, 2016, no. 8, pp. 53–57. In Rus.

10. Gnibidin V.N. Results of research in the field of preventing the loss of tightness of the annular space of wells as a result of the impact of static and dynamic loads. *Bulatovskie readings*, 2017, vol. 3, pp. 54–59. In Rus.
11. Dolgikh L.N. *Kreplenie, ispytanie i osvoenie neftyanykh i gazovykh skvazhin* [Fixing, testing and development of oil and gas wells]. Perm, Perm State technical University Publ., 2007. 189 p.
12. Zvarygin V.I. *Tamponazhnye smesi* [Cement mixtures]. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2014. 216 p.
13. Ishbaev G.G. Development of grouting materials of increased impact strength. *Drilling and oil*, 2015, no. 9, pp. 38–41.
14. Dvoynikov M.V., Kuchin V.N., Mintzaev M.Sh. Development of viscoelastic systems and technologies for isolating water-bearing horizons with abnormal formation pressures during oil and gas wells drilling. *Journal of Mining Institute*, 2021, vol. 247, pp. 57–65. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.7
15. Kiyamov I.K. On the issue of the development of nanomodified cement for well grouting. *Oil province*, 2015, no. 4, pp. 70–79. In Rus.
16. Latypov R.F. *Issledovanie i razrabotka tekhnologii differentsirovannoy vodoizolyatsii produktivnykh plastov pri kapitalnom remonte skvazhin*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Research and development of technologies for differentiated water isolation of productive formations during the overhaul of wells. Cand. Diss. Abstract]. Tyumen, 2000. 22 p.
17. Scherer G.W. Stress from crystallization of salt. *Cement and concrete research*, 2004, vol. 34, no. 9, pp. 1613–1624.
18. Liu X. A coupled thermo-hydrologic-mechanical (THM) model to study the impact of hydrate phase transition on reservoir damage. *Energy*, 2021, vol. 216, pp. 119222.
19. Li C. A new method to protect the cementing sealing integrity of carbon dioxide geological storage well: an experiment and mechanism study. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, vol. 236, pp. 107213.
20. Kadochnikov V.G., Dvoynikov M.V. Development of technology for hydromechanical breakdown of mud plugs and improvement of well cleaning by controlled buckling of the drill string. *Appl. Sci.*, 2022, vol. 12, 6460.
21. Baghini M.S. Effect of styrene-butadiene copolymer latex on properties and durability of road base stabilized with Portland cement additive. *Construction and Building Materials*, 2014, vol. 68, pp. 740–749.
22. Wang R., Wang P.M., Yao L.J. Effect of redispersible vinyl acetate and versatate copolymer powder on flexibility of cement mortar. *Construction and Building Materials*, 2012, vol. 27, no. 1, pp. 259–262.
23. Ramachandran V.S. *Dobavki v beton: spravocnoye posobie* [Additives in concrete: reference manual]. Ed. by V.S. Ramachandran. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988. 575 p.
24. Ryabokon S.A., Novokhatsky D.F. The influence of casing crimping on the quality of well anchoring. *Oil industry*, 2003, no. 9, pp. 41–43.
25. Hou D., Yu J., Wang P. Molecular dynamics modeling of the structure, dynamics, energetics and mechanical properties of cement-polymer nanocomposite. *Composites. P. B: Engineering*, 2019, vol. 162, pp. 433–444.
26. Samsykin A.V. Method of calculation of various dynamic loads on the well support. *Oil and gas business*, 2007, vol. 5, no. 1, pp. 46–51. In Rus.
27. Safullin I.K., Komleva S.F. Increasing the impact resistance of cement stone to dynamic loads by the method of fiber reinforcement of grouting materials. *Oil province*, 2016, no. 1, pp. 73–82. In Rus.
28. Bisht K., Ramana P.V. Evaluation of mechanical and durability properties of crumb rubber concrete. *Construction and building materials*, 2017, vol. 155, pp. 811–817.
29. Movchan I., Yakovleva A., Movchan A., Shaygallyamova Z. Early assessment of seismic hazard in terms of Voronezh massif-Moscow Depression contact. *Mining of Mineral Deposits*, 2021, vol. 15, pp. 62–70.
30. Sadykov M.I., Blinov P.A., Nutskova M.V. Use of the water-swallowable polymers (WSP) for wellbore stabilization in intensely fractured rock intervals. *E3S Web of Conferences*, 2021, vol. 266, pp. 01013.
31. Segre N., Joekes I. Use of tire rubber particles as addition to cement paste. *Cement and concrete research*, 2000, vol. 30, no. 9, pp. 1421–1425.
32. Yilmaz A., Degirmenci N. Possibility of using waste tire rubber and fly ash with Portland cement as construction materials. *Waste management*, 2009, vol. 29, no. 5, pp. 1541–1546.
33. Paul S.C., Van Rooyen A., Van Zijl G., Petrik L.F. Properties of cement-based composites using nanoparticles: a comprehensive review. *Construction and Building Materials*, 2018, vol. 189, pp. 1019–1034.

Received: 2 June 2022.

Reviewed: 22 September 2022.

#### Information about the authors

**Pavel A. Blinov**, Cand. Sc., associate professor St. Petersburg Mining University.

**Daniil M. Cheremshantsev**, master's student St. Petersburg Mining University.

**Aleksandr V. Shansherov**, postgraduate student St. Petersburg Mining University.

**Natalia Yu. Kuznetsova**, Cand. Sc., associate professor St. Petersburg Mining University.

**Vyacheslav V. Nikishin**, Cand. Sc., associate professor St. Petersburg Mining University.

УДК 661.965:330.15

## ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АВТОНОМНОГО КОМПЛЕКСА ПО ПРОИЗВОДСТВУ «ЗЕЛЁНОГО» ВОДОРОДА И ЕЁ АПРОБАЦИЯ НА ПРИМЕРЕ МОНГОЛИИ И ЯПОНИИ

Попов Сергей Петрович<sup>1</sup>,  
popovsp@isem.irk.ru

Шакиров Владислав Альбертович<sup>1</sup>,  
shakirov@isem.irk.ru

Колосницын Антон Васильевич<sup>1</sup>,  
kolosnitsyn@isem.irk.ru

Максакова Дарья Владимировна<sup>1</sup>,  
maksakova@isem.irk.ru

Балдынов Олег Александрович<sup>1</sup>,  
oabaldynov@isem.irk.ru

<sup>1</sup> Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,  
Россия, 664033, г. Иркутск, пр. Лермонтова, 130.

**Актуальность.** Представлена технико-экономическая модель комплекса по производству сжиженного водорода с энергообеспечением исключительно от возобновляемых источников энергии. Модель позволяет проводить сравнение технико-экономических показателей производства «зелёного» сжиженного водорода в различных локациях, учитывая их природно-климатические и технико-экономические условия. Особенностью предлагаемой модели является рассмотрение основных технологических процессов производства, преобразования и хранения водорода с учетом годового почасового профиля возможной генерации энергии возобновляемыми источниками и графика отгрузки сжиженного водорода в качестве товарной продукции. Использование модели актуально на стадии предпроектных исследований по созданию водородных производств в регионах, имеющих высокий потенциал ВИЭ, но при этом удаленных от электротранспортной инфраструктуры; позволит повысить обоснованность оценок для принятия инвестиционных решений.

**Цель:** разработать технико-экономическую модель такого комплекса и осуществить проверку её работоспособности на примере оценки нормированной стоимости производства «зелёного» сжиженного водорода для выбранных локаций в Монголии и Японии.

**Объекты:** автономный комплекс по производству «зелёного» водорода.

**Методы.** Основу модели составляет оптимизационная задача математического программирования, решение которой позволяет определить уровень и структуру затрат на производство сжиженного водорода с использованием солнечной и ветровой энергии.

**Результаты.** Для проверки работоспособности модели были получены сравнительные оценки нормированной стоимости производства товарной продукции – 10 тыс. т/год сжиженного «зелёного» водорода для локаций в Монголии (восточное побережье оз. Хубсугул) и Японии (прибрежные районы префектуры Ямагата), составляющие соответственно 10,8 и 13,4 \$ /кг.

### Ключевые слова:

Возобновляемые источники энергии, водородные технологии, сжиженный водород, технико-экономическая модель, стоимостные оценки.

### Введение

Увеличение доли возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в конечном энергопотреблении является одним из ключевых направлений трансформации систем энергоснабжения [1, 2]. Производимый методом электролиза воды при использовании исключительно энергии ВИЭ так называемый «зелёный» водород позволяет решать ряд проблем, возникающих вследствие стохастического режима генерации солнечными и ветровыми электростанциями (соответственно СЭС, ВЭС). Это обуславливает актуальность исследований широкого спектра технологий, связанных с применением водорода в качестве энергоносителя.

В зависимости от природно-климатических условий выработка ВИЭ для различных локаций существенно отличается, что оказывает влияние на конечную стоимость производимого товарного продукта – «зелёного» водорода. При проведении предпроектных

исследований по размещению автономных комплексов по производству «зелёного» водорода (КПЗВ) возникает задача оценки стоимости продукции таких производств для изолированных от энергосистемы локаций.

Возможности создания крупных КПЗВ связаны с коммерциализацией технологий производства и транспортировки сжиженного водорода (LH<sub>2</sub>, от англ. liquefied hydrogen). Сжижение водорода используется для увеличения плотности водородоносителя (предлагается английский эквивалент этого термина *hyder*, от hydrogen carrier), что позволяет повысить эффективность его хранения и транспортировки. Данные технологии достаточно отработаны [3, 4] и применяются преимущественно в ракетно-космической отрасли. Дополнительным преимуществом сжиженного водорода является возможность его непосредственного использования потребителями, например, в транс-

портном секторе. Недостатки  $\text{LH}_2$  как водородоносителя включают значительную потребность в энергии для его сжижения, необходимость поддержания сверхнизких криогенных температур (20 °К), потери при длительном хранении и транспортировке, наличие рисков утечки и возгорания.

К настоящему времени выполнено множество исследований, посвящённых внедрению ВИЭ в системы энергоснабжения потребителей с производством водорода методом электролиза воды. Согласно базе данных научных исследований «Science Digest» в период с января 2020 г. по октябрь 2021 г. было опубликовано около 4700 работ, касающихся темы производства водорода на основе ВИЭ. Анализируются технологические решения в области производства, хранения и транспортировки водорода, рассматривается развитие и функционирование электро-водородных систем.

В то же время тематика производства «зелёного» сжиженного водорода охвачена в меньшей степени. В статье [5] представлена сравнительная стоимостная и экологическая оценка производства сжиженного водорода и аммиака с их последующей транспортировкой из Норвегии до мест потребления в Роттердаме и Токио. Рассмотрение производства водорода методом электролиза воды ограничено укрупнённой оценкой потребляемой электроэнергии и необходимых затрат без детального рассмотрения процесса производства сжиженного водорода. В работе [6] предложена многопродуктовая модель производства сжиженного водорода, диоксида углерода и кислорода. Проведена эксергетическая и экономическая оценка данной системы. В качестве её недостатков названы дефицит генерируемой мощности солнечной электростанцией в пасмурный зимний сезон и необходимость наличия резервуаров большого объема для хранения сжиженного водорода.

В работах [7, 8] представлена финансовая и экологическая оценка различных способов производства и доставки водорода. В обоих исследованиях авторы отмечают, что, несмотря на высокий объем капитальных и операционных затрат, производство «зелёного» сжиженного водорода на основе солнечной энергии обладает энергетической и экологической эффективностью.

В исследовании [9] предложена новая система хранения сжиженного водорода, которая может быть использована при его транспортировке в авто- и железнодорожных цистернах и морскими судами (танкерах  $\text{LH}_2$ ). В работе [10] на основе анализа цепочки создания стоимости водорода дается оценка его конкурентоспособности в различных сегментах транспортного сектора. Сделан вывод о перспективе использования водорода в продукции военного назначения, для которой критерий экономической эффективности не является определяющим.

Имеется ряд исследований в области функционирования и оптимизации состава оборудования комплексов по производству водорода на основе ВИЭ, в том числе с почасовой детализацией. Однако в большинстве рассмотренных работ [11–18] водород пози-

ционируется не как самостоятельный энергоноситель, а как инструмент обеспечения баланса между генерацией и потреблением электрической и тепловой энергии. Таким образом, предполагается, что энергоснабжение потребителей осуществляется на незначительном удалении от ВИЭ.

На наш взгляд, расширить границы исследований в области автономных КПЗВ можно за счёт методологического подхода, предусматривающего описание совместного функционирования трёх основных технологических систем комплекса – физико-химической (производство водорода методом электролиза воды), теплофизической (производство водородоносителя  $\text{LH}_2$ ) и электроэнергетической на основе ВИЭ, полностью обеспечивающей энергопотребление комплекса. Такая постановка задачи оптимизационного моделирования будет востребована на стадии предпроектных исследований по созданию водородных производств в регионах, имеющих высокий потенциал ВИЭ, но при этом удаленных от электроэнергетической инфраструктуры. Назначение технико-экономических моделей для рассматриваемых технологий производства водородоносителей (в данном случае – сжиженного водорода) и технологий генерации электроэнергии ВИЭ состоит в обосновании затрат на получение товарной продукции в течение календарного года. Использование доступной многолетней природно-климатической информации для расчёта почасового годового профиля, характеризующего потенциал использования ВИЭ, позволяет повысить обоснованность оценок для принятия инвестиционных решений.

Таким образом, в данной работе на укрупнённом технико-экономическом уровне моделирования автономного КПЗВ описываются взаимосвязи элементов системы генерации электроэнергии ВИЭ и водородных технологий вплоть до заключительного этапа выполнения заданной производственной программы – отгрузки сжиженного водорода. Под водородными технологиями понимаются низкотемпературные (PEM, от англ. Proton exchange membrane, характеризующиеся высокой энергетической эффективностью) электролизёры и топливные элементы (ТЭ), установки по производству и хранению сжатого водорода.

#### **Концептуальная модель комплекса по производству «зелёного» сжиженного водорода**

Концептуальная модель автономного КПЗВ на основе ВИЭ приведена на рис. 1. В общем случае продолжительность временного интервала, определяющего изменение состояния элементов и подсистем комплекса, может быть различной. При этом он должен быть достаточным для отражения наблюдаемых изменений параметров природной среды и физических процессов моделируемого комплекса. В рамках проводимых для апробации модели расчётов в качестве единицы временной дискретности принят один час. Соответственно, далее при описании технико-экономической модели КПЗВ константа  $\tau$ , означаю-

щая количество изменений состояния системы за один час, приравнивается к единице.

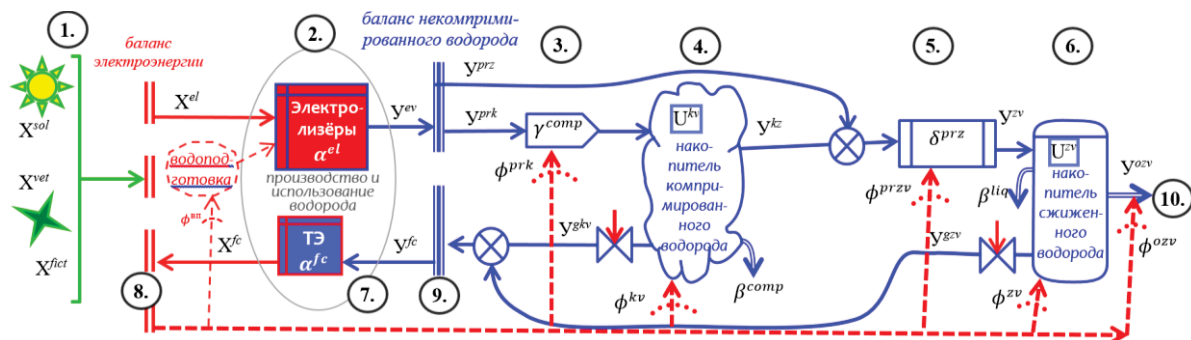
Для достижения цели исследования в среде разработки AIMMS был создан оригинальный инструментарий, в основе которого лежит оптимизационная задача математического программирования. Модель КПЗВ описывает следующие технологические подсистемы (рис. 1):

- **Электростанции на основе ВИЭ (1).** Рассматривается два вида объектов ВИЭ – СЭС и ВЭС с раздельным учётом их почасовой генерации  $x_t^{sol}$  и  $x_t^{vet}$ , соответственно, где  $t \in [1, T]$  – номер периода моделирования,  $T=8760$ . Для обеспечения совместности задачи вводится дополнительная фиктивная переменная  $x_t^{fict}$ . Установленная мощность основных элементов комплекса подбирается таким образом, чтобы фиктивная переменная была равна нулю. Используется допущение об отсутствии ограничений на пропускную способность ЛЭП, соединяющих СЭС и ВЭС с КПЗВ.
- **РЕМ-электролизёры (2.)** потребляют электроэнергию  $x_t^{el}$  и производят некомпримиованный водород  $y_t^{ev}$ . Данная подсистема в будущем будет расширена за счёт выделения процесса подготовки технологической воды для электролиза (обозначен пунктирными линиями).
- **РЕМ-топливные элементы (7.)** могут использовать некомпримиованный водород  $y_t^{fc}$  для генерации электроэнергии  $x_t^{fc}$  и обеспечения баланса электроэнергии КПЗВ (8.) при недостаточном уровне генерации ВИЭ.
- **Компрессорная подсистема (3.)** обеспечивает подачу произведённого в течении  $t$ -го часа некомпримиованного водорода  $y_t^{prk}$  в накопитель компримиованного водорода  $U_t^{kv}$  (4.), из которого часть водорода может отбираться для сжижения  $y_t^{kv}$  либо для производства электроэнергии на ТЭ  $y_t^{gkv}$ .

- **Установка по производству сжиженного водорода  $LH_2$  (5.)** обеспечивается некомпримиованным водородом от РЕМ-электролизёров  $y_t^{prz}$  либо от накопителя компримиованного водорода  $y_t^{kv}$ .
- **Накопитель сжиженного водорода  $U_t^{zv}$  (6.)** служит для обеспечения асинхронного от работы КПЗВ процесса отгрузки товарной продукции (10.) для внешних потребителей, а также для длительного хранения  $LH_2$ .

Электроэнергия, производимая на основе ВИЭ, обеспечивает полный цикл производства  $LH_2$ , включая подготовку технологической воды (в данной версии модели в отдельный блок не выделяется) и производство водорода методом электролиза воды РЕМ-электролизёрами, компримиование и хранение компримиованного водорода, производство, хранение и отгрузку товарной продукции –  $LH_2$ . В случае недостаточной генерации электроэнергии от ВИЭ (8.), накопленный компримиованный либо сжиженный водород используется в качестве топлива для ТЭ и производства электроэнергии для обеспечения технологических процессов комплекса. Баланс некомпримиованного водорода (9.) обеспечивает выполнение закона сохранения массы вещества при функционировании водородной подсистемы рассматриваемого комплекса. При этом производство некомпримиованного водорода в течение часа  $t$  (электролизёрами, дросселированием компримиованного или регазификацией сжиженного водорода) в точности соответствует его суммарному потреблению в целях производства компримиованного водорода, сжиженного водорода (прямой отбор), а также обеспечения потребления ТЭ для производства электроэнергии.

Вместо РЕМ-электролизёров (2.) и РЕМ-топливных элементов (7.) могут быть использованы аналогичные технологические установки. Блоки (5.) и (6.) могут быть заменены другими установками и комплексами, обеспечивающими производство и хранение водородоносителей или синтетических топлив, объединяемых технологиями PtX (Power to any fuel energy carrier, e-fuels).



**Рис. 1.** Концептуальная модель КПЗВ: 1) ВЭС и СЭС; 2) РЕМ-электролизеры; 3) компрессорная подсистема; 4) накопитель компримиованного водорода; 5) производство сжиженного водорода; 6) накопитель сжиженного водорода; 7) топливные элементы; 8) электрическая система КПЗВ (красные линии, включая пунктирные); 9) система водородных трубопроводов КПЗВ (синие линии); 10) система отгрузки сжиженного водорода

**Fig. 1.** Conceptual model of an autonomous complex for production of «green» hydrogen: 1) wind (WPP) and solar power plant (SPP); 2) PEM-electrolyzers; 3) compressor subsystem; 4) storage of liquid hydrogen; 5) production of liquid hydrogen; 6) storage of compressed hydrogen; 7) fuel cells; 8) electrical system of the autonomous complex (red lines, including dotted lines); 9) hydrogen pipelines system of the autonomous complex (blue lines); 10) liquid hydrogen shipment system

### Математическая модель КПЗВ

Модель оптимизирует функционирование КПЗВ с заданным составом оборудования в течение календарного года, используя оценки нормированной стоимости выполнения всех технологических операций комплекса: генерация электроэнергии ВИЭ и топлив-

ными элементами, производство водорода методом электролиза воды, компримирование водорода, производство  $\text{LH}_2$ , хранение компримированного, хранение и отпуск сжиженного водорода. Параметры и переменные модели приведены соответственно в табл. 1, 2.

Таблица 1. Параметры модели КПЗВ\*

Table 1. Parameters of model of the autonomous complex for production of «green» hydrogen

Обозначение Designation	Описание Description	Размерность Dimension	Значение Монголия/Япония** Value Mongolia/Japan**
$\underline{U}^{kv}$	Нижняя граница – «технический» объём водорода в накопителе компримированного водорода Lower limit – «technical» volume of hydrogen in the compressed hydrogen storage tank	т tonne	12
$\overline{U}^{kv}$	Верхняя граница – максимальный объём водорода в накопителе компримированного водорода Upper limit – maximum volume of hydrogen in the compressed hydrogen storage tank		60
$\overline{U}^{zv}$	Верхняя граница – максимальный объём водорода в накопителе $\text{LH}_2$ Upper limit – maximum volume of hydrogen in the liquid hydrogen storage tank		100
$N^{sol}$	Установленная мощность солнечной генерации Installed solar generation capacity	МВт MW	500/50
$N^{vet}$	Установленная мощность ветровой генерации Installed wind generation capacity		30/600
$N^{el}$	Установленная мощность электролизёров Installed capacity of the electrolyzers		200
$N^{fc}$	Установленная мощность топливных элементов Installed capacity of the fuel cells		5
$\alpha_{el}$	Удельное производство некомпимированного водорода электролизёром на единицу электроэнергии Specific production of uncompressed hydrogen by electrolyzer per electric energy unit	т·МВт <sup>-1</sup> ·ч <sup>-1</sup> tonnes per MWh	0,02
$\alpha_{fc}$	Удельная генерация электроэнергии ТЭ на тонну водорода Specific electricity generation by fuel cells per tonne of hydrogen	МВт·ч·т <sup>-1</sup> MWh per tonne	20,0
$\varphi^{prk}$	Удельное потребление электроэнергии на компримирование водорода Specific electricity consumption for hydrogen compression		2,0/1,96
$\varphi^{prz}$	Удельное потребление электроэнергии на производство сжиженного водорода (включая энергообеспечение внешних циклов и возмещение потерь на орто-пара конверсию) Specific electricity consumption for production of liquefied hydrogen (including energy demand for external cycles and recovery of ortho- to parahydrogen conversion losses)		12,0
$\varphi^{kv}$	Удельное потребление электроэнергии на хранение компримированного водорода (в течение 1 часа) Specific electricity consumption for storage of iniquid hydrogen (for 1 hour)		$13,0 \cdot 10^{-5}$
$\varphi^{zv}$	Удельное потребление электроэнергии на хранение жидкого водорода (в течение 1 часа) Specific electricity consumption for storage of compressed hydrogen (for 1 hour)		$4,2 \cdot 10^{-4}$
$\varphi^{ozv}$	Удельное потребление электроэнергии для отгрузки жидкого водорода (в течение 1 часа) Specific electricity consumption for shipment of liquid hydrogen (for 1 hour)		0,12
$\beta^{comp}$	Потери водорода при его хранении в накопителе компримированного водорода в течение 1 часа Hydrogen losses in the compressed hydrogen storage tank for 1 hour		%·т <sup>-1</sup> percent per tonne
$\beta^{liq}$	Потери водорода при его хранении в накопителе жидкого водорода в течение 1 часа Hydrogen losses in the liquid hydrogen storage tank for 1 hour	0,063	
$\gamma^{comp}$	Потери водорода при его компримировании в течение 1 часа Hydrogen losses during compression for 1 hour	0,3 / 0,25	
$\delta^{prz}$	Потери водорода при его сжижении в течение 1 часа Hydrogen losses during liquefaction for 1 hour	0,5	
$\overline{\chi}_t^{sol}$	Максимальная генерация СЭС в час t Maximum solar plant generation in hour t	МВт·ч MWh	630/47,5
$\overline{\chi}_t^{vet}$	Максимальная генерация ВЭС в час t Maximum wind plant generation in hour t		26/528



$V_t^{ozv}$	Отгрузка жидкого водорода в час $t$ Liquid hydrogen shipment per hour $t$	Т tonne	{0;6,3}/{0;5,6}
$C^{sol}$	Стоимость генерации солнечной энергии (LCOE) Levelised cost of solar power generation (LCOE)	\$. МВт <sup>-1</sup> ·ч <sup>-1</sup> \$ per MWh	58,1/137,5
$C^{vet}$	Стоимость генерации ветровой энергии (LCOE) Levelised cost of wind power generation (LCOE)		160,2/111,6
$C^{fict}$	Стоимость генерации фиктивной энергии Fictitious energy generation cost		218290000/249050000
$C^{el}$	Стоимость электролиза воды для производства водорода Cost of water electrolysis for hydrogen production		96,7/97,5
$C^{fc}$	Стоимость генерации электроэнергии топливными элементами Cost of fuel cells' power generation		915,0/820,9
$C^{compr}$	Стоимость компрессии водорода Hydrogen compression costs	\$. Т <sup>-1</sup> \$ per tonne	26,4/23,6
$C^{liq}$	Стоимость сжижения водорода Hydrogen liquefaction costs		897,7/890,2
$C^{akv}$	Стоимость хранения компримированного водорода Cost of storing compressed hydrogen		33,9/31,9
$C^{azv}$	Стоимость хранения сжиженного водорода Cost of storing liquefied hydrogen		2,6/2,4

\*Здесь и далее все стоимостные показатели приводятся в ценах 2020 г./Here and further all cost indicators are given in 2020 prices.

\*\*Нормированная стоимость производственного процесса определяется по формуле (16) на основе капитальных и эксплуатационных затрат и представляет собой минимальный тариф, при котором производственный процесс становится коммерчески эффективным/The levelized cost of production is determined by formula (16) on the basis of capital and operational costs and represents the minimum rate at which production becomes commercially viable.

Таблица 2. Переменные в модели КПЗВ

Table 2. Variables of model of the autonomous complex for the production of «green» hydrogen

Переменная Variable	Описание Description	Размерность Dimension
$x_t^{sol}$	Генерация солнечной электроэнергии за час $t$ /Solar electricity generation per hour $t$	МВт·ч MWh
$x_t^{vet}$	Генерация ветровой электроэнергии за час $t$ /Wind electricity generation per hour $t$	
$x_t^{fict}$	Фиктивная генерация электроэнергии ВИЭ за час $t$ Fictitious renewable electricity generation per hour $t$	
$x_t^{el}$	Потребление электроэнергии для электролиза воды при производстве водорода за час $t$ Electricity consumption for water electrolysis in hydrogen production per hour $t$	
$x_t^{fc}$	Генерация электроэнергии при работе топливных элементов за час $t$ Fuel cells electricity generation per hour $t$	
$y_t^{ev}$	Производство некомпенсированного водорода при работе электролизеров за час $t$ Production of uncompensated hydrogen by electrolyzers per hour $t$	Т tonne
$y_t^{prk}$	Потребление некомпенсированного водорода для производства компримированного водорода за час $t$ Non-compressed hydrogen consumption for compressed hydrogen production per hour $t$	
$y_t^{fc}$	Потребление некомпенсированного водорода топливными элементами для производства электроэнергии за час $t$ Non-combustible hydrogen consumption by fuel cells for electricity generation per hour $t$	
$y_t^{gkv}$	Отборы из накопителя компримированного водорода для производства электроэнергии топливными элементами за час $t$ Compressed hydrogen storage tank withdrawals for fuel cells' electricity generation per hour $t$	
$y_t^{gzv}$	Отборы из накопителя сжиженного водорода для производства электроэнергии топливными элементами за час $t$ Hydrogen liquids storage tank withdrawals for fuel cell electricity generation per hour $t$	
$y_t^{prz}$	Потребление некомпенсированного водорода для производства сжиженного водорода за час $t$ Non-compressed hydrogen consumption for liquefied hydrogen production per hour $t$	
$y_t^{kz}$	Отбор из накопителя компримированного водорода для производства сжиженного водорода за час $t$ Withdrawal from the compressed hydrogen storage tank for production of liquefied hydrogen per hour $t$	
$U_t^{kv}$	Среднее количество хранения компримированного водорода в соответствующем накопителе в течение часа $t$ Average quantity of compressed hydrogen in the corresponding storage tank in hour $t$	
$U_t^{zv}$	Среднее количество хранения сжиженного водорода в соответствующем накопителе в течение часа $t$ Average quantity of liquefied hydrogen in the respective storage tank in hour $t$	

Определение полного электропотребления КПЗВ осуществляется через параметры модели – удельные коэффициенты потребления электроэнергии на различные технологические процессы:  $\varphi^{prk}$ ,  $\varphi^{prz}$ ,  $\varphi^{kv}$ ,

$\varphi^{zv}$ ,  $\varphi^{ozv}$ . Потери водорода при его компримировании и сжижении определяются коэффициентами  $\gamma^{comp}$  и  $\delta^{prz}$ , соответственно. Потери при хранении компримированного и сжиженного водорода оцени-

ваются соответствующими коэффициентами  $\beta^{comp}$ ,  $\beta^{liq}$ . В модели принято допущение, что в течение часа может быть осуществлена совокупность следующих процессов: генерация электроэнергии СЭС и ВЭС, компримирование водорода, сжижение водорода, отбор/закачка водорода в накопитель компримированного или сжиженного водорода, генерация электроэнергии топливными элементами. В каждый час  $t$  в интервале  $t \in [1, T]$ , где  $T=8760$ , требуется выполнение следующих условий:

1. Обеспечение баланса электроэнергии, который формируется потреблением электролизёра, компрессора, установки по производству сжиженного водорода и его отгрузке, а также потреблением накопителей компримированного и сжиженного водорода с одной стороны, и генерацией электроэнергии ВИЭ, топливными элементами, либо «фиктивным» источником электроэнергии, с другой стороны. На потребность КПЗВ в электроэнергии также влияет почасовой график отгрузки товарной продукции с производственной площадки, который определяется количеством сжиженного водорода, изымаемого из накопителя сжиженного водорода  $V_t^{ozv}$ :

$$x_t^{sol} + x_t^{vet} + x_t^{fict} + x_t^{fc} - x_t^{el} - (\varphi^{prk} y_t^{prk} + \varphi^{prz} (y_t^{prz} + y_t^{kz}) + (1 + 0,5\varphi^{kv} (U_{t-1}^{kv} + U_t^{kv}) + 0,5\varphi^{zv} (U_{t-1}^{zv} + U_t^{zv}) + \varphi^{ozv} V_t^{ozv})) = 0. \quad (1)$$

2. Ограничения на использование энергии ВИЭ, определяемые техническим потенциалом солнечной и ветровой энергии для данной локации:

$$x_t^{sol} \leq \overline{x_t^{sol}}, \quad (2)$$

$$x_t^{vet} \leq \overline{x_t^{vet}}. \quad (3)$$

3. Обеспечение баланса производства и потребления некомпимированного водорода. Его потребление возможно для производства компримированного и/или сжиженного водорода, генерации электроэнергии ТЭ. Производство некомпимированного водорода обеспечивается либо работой электролизёра, либо декомпрессией водорода при отборе из накопителя компримированного водорода, либо регазификацией сжиженного водорода:

$$-y_t^{prk} - y_t^{prz} - y_t^{fc} + y_t^{ev} + y_t^{gkv} + y_t^{gzv} = 0. \quad (4)$$

4. Обеспечение энергетического баланса производства некомпимированного водорода и потребления электроэнергии электролизёрами с учётом КПД электролизёра:

$$y_t^{ev} - \alpha_{el} x_t^{el} = 0. \quad (5)$$

5. Обеспечение энергетического баланса производства электроэнергии ТЭ с потреблением водорода с учётом КПД топливного элемента:

$$x_t^{fc} - \alpha_{fc} y_t^{fc} = 0. \quad (6)$$

6. Потребление электроэнергии для электролиза воды при производстве водорода и генерация электроэнергии при работе топливных элементов в течение часа  $t$  ограничены установленной мощностью электролизёров и топливных элементов:

$$x_t^{el} \leq N^{el} \Delta t; \quad (7)$$

$$x_t^{fc} \leq N^{fc} \Delta t, \quad (8)$$

где  $\Delta t=1/t$ ,  $\Delta t$  приравняется к одному часу.

7. Изменение состояния накопителя компримированного водорода определяется его состоянием в конце предыдущего часа, поступлением и выдачей компримированного водорода с целью производства сжиженного и некомпимированного водорода. При этом учитываются утечки водорода, а также предполагается равномерная работа всех технологических установок в течение часа:

$$U_t^{kv} = (1 - \beta^{comp}) U_{t-1}^{kv} + (1 - \gamma^{comp}) \times (1 - 0,5\beta^{comp}) y_t^{prk} - (1 + 0,5\beta^{comp}) (y_t^{gkv} + y_t^{kz}). \quad (9)$$

8. Изменение состояния накопителя сжиженного водорода определяется его состоянием в конце предыдущего часа, поступлением и выдачей сжиженного водорода для регазификации и/или отгрузки. При этом учитываются потери вскипевшего водорода, а также предполагается равномерная работа всех технологических установок в течение часа:

$$U_t^{zv} = (1 - \beta^{liq}) U_{t-1}^{zv} + (1 - \delta^{prz}) (1 - 0,5\beta^{liq}) \times (y_t^{prz} + y_t^{kz}) - (1 + 0,5\beta^{liq}) (V_t^{ozv} + y_t^{gzv}). \quad (10)$$

9. Ограничения на состояние накопителей водорода, не допускающие превышения максимального количества хранимого водорода для соответствующих накопителей, а также снижения запаса компримированного водорода ниже заданного технологического минимума для накопителя компримированного водорода:

$$\underline{U}^{kv} \leq U_t^{kv} \leq \overline{U}^{kv}; \quad (11)$$

$$U_t^{zv} \leq \overline{U}^{zv}. \quad (12)$$

10. Условия равенства начального и конечного состояний накопителей водорода, которые обеспечивают для соответствующего накопителя нулевое изменение запасов за календарный год:

$$U_0^{kv} = U_T^{kv}; \quad (13)$$

$$U_0^{zv} = U_T^{zv}. \quad (14)$$

При выполнении ограничений (1)–(14) необходимо найти минимальное значение следующей функции:

$$\sum_{t=1}^T \left( \frac{1}{\tau} \left( C^{sol} x_t^{sol} + C^{vet} x_t^{vet} + C^{fict} x_t^{fict} + C^{el} x_t^{el} + C^{fc} x_t^{fc} \right) + \left( C^{compr} y_t^{prk} + C^{liq} (y_t^{prz} + y_t^{kz}) + C^{akv} U_t^{kv} + C^{azv} U_t^{zv} \right) \right). \quad (15)$$

Стоимостные показатели функции (15) оцениваются на основе широко используемой формулы расчёта нормированной стоимости (Levelized Cost) производства продукции либо предоставления технологических услуг для соответствующих установок:

$$C^{smh} = \frac{\sum_{l=1}^L (Capital_l + OM_l)(1+r)^{l-1}}{\sum_{l=1}^L \rho_l (1+r)^{l-1}}, \quad (16)$$

где  $L$  – срок жизни проекта;  $Capital_l$  – капитальные затраты в году  $l$ ;  $OM_l$  – эксплуатационные затраты в году  $l$ ;  $r$  – ставка дисконтирования;  $\rho_l$  – объем производства в году  $l$ .

Большое влияние на результаты моделирования оказывают коэффициенты модели. Их оценка была выполнена на основе обзора литературы и информационных источников с целью учёта современного состояние технологий производства, преобразования и хранения водорода. Основная часть энергетических затрат при производстве  $LH_2$  из газообразного водорода приходится на компрессоры и теплообменники [19]. Энергопотребление при производстве  $LH_2$  по технологии компании «Linde» составляет 12,5–15 кВт·ч/кг  $LH_2$  [20–22], а при дальнейшем совершенствовании этой технологии позволит достигнуть уровней 7,5–9 кВт·ч/кг  $LH_2$  [20, 23]. В поисках наиболее эффективных технологий массового производства  $LH_2$  предлагаются новые многокомпонентные теплоносители для циклов охлаждения водорода. Так, в [24] рассматривается технология производства  $LH_2$ , которая может обеспечить удельное энергопотребление процесса сжижения водорода на уровне 7,7 кВт·ч/кг  $LH_2$ .

#### Модели оценки часовой выработки электроэнергии и её стоимости для СЭС и ВЭС

Модель КПЗВ использует результаты расчёта возможной почасовой выработки и стоимости электроэнергии СЭС и ВЭС. Такой расчёт проводится для локаций, выбираемых из условий высокого потенциала ВИЭ и близости к объектам транспортной инфраструктуры.

Предварительный выбор нескольких локаций с высоким ветро- и гелиоэнергетическим потенциалом проводится с использованием геоинформационных систем Global wind atlas [25], Global solar atlas [26], которые дают возможность визуально оценить распределение возобновляемых энергоресурсов по территории. Эти геоинформационные системы предоставляют оценки среднегодовых значений скорости ветра за 2008–2017 гг. и суммарной солнечной радиации за 1994–2020 гг., полученные с использованием расчетных моделей по данным спутниковых наблюдений с высоким пространственным разрешением.

Окончательный выбор локаций размещения СЭС и ВЭС проводится на основе оценок базы данных реанализа ERA5 Европейского центра среднесрочного прогноза погоды и базы данных на основе спутниковых наблюдений CERES-SYN1deg, разработанной в рамках исследовательской программы НАСА (США). База данных ERA5 предоставляет достаточно точные оценки скорости ветра [27] с часовым разрешением и глобальным пространственным покрытием. Важным преимуществом ERA5, в сравнении с другими базами данных, является предоставление оценок скорости ветра на высотах 10 и 100 м, что позволяет наиболее точно оценить выработку крупных ВЭС. Данные о

температуре с достаточно высокой точностью также могут быть получены из ERA5 [28] или более детализированной базы ERA5-land [29].

База данных реанализа ERA5 уступает в точности оценки потока солнечной радиации базам данных на основе спутниковых наблюдений. Поэтому для расчёта выработки электроэнергии СЭС используется база CERES-SYN1deg, которая характеризуется высокой точностью, часовым разрешением данных и глобальным пространственным покрытием [30].

Сравнение намеченных локаций по ветроэнергетическому потенциалу проводится по оценкам средней за рассматриваемый многолетний период скорости ветра и коэффициенту вариации скорости ветра. Сравнение локаций по гелиоэнергетическому потенциалу проводится по одному показателю – среднему за рассматриваемый многолетний период потоку суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность.

Выработка электроэнергии ВЭС установленной мощностью  $N_{vet}$  в  $t$ -й час в выбранной локации оценивается по формуле:

$$\overline{x_t^{vet}} = N_{vet} \frac{P(V_{ht})}{P_r} k_{el} k_{al}, \quad (17)$$

где  $P(V_{ht})$  – мощность одной ветроэнергетической установки (ВЭУ) в час  $t$ , определяемая по мощностной характеристике в зависимости от скорости ветра  $V_{ht}$  (уравнения (18), (19)) на высоте ротора  $h$ , кВт;  $P_r$  – номинальная мощность ВЭУ, кВт;  $k_{el}$  – коэффициент, учитывающий потери мощности в преобразователях и проводниках, принимается 0,97 [31];  $k_{al}$  – коэффициент, учитывающий потери мощности из-за взаимного аэродинамического затенения ВЭУ, принимается 0,9 [32].

Для определения скорости ветра  $V_{ht}$  на высоте ротора ВЭУ  $h$  используется степенной закон и почасовые оценки базы данных ERA5 о скорости ветра на высоте 10 и 100 м [33]:

$$V_{ht} = V_{100t} \left( \frac{h}{100} \right)^{mt}, \quad (18)$$

где  $V_{100t}$  – скорость ветра в  $t$ -й час на высоте 100 м, м/с;  $mt$  – степенной коэффициент.

Степенной коэффициент в уравнении (18) в  $t$ -й час определяется:

$$mt = \frac{\ln(V_{100t} / V_{10t})}{\ln(100 / 10)}, \quad (19)$$

где  $V_{10t}$  – скорость ветра в  $t$ -й час на высоте 10 м, м/с.

Выбор наземного или офшорного размещения ВЭС, уточнение модели ВЭУ в составе электростанции осуществляется сопоставлением нормированной стоимости электроэнергии (16) и коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) альтернативных вариантов:

$$КИУМ = \frac{\sum_{t=1}^T \overline{x_t^{vet}}}{TN^{vet}}, \quad (20)$$

Выработка электроэнергии СЭС установленной мощностью  $N_{sol}$  в  $t$ -й час в выбранной локации оценивается по выражению:

$$\overline{x_t^{sol}} = N_{sol} \left( \frac{I_{gt}}{I_{ref}} \right) k_{pl} (1 - k_{temp} (T_{ct} - 25)), \quad (21)$$

где  $I_{gt}$  – интенсивность потока суммарной солнечной радиации на наклонную поверхность ФЭМ в  $t$ -й час, кВт/м<sup>2</sup>;  $I_{ref}$  – интенсивность потока суммарной солнечной радиации, соответствующая стандартным тестовым условиям (1 кВт/м<sup>2</sup>);  $k_{pl}$  – коэффициент, учитывающий потери мощности в инверторах и проводниках, а также потери из-за загрязнения и деградации ФЭМ, принимается 0,93 [34];  $k_{temp}$  – температурный коэффициент изменения КПД фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), о.е./°C;  $T_{ct}$  – температура ФЭП в  $t$ -й час, °C (рассчитывается по формуле (23)).

Интенсивность потока суммарной солнечной радиации  $I_{gt}$  на наклонную поверхность оценивается по трём составляющим – прямой, рассеянной и отраженной:

$$I_{gt} = I_{bh} \frac{\cos \theta}{\sin \alpha} + I_{dh} \left( \frac{I_{bh}}{I_{oh}} \cdot \frac{\cos \theta}{\sin \alpha} + \left( 1 - \frac{I_{bh}}{I_{oh}} \right) \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I_{gh} A_k \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right), \quad (22)$$

где  $I_{bh}$ ,  $I_{dh}$ ,  $I_{gh}$ ,  $I_{oh}$  – интенсивность потока прямой, рассеянной, суммарной и внеатмосферной солнечной радиации на горизонтальную поверхность в  $t$ -й час, кВт/м<sup>2</sup>;  $\theta$  – угол падения прямого солнечного излучения на поверхность в  $t$ -й час, рад;  $\alpha$  – высота Солнца в  $t$ -й час, рад;  $\beta$  – угол наклона ФЭМ, рад;  $A_k$  – альbedo земной поверхности в  $t$ -й час, о.е.

Интенсивность потока рассеянной солнечной радиации на наклонную поверхность рассчитывается в выражении (22) с использованием анизотропной модели Хэя–Дэвиса, показавшей высокую точность в ряде исследований [35, 36].

Для расчёта температуры ФЭП в  $t$ -й час выбрана модель национальной лаборатории Сандиа (США), которая имеет высокую адекватность и точность в сравнении с другими моделями согласно исследованиям [37, 38]:

$$T_{ct} = T_{at} + I_{gt} e^{a+bV_t} + \frac{I_{gt}}{I_{ref}} \Delta T_{ref}, \quad (23)$$

где  $T_{at}$  – температура воздуха в  $t$ -ый час, °C;  $a$ ,  $b$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от исполнения и способа установки ФЭМ;  $V_t$  – скорость ветра в  $t$ -й час, м/с;  $\Delta T_{ref}$  – разница температуры ФЭП и ФЭМ при стандартных тестовых условиях (принимается равной 3 °C для солнечных панелей, монтируемых в открытой наклонной раме [38]).

Выбор угла наклона  $\beta$  ФЭМ проводится из условия максимума суммы часовых значений выработки электроэнергии СЭС (21) за рассматриваемый многолетний период.

Нормированная стоимость выработки электроэнергии на СЭС определяется в соответствии с формулой (16).

#### Апробирование модели КПЗВ для локаций в Монголии и Японии

Основанием для создания описанной укрупнённой технико-экономической модели автономного КПЗВ является утверждённая Распоряжением Правительства России от 5 августа 2021 г. № 2162-р Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации. В качестве приоритетного направления развития она предусматривает «производство низкоуглеродного водорода ... на базе мощностей возобновляемых источников энергии в тех регионах, где производство водорода методом электролиза воды является конкурентоспособным» [39]. Учитывая тот факт, что регион Северо-Восточной Азии (СВА) является одним из ведущих мировых центров развития водородной энергетики [40] и интересы авторов направлены на исследование энергетики восточных регионов России, было принято решение о рассмотрении конкурирующих с российскими проектами экспорта водородоносителей локаций в странах данного региона.

Одним из возможных поставщиков «зелёного» водорода в Японию, Республику Корея и Китай может стать Монголия, природно-климатические условия которой благоприятны для развития ВИЭ и создания крупных СЭС и ВЭС [41, 42]. В совокупности с наличием запасов чистой пресной воды в северных районах страны это позволяет рассматривать Монголию как одного из производителей «зелёного» водорода для соседних стран.

Проверка работоспособности предложенной технико-экономической модели КПЗВ выполнена путём решения задачи оценки стоимости производства «зелёного» сжиженного водорода в двух локациях, отличающихся природно-климатическими и экономическими условиями. Такое исследование позволяет оценить целесообразность транспортировки сжиженного водорода из одной локации в другую.

Для проверки адекватности модели ставится задача сравнения стоимости производства водорода с результатами аналогичных исследований.

#### Выбор локаций размещения ВЭС и СЭС

В исследовании размещение ВЭС и СЭС рассматривалось на побережье озера Хубсугул (Монголия) и побережье префектур Ниигата, Ямагата (Япония). Оценка выработки электроэнергии ВЭС проводилась для моделей ВЭУ компании Vestas (табл. 3 [43, 44]), оценка выработки электроэнергии СЭС – для моделей ФЭМ компании Jinko Solar (табл. 4 [45]). В табл. 5 представлены принятые технико-экономические характеристики СЭС и ВЭС на основе исследования [46].

Таблица 3. Технические характеристики ВЭУ

Table 3. Technical specification of the wind turbines

Характеристика/Specification	Vestas V117-4,2	Vestas V136-3,45
Тип размещения/Type	Наземная, оффшорная Onshore, Offshore	Наземная Onshore
Номинальная мощность, МВт Rated power, MW	4,2	3,45
Стартовая скорость, мс <sup>-1</sup> Starting speed, meters per second	3	3
Максимальная рабочая скорость, мс <sup>-1</sup> Maximum operating speed, metre per	25	25

second		
Диаметр ротора, м Rotor diameter, metre	117	136
Высота башни, м Tower height, metre	91,5	112

**Таблица 4.** Технические характеристики фотоэлектрических преобразователей Tiger Pro 72HC JKM535M-72HL4 (Jinko solar, Kumay)

**Table 4.** Technical specification of solar panel Tiger Pro 72HC JKM535M-72HL4 (Jinko solar, China)

Параметр/Specification	Значение/Value
КПД панелей/Panel efficiency, %	20,75
Площадь одной панели, м <sup>2</sup> Area per panel, square metre	2,58
Мощность одной панели, кВт Power per panel, kW	0,535
Температурный градиент КПД Temperature gradient efficiency, %/°C	0,35

Предварительное определение нескольких перспективных для размещения ВЭС локаций проводилось с помощью Global Wind Atlas. В Монголии было намечено четыре локации, в Японии – три (рис. 2). Далее для них с использованием базы данных ERA5 были получены ретроспективные оценки скорости ветра на высоте 10 и 100 м с часовой детализацией за период с 01.01.2015 г. по 31.12.2020 г. [47]. Результаты оценки среднегодовой скорости ветра и коэффициента вариации скорости ветра за этот период представлены на рис. 2 [25]. Исходя из полученных оценок, для дальнейшего рассмотрения в Монголии выбрана локация № 4 на восточном побережье озера Хубсугул, в Японии – локация № 3 рядом с г. Саката.

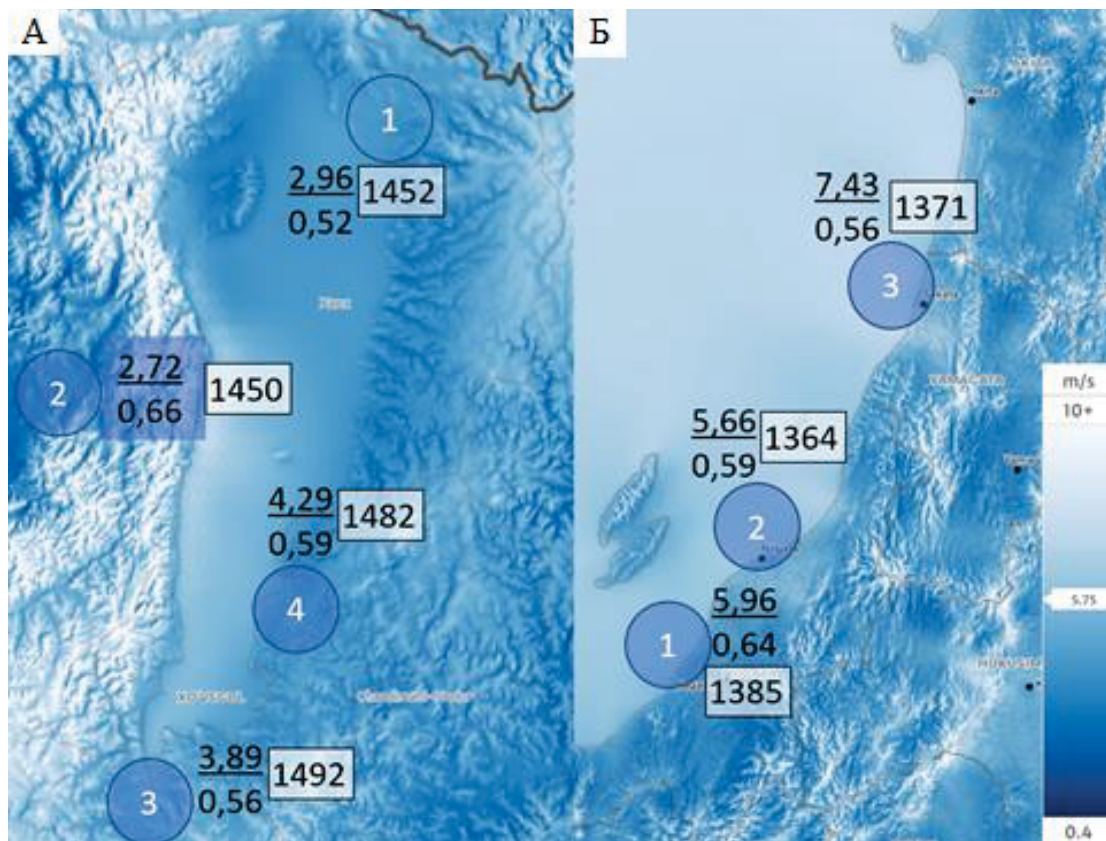
**Таблица 5.** Техничко-экономические характеристики ВЭС и СЭС

**Table 5.** Technical and economic characteristics of wind and solar power stations

Параметр/Specification	Ед. измерения/Unit	Монголия/Mongolia	Япония/Japan
Капитальные затраты на строительство ВЭС Capital costs for construction of a wind power station	\$·кВт <sup>-1</sup> \$ per kW	1600	3800* 1500‡
Эксплуатационные расходы ВЭС Operating costs of a wind power station	\$·кВт <sup>-1</sup> ·год <sup>-1</sup> \$ per kW per year	48	56*
Капитальные затраты на строительство СЭС Capital costs for construction of a solar power station	\$·кВт <sup>-1</sup> \$ per kW	995 495‡	2070
Эксплуатационные расходы СЭС Operating costs of a solar power station	\$·кВт <sup>-1</sup> ·год <sup>-1</sup> \$ per kW per year	12,0	18,3

\* оффшорная ВЭС/offshore power station.

‡ для оценки влияния фактора снижения удельных капиталовложений/to assess the impact of the reduction factor on specific capital expenditure.



**Рис. 2.** Выбор локаций для ВЭС и СЭС: (А) Монголия, (Б) Япония (в числителе – средняя скорость ветра, м/с; в знаменателе – коэффициент вариации; в прямоугольнике – суммарная солнечная радиация, кВт·ч/м<sup>2</sup>·год)

**Fig. 2.** Selection of locations for WPP and SPP: (A) Mongolia, (B) Japan (average wind speed is in the numerator, m/s; coefficient of variation is in the denominator; total solar radiation is in the rectangle, kWh/m<sup>2</sup>·year)

В соответствии с формулой (17) в программе для ЭВМ Wind-MCA [48, 49] были получены оценки почасовой выработки электроэнергии ВЭС при наземном и оффшорном размещении и различных моделях ВЭУ (табл. 3). По формулам (16) и (20) были рассчитаны LCOE и средний КИУМ ВЭС за 2015–2020 гг. В Монголии наиболее экономически эффективным вариантом является строительство наземной ВЭС с ВЭУ Vestas V136-3,45 (среднегодовая выработка электроэнергии одной ВЭУ за 2015–2020 гг. составила 4692 МВт·ч, LCOE ВЭС – 160,2 \$/МВт·ч, средний КИУМ ВЭС – 13,5 %). В Японии выбрана оффшорная модель Vestas V117 (среднегодовая выработка электроэнергии ВЭУ за 2015–2020 гг. составила 16088 МВт·ч, LCOE ВЭС – 111,6 \$/МВт·ч, средний КИУМ ВЭС – 38,1 %).

Анализ гелиоэнергетического потенциала выполнялся с использованием Global solar atlas [26]. Наибольшая величина среднегодового потока суммарной солнечной радиации характерна для южных локаций, однако локация, выбранные для размещения ВЭС (локация № 4 в Монголии и № 3 в Японии), также имеют высокий уровень потока поступающей солнечной радиации, отличающийся от максимального для рассматриваемой территории не более чем на 1 %. Для снижения затрат на электросетевую инфраструктуру КПЗВ размещение СЭС рассматривалось в той же локации, где и ВЭС.

**Таблица 6.** Стоимость и структура затрат на производство «зелёного» LH<sub>2</sub> для локаций КПЗВ в Монголии и Японии для различных природно-климатических условий 2015–2020 гг. и технико-экономических характеристик ВЭС и СЭС, \$/кг LH<sub>2</sub>

**Table 6.** Cost and cost structure for production of «green» LH<sub>2</sub> for locations of the autonomous complex for production of «green» hydrogen in Mongolia and Japan for various natural and climatic conditions in 2015–2020 and the technical and economic characteristics of WPPs and SPPs, \$ per kg of liquid hydrogen

Показатель Specification	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Среднее значение за 2015–2020 гг. Average value for 2015–2020	2020*
Стоимость отгружаемого LH <sub>2</sub> Ex-factory cost	11,08/13,37	10,79/13,37	10,75/13,37	10,74/13,37	10,84/13,27	10,77/13,46	10,8/13,4	8,82/9,71
Стоимость электроэнергии ВИЭ Cost of «green» electricity	4,38/6,98	4,38/6,98	4,35/6,98	4,35/6,98	4,41/6,98	4,37/7,01	3,7/7,0	2,41/3,24
Стоимость электролиза Cost of electrolysis	4,90/4,91	4,89/4,91	4,89/4,91	4,89/4,91	4,90/4,91	4,88/4,91	4,9/4,91	4,89/4,92

Примечание: Монголия/Япония. \*Оценки получены при значениях параметров, отмеченных † в табл. 5  
 Note: Mongolia/Japan. \*Estimations correspond to the values of the parameters marked † in Table 5.

Для этого используется экспертная оптимистичная оценка снижения капитальных затрат на строительство СЭС и ВЭС (табл. 5). Снижение капитальных затрат на строительство СЭС в Монголии в 2,5 раза приведет к уменьшению стоимости водорода на 1,95 \$/кг (с 10,77 до 8,82 \$/кг). Снижение капитальных затрат на строительство ВЭС в Японии в 2 раза приведет к уменьшению стоимости водорода на 3,85 \$/кг (с 13,46 до 9,71 \$/кг).

Оценки почасовой выработки электроэнергии СЭС за период с 01.01.2015 г. по 31.12.2020 г. были рассчитаны по формуле (21) с использованием базы данных CERES SYN1deg [50]. По формулам (16), (20) проведена оценка LCOE и среднего КИУМ СЭС за 2015–2020 гг. В Монголии наибольшую выработку электроэнергии СЭС обеспечивает угол наклона ФЭМ, равный 45° (среднегодовая выработка электроэнергии одной панели за 2015–2020 гг. составила 962 кВт·ч, средний КИУМ СЭС – 19,1 %, LCOE СЭС – 69,2 \$/МВт·ч). В Японии угол наклона ФЭП выбран равным 21° (среднегодовая выработка электроэнергии одной панели за 2015–2020 гг. составила 688 кВт·ч, средний КИУМ СЭС – 13,7 %, LCOE СЭС – 164,7 \$/МВт·ч).

#### Результаты расчетов с использованием модели КПЗВ

Адекватность разработанной технико-экономической модели автономного КПЗВ при принятых предположениях о свойствах рассматриваемой технической системы подтверждается результатами расчётов, полученных для различных сочетаний природно-климатических условий и значений технико-экономических параметров.

В табл. 6 представлены результаты оценки стоимости и структура затрат на производство «зелёного» LH<sub>2</sub> для локаций КПЗВ в Монголии и Японии.

Дополнительно был выполнен анализ чувствительности стоимости водорода к изменению стоимости электроэнергии.

Иллюстрация результатов расчета модели приведена на рис. 3. Показано изменение состояния ключевых узлов КПЗВ в Японии в течение 2020 г., полученное в результате применения оптимизационной модели для условий сниженных удельных затрат в строительстве ВЭС и СЭС.

Адекватность модели подтверждается следующим. Во-первых, из результатов моделирования следует, что при принятых технико-экономических показателях хранения водорода в сжиженном состоянии обладает

существенно более низкой стоимостью в сравнении с использованием накопителя компримированного водорода – последний включается в работу при достижении максимальной загрузки накопителя сжиженного водорода. Во-вторых, на рис. 3 можно увидеть повышение уровня загрузки накопителя сжиженного водорода в мае и в летние месяцы, что обусловлено аномально низким расчётным техническим потенциалом ветровой энергии в июне–июле 2020 г. Таким образом модель учитывает заданные данные о погодных условиях в течение всего года и осуществляет заблаговременное заполнение накопителей водорода. В-третьих, при практически равном объёме производства товарной про-

дукции (10 тыс. т в год  $\text{LH}_2$ ) полученные оценки его минимальной стоимости существенно различаются для локаций в Монголии и Японии. Так, для условий 2015–2020 гг. стоимость производства в Монголии составила 10,74–11,08 \$/кг, а в Японии – 13,27–13,46 \$/кг. В структуре стоимости производства сжиженного водорода для любой локации преобладают затраты на производство газообразного водорода методом электролиза воды и производство электроэнергии ВИЭ. Разница между стоимостью производства сжиженного водорода в Японии и Монголии, согласно выполненным расчётам, составит около 2,6 \$/кг (табл. 6).

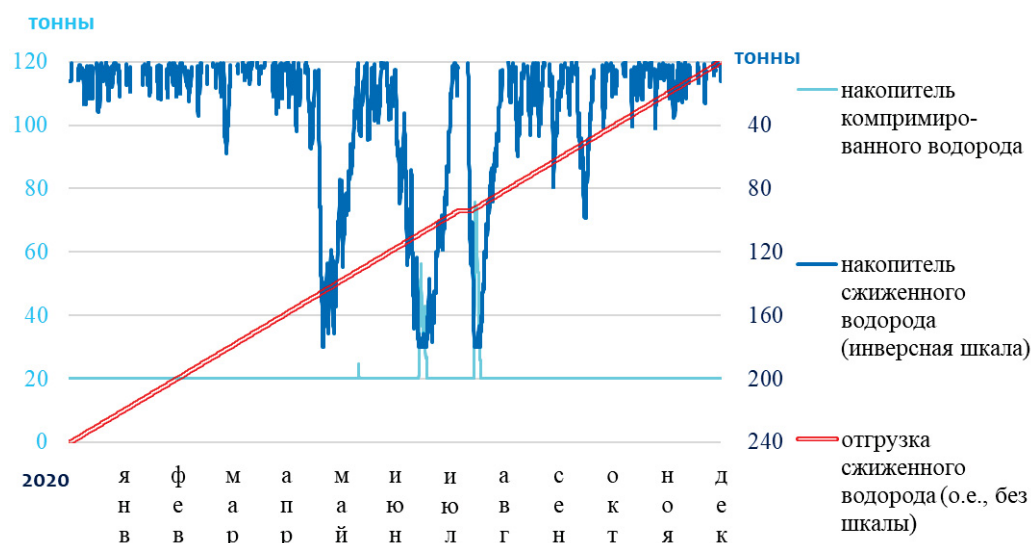


Рис. 3. Состояние накопителей водорода и режим отгрузки сжиженного водорода для Японии (природные условия 2020 г., сниженные капиталовложения в офшорные ВЭС)

Fig. 3. State of hydrogen storage and the liquid hydrogen shipment for Japan (weather conditions for 2020, reduced investment in offshore wind power plants)

Адекватность модели также подтверждается сравнением полученных оценок стоимости товарной продукции КПЗВ с аналогичными оценками других исследований. Всемирная ядерная ассоциация на основании исследований различных организаций за 2019–2021 гг. оценила стоимость производства газообразного «зелёного» водорода в 2,5–7,7 \$/кг [51]. Консалтинговая компания Lazard оценивает стоимость газообразного водорода в 5,64 \$/кг при следующих условиях: удельные капитальные затраты на PEM-электролизёры составляют 1010 \$/кВт, их установленная мощность равна 100 МВт, а стоимость электроэнергии принята 60 \$/МВт·ч [52]. Полученные авторами оценки стоимости водорода выше приведенных в [52], что объясняется достаточно благоприятными условиями и допущениями, принятыми в том исследовании: сравнительно низкие (перспективные для начала 2030-х гг.) уровни капитальных затрат на PEM-электролизёры, очень высокий КИУМ электролизёров («an availability factor») – 98 %, низкая стоимость генерируемой возобновляемыми источниками электроэнергии. В разработанной авторами технико-экономической модели автономного КПЗВ, при использовании аналогичных [52] стоимостных показате-

телей и допущений, стоимость некомпимированного газообразного водорода на выходе из электролизёра составит 4,43 \$/кг.

Нормированная стоимость сжижения водорода оценивается в широком диапазоне 1–7 \$/кг  $\text{LH}_2$  [53–55]. Таким образом, стоимость сжиженного «зелёного» водорода на основании [51–55] может составить 3,5–14,7 \$/кг. Полученные авторами оценки попадают в этот диапазон.

#### Заключение

Предложен методологический подход, который предусматривает использование годового почасового профиля генерации электроэнергии ВИЭ и описания физико-химической и теплофизической систем автономных комплексов по производству «зелёного» водорода на укрупнённом технико-экономическом уровне.

Разработанная технико-экономическая модель КПЗВ позволяет оценить стоимость производства «зелёного» сжиженного водорода с учётом природно-климатических условий в рассматриваемой изолированной от энергетической системы локации. Особенностями данной модели, реализованными в комплексе, является то, что:

- 1) в качестве товарного продукта выступает сжиженный водород;
- 2) для энергоснабжения технологических процессов при недостаточном уровне генерации ВИЭ используются топливные элементы;
- 3) для регулирования как сезонных, так и режимных дисбалансов производимой ВИЭ и потребляемой комплексом электроэнергии может быть использован компримированный и/или сжиженный водород из накопителей;
- 4) спрос на товарную продукцию задаётся экзогенно графиком отгрузки сжиженного водорода, исходя из потребностей конечных потребителей.

Для проверки работоспособности и адекватности результатов предложенной модели была выполнена оценка стоимости производства сжиженного водорода в двух локациях (в Монголии и Японии) с учётом различных технико-экономических и природно-климатических условий. Сравнение полученных результатов с оценками стоимости «зелёного» водорода

аналогичных исследований, в том числе для сценария существенного снижения капитальных вложений в строительство электростанций на основе ВИЭ, показывает работоспособность модели и адекватность получаемых с её помощью результатов.

Разработанная модель является основой для создания семейства инструментов научных исследований и решения широкого круга задач развития электроводородных систем, в первую очередь на основе использования возобновляемых источников энергии.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке по гранту Российского фонда фундаментальных исследований № 20-014-00020, в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0004) программы фундаментальных исследований РФ на 2021–2035 гг. с использованием ресурсов ЦКП «Высокотемпературный контур» (Минобрнауки России, проект № 13.ЦКП.21.0038). Благодарим компанию AIMMS за создание среды для решения задач математического программирования и возможность её использования в научных целях.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Global Energy Review 2020. URL: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021> (дата обращения 01.07.2022).
2. Global Renewables Outlook: energy transformation. URL: <https://www.irena.org/publications/2020/Apr/Global-Renewables-Outlook-202047> (дата обращения 01.07.2022).
3. Водородная экономика – путь к низкоуглеродному развитию / Т. Митрова, Ю. Мельников, Д. Чугунов, А. Глаголева. – М.: Центр энергетике Московской школы управления Сколково, 2019. – 63 с.
4. Водородное оборудование // ПАО «Криогенмаш». URL: <https://www.cryogenmash.ru/catalog/vodorodnoe-oborudovanie/> (дата обращения 01.07.2022).
5. Large-scale production and transport of hydrogen from Norway to Europe and Japan: value chain analysis and comparison of liquid hydrogen and ammonia as energy carriers / Y. Ishimoto, M. Voldsund, P. Nekså, S. Roussanaly, D. Berstad, S.O. Gardarsdottir // International Journal of Hydrogen Energy. – 2020. – V. 45. – Iss. 58. – P. 32865–32883.
6. Nouria M., Miansari M., Ghorbani B. Exergy and economic analyses of a novel hybrid structure for simultaneous production of liquid hydrogen and carbon dioxide using photovoltaic and electrolyzer systems // Journal of Cleaner Production. – 2020. – V. 259. – P. 120862.
7. Comparative techno-economic study of solar energy integrated hydrogen supply pathways for hydrogen refueling stations in China / Y. Gu, Q. Chena, J. Xue, Z. Tang, Y. Sun, Q. Wu // Energy Conversion and Management. – 2020. – V. 223. – P. 113240.
8. Ugurlu A., Oztuna S. How liquid hydrogen production methods affect emissions in liquid hydrogen powered vehicles? // International Journal of Hydrogen Energy. – 2020. – V. 45. – Iss. 60. – P. 35269–35280.
9. A high-efficiency liquid hydrogen storage system cooled by a fuel-cell-driven refrigerator for hydrogen combustion heat recovery / X. Xiafan, X. Hao, Z. Jianpeng, C. Liubiao, W. Junjie // Energy Conversion and Management. – 2020. – V. 226. – P. 113496.
10. Кулагин В.А., Грушевенко Д.А. Сможет ли водород стать топливом будущего? // Теплоэнергетика. – 2020. – № 4. – С. 1–14.
11. Koc M., Tukenmez N., Ozturk M. Development and thermodynamic assessment of a novel solar and biomass energy based integrated plant for liquid hydrogen production // International Journal of Hydrogen Energy. – 2020. – V. 45. – Iss. 60. – P. 34587–34607.
12. Okundamiya M.S. Size optimization of a hybrid photovoltaic/fuel cell grid connected power system including hydrogen storage // International Journal of Hydrogen Energy. – 2021. – V. 46. – Iss. 59. – P. 30539–30546.
13. Hemmati R., Mehrjerdi H., Bornapour M. Hybrid hydrogen-battery storage to smooth solar energy volatility and energy arbitrage considering uncertain electrical-thermal loads // Renewable Energy. – 2020. – V. 154. – P. 1180–1187.
14. Puranen P., Kosonen A., Ahola J. Technical feasibility evaluation of a solar PV based off-grid domestic energy system with battery and hydrogen energy storage in northern climates // Solar Energy. – 2021. – V. 213. – P. 246–259.
15. Bi-level mixed-integer planning for electricity-hydrogen integrated energy system considering leveled cost of hydrogen / G. Pan, W. Gu, H. Qiu, Y. Lu, S. Zhou, Z. Wu // Applied Energy. – 2020. – V. 270. – P. 115176.
16. Seasonal energy storage for zero-emissions multi-energy systems via underground hydrogen storage / P. Gabrielli, A. Poluzzi, G. Jan Kramer, C. Spiers, M. Mazzotti, M. Gazzani // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2020. – V. 121. – P. 109629.
17. You C., Kim J. Optimal design and global sensitivity analysis of a 100% renewable energy sources based smart energy network for electrified and hydrogen cities // Energy Conversion and Management. – 2020. – V. 223. – P. 113252.
18. Marchenko O.V., Solomin S.V. Modeling of hydrogen and electrical energy storages in wind/PV energy system on the Lake Baikal coast // International Journal of Hydrogen Energy. – 2017. – V. 42. – Iss. 15. – P. 9361–9370.
19. Krasae-in S., Stang J.H., Nekså P. Exergy analysis on the simulation of a small-scale hydrogen liquefaction test rig with a multi-component refrigerant refrigeration system // International Journal of Hydrogen Energy. – 2010. – V. 35. – Iss. 15. – P. 8030–8042.
20. Liquid hydrogen, methylcyclohexane, and ammonia as potential hydrogen storage: comparison review / A. Tri Wijayanta, T. Oda, C. Wahyu Purnomoc, T. Kashiwagi, M. Aziz // International Journal of Hydrogen Energy. – 2019. – V. 44. – Iss. 29. – P. 15026–15044.
21. Large-scale hydrogen liquefaction in Germany / M. Bracha, G. Lorenz, A. Patzelt, M. Wanner // International Journal of Hydrogen Energy. – 1994. – V. 19. – P. 53–59.
22. Drnevich R. Hydrogen delivery – liquefaction & compression, strategic initiatives for hydrogen delivery workshop. URL: [www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/liquefaction\\_comp\\_pres\\_praxair.pdf](http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/liquefaction_comp_pres_praxair.pdf) (дата обращения 01.07.2022).
23. Scott R.B., Denton W.H., Nicholls C.M. Technology and uses of liquid hydrogen. – Oxford: Pergamon Press, 1964. – 56 p.
24. Asadnia M., Mehrpooya M. A novel hydrogen liquefaction process configuration with combined mixed refrigerant systems // International Journal of Hydrogen Energy. – 2017. – V. 42. – Iss. 23. – P. 15564–15585.
25. Global wind atlas. URL: <https://globalwindatlas.info> (дата обращения 01.07.2022).
26. Global solar atlas. URL: <https://globalsolaratlas.info> (дата обращения 01.07.2022).
27. Validation of European-scale simulated wind speed and wind generation time series / J.P. Murcia, M.J. Koivisto, G. Luzia,



- B.T. Olsen, A.N. Hahmann, P.E. Sørensen et al. // Applied Energy. – 2022. – V. 305. – 117794.
28. Gleixner S., Demissie T., Diro G.T. Did ERA5 improve temperature and precipitation reanalysis over East Africa? // Atmosphere. – 2020. – V. 11. – 996. URL: <https://doi.org/10.3390/atmos11090996> (дата обращения 01.07.2022).
29. Performance of air temperature from ERA5-Land reanalysis in coastal urban agglomeration of Southeast China / J. Zou, N. Lu, H. Jiang, J. Qin, L. Yao, Y. Xin, F. Su // Science of The Total Environment. – 2022. – V. 828. – 154459. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154459> (дата обращения 01.07.2022).
30. Yang D., Bright J.M. Worldwide validation of 8 satellite-derived and reanalysis solar radiation products: a preliminary evaluation and overall metrics for hourly data over 27 years // Solar Energy. – 2020. – V. 210. – P. 3–19.
31. Simplified analysis of the electric power losses for on-shore wind farms considering Weibull distribution parameters / A. Colmenar-Santos, S. Campiez-Romero, L.A. Enriquez-Garcia, C. Pérez-Molina // Energies. – 2014. – V. 7 (11). – P. 6856–6885.
32. Modelling and measuring flow and wind turbine wakes in large wind farms offshore / W. Schlez, J. Phillips, K. Rados, A. Zervos, E.S. Politis, P.K. Chaviaropoulos // Wind Energy. – 2009. – V. 12. – № 5. – P. 431–444.
33. Jung C., Schindler D. The role of the power law exponent in wind energy assessment: A global analysis // International Journal of Energy Research. – 2021. – V. 45. – P. 8484–8496.
34. Ekici S., Kopru M.A. Investigation of PV system cable losses // International Journal of Renewable Energy Research. – 2017. – V. 7. – № 2. – P. 807–815.
35. Noorian A.M., Moradi I., Kamali G.A. Evaluation of 12 models to estimate hourly diffuse irradiation on inclined surfaces // Renewable Energy. – 2008. – V. 33. – P. 1406–1412. URL: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.06.027> (дата обращения 01.07.2022).
36. Khalil S.A., Shaffie A.M. A comparative study of total, direct and diffuse solar irradiance by using different models on horizontal and inclined surfaces for Cairo, Egypt // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2013. – V. 27. – P. 853–863. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.038> (дата обращения 01.07.2022).
37. Aoun N. Methodology for predicting the PV module temperature based on actual and estimated weather data // Energy Conversion and Management. – 2022. – X 14. – 100182. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100182> (дата обращения 01.07.2022).
38. Modeling of photovoltaic cell temperature losses: A review and a practice case in South Spain // I. Santiago, D. Trillo-Montero, I.M. Moreno-Garcia, V. Pallarés-López, J.J. Luna-Rodríguez // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2018. – V. 90. – P. 70–89. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.054> (дата обращения 01.07.2022).
39. Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 5 августа 2021 г. № 2162-р.
40. Ministerial council on renewable energy, hydrogen and related issues Basic hydrogen strategy. – 2017. URL: [https://www.meti.go.jp/english/press/2017/1226\\_003.html](https://www.meti.go.jp/english/press/2017/1226_003.html) (дата обращения 01.07.2022).
41. Попов С.П. Методологический подход к моделированию межгосударственной электроводородной системы в северо-восточной Азии // Альтернативная энергетика и экология. – 2020. – № 25–27. – С. 84–94. DOI: 10.15518/isjaee.2020.09.008
42. International Renewable Energy Agency (IRENA) Mongolia renewables readiness. 2016. URL: <https://www.irena.org/publications/2016/Mar/Renewables-Readiness-Assessment-Mongolia> (дата обращения 01.07.2022).
43. Vestas V117-4.2 MW. URL: <https://www.vestas.com/en/products/4-mw-platform/V117-4-2-MW> (дата обращения 01.07.2022).
44. Vestas V136-3.45 MW. URL: <https://www.vestas.com/en/products/4-mw-platform/V136-3-45-MW> (дата обращения 01.07.2022).
45. Jinko solar. URL: <https://www.jinkosolar.com/en/site/dwparametere> (дата обращения 01.07.2022).
46. Renewable power generation costs in 2020. URL: <https://www.irena.org/publications/2021/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2020> (дата обращения 01.07.2022).
47. Copernicus Climate Data Store. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels> (дата обращения 01.07.2022).
48. Шакиров В.А., Артемьев А.Ю. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014619044. Многокритериальная оценка эффективности использования ветроэнергетических установок (Wind-MCA). Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 08.09.2014 г.
49. Курбацкий В.Г., Шакиров В.А. Методическое и программное обеспечение для оценки ветроэнергетического потенциала Северо-Востока России // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2020. – Т. 24. – № 1 (150). – С. 145–163.
50. Ceres Data Products. URL: <https://ceres.larc.nasa.gov/data/> (дата обращения 01.07.2022).
51. Hydrogen production and uses. URL: <https://www.world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/hydrogen-production-and-uses.aspx> (дата обращения 01.07.2022).
52. Lazard's leveled cost of hydrogen analysis. URL: <https://www.lazard.com/media/451779/lazards-levelized-cost-of-hydrogen-analysis-vf.pdf> (дата обращения 01.07.2022).
53. Yilmaz C. A case study: exergoeconomic analysis and genetic algorithm optimization of performance of a hydrogen liquefaction cycle assisted by geothermal absorption precooling cycle // Renewable Energy. – 2018. – V. 128 (PA). – P. 68–80.
54. Review of hydrogen transport cost and its perspective (liquefied hydrogen) / Eds. S. Kimura, I. Kutani, O. Ikeda, R. Chihiro // Demand and Supply Potential of Hydrogen Energy in East Asia – Phase 2. ERIA Research Project Report FY2020 no. 16. – Jakarta: ERIA, 2020. – P. 60–89.
55. Current status of hydrogen liquefaction costs / E. Connelly, M. Penev, A. Elgowainy, C. Hunter // DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record 19001. 2019. URL: [https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/19001\\_hydrogen\\_liquefaction\\_costs.pdf](https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/19001_hydrogen_liquefaction_costs.pdf) (дата обращения 01.07.2022).

Поступила 14.07.2022 г.

Прошла рецензирование 30.09.2022 г.

#### Информация об авторах

**Попов С.П.**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева.

**Шакиров В.А.**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН.

**Колосницын А.В.**, младший научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН.

**Максакова Д.В.**, младший научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН.

**Балдынов О.А.**, младший научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН.

UDC 661.965:330.15

## TECHNICAL AND ECONOMIC MODEL OF AN AUTONOMOUS COMPLEX FOR PRODUCTION OF «GREEN» HYDROGEN AND ITS TESTING ON THE EXAMPLE OF MONGOLIA AND JAPAN

**Sergey P. Popov<sup>1</sup>,**  
popovsp@isem.irk.ru

**Valdislav A. Shakirov<sup>1</sup>,**  
shakirov@isem.irk.ru

**Anton V. Kolosnitsyn<sup>1</sup>,**  
kolosnitsyn@isem.irk.ru

**Darya V. Maksakova<sup>1</sup>,**  
maksakova@isem.irk.ru

**Oleg A. Baldynov<sup>1</sup>,**  
oabaldynov@isem.irk.ru

<sup>1</sup> Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 130, Lermontov street, Irkutsk, 664033, Russia.

**The relevance.** The paper presents a technical and economic model of a liquefied hydrogen production complex supplied only by renewable energy. The model compares technical and economic indicators of «green» liquefied hydrogen production in different locations subject to their climate, technical and economic conditions. The unique characteristic of the proposed model is that it considers the main technological processes for hydrogen production, conversion and storage, taking into account the annual hourly profile of possible renewable energy generation and shipping schedule of liquefied hydrogen as a commercial output. Employing the model will be relevant at the stage of pre-feasibility studies devoted to the creation of hydrogen energy productions in regions with high renewable energy potentials and remote from power infrastructure and allow enhancing reasonableness of estimations when taking investment decisions.

**The main aim:** to develop a technical and economic model of such a complex and to test it by estimating the levelized cost of «green» liquid hydrogen for selected locations in Mongolia and Japan.

**Object:** the autonomous complex for production of «green» hydrogen.

**Methods.** The model is based on an optimization problem that determines the level and structure of costs born to produce liquefied hydrogen using solar and wind energy.

**Results.** For verification of the model the comparative estimations for production of 10000 tonnes per year of the liquefied «green» hydrogen were calculated. The costs for locations in Mongolia (east coast of Lake Hubsugul) and Japan (coastal areas of Yamagata Prefecture) amount to \$10,8 per kg and \$13,4 per kg, respectively.

### Key words:

Renewable energy sources, hydrogen technologies, liquefied hydrogen, technical and economic model, estimating costs.

The research was funded by the Russian Foundation for Basic Research, grant no. 18-03-12345, no. 20-014-00020 and under State Assignment Project (no. FWEU-2021-0004) of the Fundamental Research Program of the Russian Federation 2021–2025, using the resources of the High-Temperature Circuit Multi-Access Research Center (Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project no. 13.CKP.21.0038). The authors thank AIMMS for creating an environment for solving mathematical problems and for the opportunity to use the software for scientific purposes.

### REFERENCES

1. *Global Energy Review 2020*. Available at: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021> (accessed 1 July 2022).
2. *Global Renewables Outlook: energy transformation*. Available at: <https://www.irena.org/publications/2020/Apr/Global-Renewables-Outlook-202047> (accessed 1 July 2022).
3. Mitrova T., Melnikov Yu.V., Chugunov D., Glagoleva A. *Vodorodnaya ekonomika – put k nizkouglerodnomu razvitiyu* [Hydrogen economy – a way to low-carbon development]. Moscow, SKOLKOVO Energy Centre Publ., 2019. 63 p.
4. *Vodorodnoe oborudovanie* [Hydrogen equipment]. PJSC Cryogenmash. Available at: <https://www.cryogenmash.ru/catalog/vodorodnoe-oborudovanie/> (accessed 1 July 2022).
5. Ishimoto Y., Voldsund M., Neksa P., Roussanaly S., Berstad D., Gardarsdottir S.O. Large-scale production and transport of hydrogen from Norway to Europe and Japan: value chain analysis and comparison of liquid hydrogen and ammonia as energy carriers. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, vol. 45, Iss. 58, pp. 32865–32883.
6. Nouria M., Miansari M., Ghorbani B. Exergy and economic analyses of a novel hybrid structure for simultaneous production of liquid hydrogen and carbon dioxide using photovoltaic and electrolyzer systems. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 259. 120862.
7. Gu Y., Chena Q., Xue J., Tang Z., Sun Y., Wu Q. Comparative techno-economic study of solar energy integrated hydrogen supply pathways for hydrogen refueling stations in China. *Energy Conversion and Management*, 2020, vol. 223, 113240.
8. Ugurlu A., Oztuna S. How liquid hydrogen production methods affect emissions in liquid hydrogen powered vehicles? *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, vol. 45, Iss. 60, pp. 35269–35280.
9. Xiafan X., Hao X., Jianpeng Z., Liubiao C., Junjie W. A high-efficiency liquid hydrogen storage system cooled by a fuel-cell-driven refrigerator for hydrogen combustion heat recovery. *Energy Conversion and Management*, 2020, vol. 226, 113496.
10. Kulagin V. A., Grushevenko D.A. Will hydrogen be able to become the fuel of the future? *Thermal Engineering*, 2020, no. 4, pp. 1–14.

11. Koc M., Tukenmez N., Ozturk M. Development and thermodynamic assessment of a novel solar and biomass energy based integrated plant for liquid hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, vol. 45, Iss. 60, pp. 34587–34607.
12. Okundamiya M.S. Size optimization of a hybrid photovoltaic/fuel cell grid connected power system including hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, vol. 46, Iss. 59, pp. 30539–30546.
13. Hemmati R., Mehrjerdi H., Bornapour M. Hybrid hydrogen-battery storage to smooth solar energy volatility and energy arbitrage considering uncertain electrical-thermal loads. *Renewable Energy*, 2020, vol. 154, pp. 1180–1187.
14. Puranen P., Kosonen A., Ahola J. Technical feasibility evaluation of a solar PV based off-grid domestic energy system with battery and hydrogen energy storage in northern climates. *Solar Energy*, 2021, vol. 213, pp. 246–259.
15. Pan G., Gu W., Qiu H., Lu Y., Zhou S., Wu Z. Bi-level mixed-integer planning for electricity-hydrogen integrated energy system considering leveled cost of hydrogen. *Applied Energy*, 2020, vol. 270, 115176.
16. Gabrielli P., Poluzzi A., Jan Kramer G., Spiers C., Mazzotti M., Gazzani M. Seasonal energy storage for zero-emissions multi-energy systems via underground hydrogen storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, vol. 121, 109629.
17. You C., Kim J. Optimal design and global sensitivity analysis of a 100% renewable energy sources based smart energy network for electrified and hydrogen cities. *Energy Conversion and Management*, 2020, vol. 223, 113252.
18. Marchenko O.V., Solomin S.V. Modeling of hydrogen and electrical energy storages in wind/PV energy system on the Lake Baikal coast. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, vol. 42, Iss. 15, pp. 9361–9370.
19. Krasae-in S., Stang J.H., Neksa P. Exergy analysis on the simulation of a small-scale hydrogen liquefaction test rig with a multi-component refrigerant refrigeration system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, vol. 35, Iss. 15, pp. 8030–8042.
20. Wijayanta A.T., Oda T., Purnomoc C.W., Kashiwagi T., Aziz M. Liquid hydrogen, methylcyclohexane, and ammonia as potential hydrogen storage: comparison review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, vol. 44, Iss. 29, pp. 15026–15044.
21. Bracha M., Lorenz G., Patzelt A., Wanner M. Large-scale hydrogen liquefaction in Germany. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1994, vol. 19, pp. 53–59.
22. Drnevich R. *Hydrogen delivery – liquefaction & compression, strategic initiatives for hydrogen delivery workshop*. Available at: [www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/liquefaction\\_comp\\_pres\\_praxair.pdf](http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/liquefaction_comp_pres_praxair.pdf) (accessed 1 July 2022).
23. Scott R.B., Denton W.H., Nicholls C.M. *Technology and uses of liquid hydrogen*. Oxford, Pergamon Press, 1964. 56 p.
24. Asadnia M., Mehropooya M. A novel hydrogen liquefaction process configuration with combined mixed refrigerant systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, vol. 42, Iss. 23, pp. 15564–15585.
25. *Global wind atlas*. Available at: <https://globalwindatlas.info> (accessed 1 July 2022).
26. *Global solar atlas*. Available at: <https://globalsolaratlas.info> (accessed 1 July 2022).
27. Murcia J.P., Koivisto M.J., Luzia G., Olsen B.T., Hahmann A.N., Sørensen P.E. Validation of European-scale simulated wind speed and wind generation time series. *Applied Energy*, 2022, vol. 305, 117794.
28. Gleixner S., Demissie T., Diro G.T. Did ERA5 improve temperature and precipitation reanalysis over East Africa? *Atmosphere*, 2020, vol. 11, 996.
29. Zou J., Lu N., Jiang H., Qin J., Yao L., Xin Y., Su F. Performance of air temperature from ERA5-Land reanalysis in coastal urban agglomeration of Southeast China. *Science of The Total Environment*, 2022, vol. 828, 154459.
30. Yang D., Bright J.M. Worldwide validation of 8 satellite-derived and reanalysis solar radiation products: a preliminary evaluation and overall metrics for hourly data over 27 years. *Solar Energy*, 2020, vol. 210, pp. 3–19.
31. Colmenar-Santos A., Campiez-Romero S., Enriquez-Garcia L.A., Pérez-Molina C. Simplified analysis of the electric power losses for on-shore wind farms considering Weibull distribution parameters. *Energies*, 2014, vol. 7, iss. 11, pp. 6856–6885.
32. Schlez W., Phillips J., Rados K., Zervos A., Politis E.S., Chaviropoulos P.K. Modelling and measuring flow and wind turbine wakes in large wind farms offshore. *Wind Energy*, 2009, vol. 12, iss. 5, pp. 431–444.
33. Jung C., Schindler D. The role of the power law exponent in wind energy assessment: A global analysis. *International Journal of Energy Research*, 2021, vol. 45, pp. 8484–8496.
34. Ekici S., Kopru M.A. Investigation of PV system cable losses. *International Journal of Renewable Energy Research*, 2017, vol. 7, Iss. 2, pp. 807–815.
35. Noorian A.M., Moradi I., Kamali G.A. Evaluation of 12 models to estimate hourly diffuse irradiation on inclined surfaces. *Renewable Energy*, 2008, vol. 33, pp. 1406–1412.
36. Khalil S.A., Shaffie A.M. A comparative study of total, direct and diffuse solar irradiance by using different models on horizontal and inclined surfaces for Cairo, Egypt. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, vol. 27, pp. 853–863.
37. Aoun N. Methodology for predicting the PV module temperature based on actual and estimated weather data. *Energy Conversion and Management*, 2022, vol. 14, 100182.
38. Santiago I., Trillo-Montero D., Moreno-Garcia I.M., Pallarés-López V., Luna-Rodríguez J.J. Modeling of photovoltaic cell temperature losses: A review and a practice case in South Spain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 90, pp. 70–89.
39. *Kontsepsiya razvitiya vodorodnoy energetiki v Rossiyskoy Federatsii* [The concept of the development of hydrogen energy in the Russian Federation. Decree of the Government of the Russian Federation dated August 5, 2021 no. 2162-r].
40. *Basic hydrogen strategy*. Ministerial council on renewable energy, hydrogen and related issues. 2017. Available at: [https://www.meti.go.jp/english/press/2017/1226\\_003.html](https://www.meti.go.jp/english/press/2017/1226_003.html) (accessed 1 July 2022).
41. Popov S.P. Methodological approach to the study of the electro-hydrogen system in northeast Asia. *Alternative Energy and Ecology*, 2020, Iss. 25–27, pp. 84–94. In Rus.
42. *Mongolia renewables readiness*. International Renewable Energy Agency (IRENA). 2016. Available at: <https://www.irena.org/publications/2016/Mar/Renewables-Readiness-Assessment-Mongolia> (accessed 1 July 2022).
43. *Vestas V117-4.2 MW*. Available at: <https://www.vestas.com/en/products/4-mw-platform/V117-4-2-MW> (accessed 1 July 2022).
44. *Vestas V136-3.45 MW*. Available at: <https://www.vestas.com/en/products/4-mw-platform/V136-3-45-MW> (accessed 1 July 2022).
45. *Jinko solar*. Available at: <https://www.jinkosolar.com/en/site/dwparametere> (accessed 1 July 2022).
46. *Renewable power generation costs in 2020*. Available at: <https://www.irena.org/publications/2021/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2020> (accessed 1 July 2022).
47. *Copernicus Climate Data Store*. Available at: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels> (accessed 1 July 2022).
48. Shakirov V.A., Artemiev A.Yu. *Mnogokriterialnaya otsenka effektivnosti ispolzovaniya vetroenergeticheskikh ustanovok (Wind-MCA)* [Multi-criteria assessment of the effectiveness of the use of wind power plants (Wind-MCA)]. Certificate of state registration of the computer program no. 2014619044, 2014.
49. Kurbatsky V.G., Shakirov V.A. Methodology and software for assessing the wind energy potential of the northeast of Russia. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2020, vol. 24, Iss. 1, pp. 145–163. In Rus.
50. *Ceres Data Products*. Available at: <https://ceres.larc.nasa.gov/data/> (accessed 1 July 2022).
51. *Hydrogen production and uses*. Available at: <https://www.world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/hydrogen-production-and-uses.aspx> (accessed 1 July 2022).
52. *Lazard's leveled cost of hydrogen analysis*. Available at: <https://www.lazard.com/media/451779/lazards-levelized-cost-of-hydrogen-analysis-vf.pdf> (accessed 1 July 2022).
53. Yilmaz C. A case study: exergoeconomic analysis and genetic algorithm optimization of performance of a hydrogen liquefaction cycle assisted by geothermal absorption precooling cycle. *Renewable Energy*, 2018, vol. 128 (PA), pp. 68–80.

54. *Review of hydrogen transport cost and its perspective (liquefied hydrogen)*. Eds. S. Kimura, I. Kutani, O. Ikeda, R. Chihiro. *Demand and Supply Potential of Hydrogen Energy in East Asia – Phase 2. ERIA Research Project Report FY2020 no. 16*. Jakarta, ERIA, 2020. pp. 60–89.
55. Connelly E., Penev M., Elgowainy A., Hunter C. *Current status of hydrogen liquefaction costs*. DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record 19001. 2019. Available at: [https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/19001\\_hydrogen\\_liquefaction\\_costs.pdf](https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/19001_hydrogen_liquefaction_costs.pdf) (accessed 1 July 2022).

*Received: 14 July 2022.  
Reviewed: 30 September 2022.*

#### **Information about the authors**

**Sergey P. Popov**, Cand. Sc., senior researcher, Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

**Valdislav A. Shakirov**, Cand. Sc., senior researcher, Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

**Anton V. Kolosnitsyn**, junior researcher, Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

**Darya V. Maksakova**, junior researcher, Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

**Oleg A. Baldynov**, junior researcher, Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

UDC 622.276.53

## IMPROVING SUCKER ROD PUMP EFFICIENCY USING FREQUENCY CONTROLLED INDUCTION MOTOR

**Samuel Isaac Teclé**<sup>1</sup>,  
samuel47tecle@gmail.com

**Anatolii M. Ziuzev**<sup>1</sup>,  
a.m.zyuzev@urfu.ru

**Alex V. Kostylev**<sup>1</sup>,  
a.v.kostylev@urfu.ru

<sup>1</sup> Ural Federal University,  
19, Mira street, Yekaterinburg, 620002, Russia.

**Relevance.** In sucker rod pump installations, the cost of the prime mover's power use has substantial effect on the overall operational cost. Reduction in power consumption can lead to reduction in operating cost. Hence, as the sucker rod pump is dominant in the oil industry, any means which reduces the energy consumption can produce considerable economic benefit and help to meet the energy efficiency targets and standards. Due to the losses in the prime mover, surface transmission, and sucker rod string the power required to lift oil to the surface is always less than the power input to the prime mover. Induction motors, which are widely used as prime movers in sucker rod pump installations, operate at significantly lower efficiency and at a load lower than their rated capacity. Therefore, the demand for efficiency improvement is readily seen. This demand can be achieved by controlling motor losses through AC-DC-AC converter.

**The main aim** of the research is to develop control strategy that helps to operate the sucker rod pump drive at optimal efficiency.

**Objects:** electrical drive, sucker rod pump, oil producing well.

**Method:** integrated simulation model consisting of the models of AC-DC-AC converter, induction motor including iron loss, sucker rod pump; vector control; generation of optimal magnetizing current trajectory for one cycle of pump operation.

**Result.** The energy consumption of sucker rod pump unit for operation at rated flux and the one based on optimal magnetizing current trajectory were compared using an integrated simulation model. The simulation results indicate that about 1,6 % of the required energy can be saved when the sucker rod pump is operated based on the calculated optimal magnetizing current trajectory.

### Key words:

Sucker rod pump, optimized control, induction machine, core loss, field-oriented control, variable speed drive.

### Introduction

Throughout the world, electric motors consume around 70 % of the total energy consumption and nearly 90 % of it is used up by three phase induction motors in the power range from 0,75 to 750 KW [1]. Induction motor (IM) is without doubt the workhorse of electric power industry [2]. It is the principal element in most applications like pump, lift, exhaust fans, hoist drives etc. Its simple, strong and effective construction, good efficiency, and low cost are the main factors that encouraged its use in wide applications. However, induction motors are inefficiently utilized in most industries because the use of the same electric motor (size, power, model) is common for reasons of standardization practices and maintenance costs [3]. In addition, the IM control is more difficult because it represents nonlinear system with a coupled multi-input multi-output system.

Motivated by the diversified application needs, electric motor manufacturers have produced different IM designs to improve the performance of induction motors. Depending on the torque-speed characteristics, National Electrical Manufacturers Association (NEMA) classifies induction motors into design A, B, C, D and E. The most significant machine parameter in this classification is the actual rotor resistance [2]. Since there are significant differences among the different designs in their torque-speed characteristics, familiarity with these standards is required for making correct decision during selection for

a particular application. The most used designs are design B (normal torque) and design C (high torque) [4]. Design B motors have steep speed-torque, speed-current and speed-efficiency characteristics close to the nominal operational speed. They can suite for various application operated at nearly nominal speed. However, a small change in the speed causes large changes in the efficiency and stator current [5]. This means, when this type of motor does not maintain their nominal operational speed, for example when they drive a variable load such as sucker rod pump, a drastic decrease in efficiency can be observed. For these applications, induction motors with design D are preferred. Design D induction motors are characterized by high starting torque, low starting current and high operating slip [6].

Although the input energy to the electrical motor drive largely appears in useful work but there is usually energy lost in the motor winding, magnetic circuit together with conduction and commutation losses of the inverter. Thus, the total loss consists of converter losses and motor losses. At nominal operating condition, the efficiencies of converters can reach 98 % and the efficiencies of medium and high rating motors are over 95 % whereas, at partial loads the efficiency declines considerably [7]. For small drives, the converter losses can be neglected in efficiency optimal control [8, 9]. Power loss in the motor include stator and rotor copper losses, iron losses, windage and friction losses, additional losses [10, 11]. Copper losses

and iron losses are controllable. However, development of a comprehensive model of losses for an electric drive system is fundamental to control system design. The copper losses appear in the form of heat loss in the stator and rotor resistors and hence their effect is included even in the most basic equivalent circuit. Mechanical losses occur in the form of frictional loss and the aerodynamic loss. The effect of mechanical losses can be integrated into the mechanical equation using viscous friction coefficient and dry friction torque. On the other hand, since iron losses have magnetic nature, their effect can be approximated using an equivalent torque in the mechanical equation [12] or an equivalent resistor [7–9, 12–14] in the equivalent circuit.

In the field-oriented coordinate system, the torque developed by IM is proportional to the product of rotor flux and torque producing current. The needed torque producing current is determined by speed controller, but the rotor flux remains degree of freedom for optimization. Studies conducted to examine the effect of rotor flux on power loss indicate that as rotor flux decreases, the copper losses increase but iron losses decrease. Therefore, operation at optimal efficiency can be achieved by acting on the reference flux. Several reports [15–26] have already been conducted aiming to reduce the power losses in induction motor drive. Based on the ways employed to reach the objective, efficiency optimization methods can be grouped into simple control, model-based control, search control, hybrid method (combination of model-based control and search control). When scalar control is used, optimal energy efficiency operation can be obtained by acting on the input voltage and frequency. In [27, 28], energy efficiency strategies for scalar control have been presented.

The simple state control is the simplest method based on some facts that are observed during the operation of optimal efficiency. For example, it was observed in [9] that the variation of power factor is small when efficiency is optimal such that it can be considered constant. As alternate to power factor, in [17, 18] it has been demonstrated that optimal efficiency is maintained when the motor is operated at constant slip determined only from motor parameters. The disadvantage of this approach is that the accuracy of this method is limited to a narrow set of conditions for use and there could be shift of optimal operating point due to parameter variations. Model-based control is the fastest approach. However, analytical solution to minimum power loss model might be very difficult. In addition, parameter variation influences the accuracy of the obtained result. The search control does not require knowledge of motor or converter parameters, it simply decreases the stator current or rotor flux in steps until minimum input power for a given output is measured. This method slowly converges to the optimal point and has poor dynamic performance due to torque pulsations. The hybrid method combines the good characteristics of the model-based controller and search control. Hence, it gives fast convergence to operating point with minimum power losses and shows good dynamic performance and no sensitivity to parameter changes [22].

When IM drives a cyclic load, optimization problem formulation must fully involve the nature of the closed cycle operation. For such a problem, the possibility of obtaining optimal solution has been shown in [23, 24] using dynamic programming. In [24] a steady state loss minimization has also been extended to dynamic operation and results loss saving comparable to the optimal dynamic programming method.

This paper presents the strategy for improving sucker rod pump efficiency by optimally controlling IM. First, mathematical model of induction motor including core loss is presented. Based on this model, the expression for the total loss and for the optimal magnetizing current in steady state are derived. With the help of the expression for optimal magnetizing current and specified constraints, the permissible range for optimization is defined. Then with the required consideration, a numerical algorithm is outlined to find a good approximation of optimal magnetizing current trajectory. Finally, simulation results and conclusion of the work are presented.

### Model of Induction Motor

Electromagnetic process in 3 phase AC machines can be clearly described with the help of equivalent circuits. IM model developed in a two phase reference frame is the most convenient representation with which equivalent circuit can be constructed [29]. The inverse  $\Gamma$  equivalent circuit (Fig. 1) is the most widely used equivalent circuit when designing controllers. The inverse  $\Gamma$  equivalent circuit contains four parameters with the total leakage inductance in the stator mesh and all the parameters that describe the model of IM can be determined by the standard tests. From Fig. 1, the stator mesh and rotor mesh can be written as:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_s &= R_s \mathbf{i}_s + \sigma L_s \frac{d\mathbf{i}_s}{dt} + \omega_k \sigma L_s B \mathbf{i}_s + \\ &+ (1 - \sigma) L_s \frac{d\mathbf{i}_m}{dt} + \omega_k (1 - \sigma) L_s B \mathbf{i}_s, \\ 0 &= \left( \frac{L_m}{L_r} \right)^2 R_r \left( \frac{L_r}{L_m} \mathbf{i}_r \right) + (1 - \sigma) L_s \frac{d\mathbf{i}_m}{dt} + \\ &+ (\omega_k - \omega) (1 - \sigma) L_s B \mathbf{i}_m, \end{aligned}$$

where  $R_s$  is the stator resistance;  $R_r$  is the rotor resistance;  $L_s$  is the stator inductance;  $L_r$  is the rotor inductance;  $L_m$  is the mutual inductance;  $\omega$  is the rotor speed;  $\omega_k$  is the synchronous speed.

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_s &= [u_{sd} \ u_{sq}]^T; \quad \mathbf{i}_s = [i_{sd} \ i_{sq}]^T; \quad \mathbf{i}_m = [i_{md} \ i_{mq}]^T; \\ \sigma &= 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}; \quad B = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Electrical machines are made of high permeable ferromagnetic material, which helps to increase the machines efficiency. However, the time and space variation of the magnetic flux induces iron losses [30] that considerably affect the accuracy of the model used. For a time-dependent applied magnetic field, the total iron loss comprises hysteresis, classical eddy current loss and excess losses [31].

Assuming sinusoidal flux pattern is given by:

$$\psi(t) = dB_p \sin(2\pi ft),$$

where  $d$  is the thickness of the sheet,  $B_p$  is the peak value of flux density and  $f$  is the frequency, the total iron loss is calculated as in [31]:

$$P_{fe} = P_h + P_e + P_{ex} = aB_p^\alpha f + bB_p^2 f^2 + cB_p f \left( \sqrt{1 + eB_p f} - 1 \right), \quad (1)$$

where  $\alpha$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , and  $e$  are the material related parameters fitted based on the loss measurements under sinusoidal flux condition.

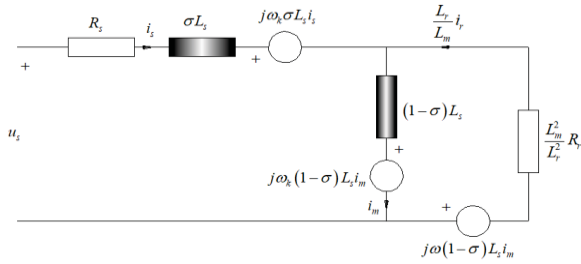


Fig. 1. Inverse  $\Gamma$  equivalent circuit

Рис. 1.  $\Gamma$ -образная схема замещения

The effect of iron loss can be represented by an equivalent resistance. However, since the iron loss

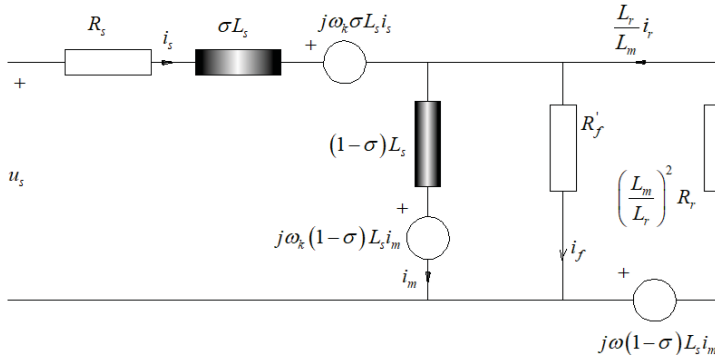


Fig. 2. Equivalent circuit of IM including core loss

Рис. 2. Эквивалентная схема АД с учётом потерь в стали

Equations (2) and (3) can be expressed along the mechanical equation in state space form as:

$$\frac{d\mathbf{i}_s}{dt} = -\frac{1}{T_\sigma} \mathbf{i}_s - \omega_s \mathbf{B} \mathbf{i}_s + \mathbf{A} \mathbf{i}_m - \mathbf{A} T_r \omega \mathbf{B} \mathbf{i}_m + \frac{\mathbf{u}_s}{\sigma L_s},$$

$$\frac{d\mathbf{i}_m}{dt} = -\frac{1}{T_{rfe}} \mathbf{i}_m + \frac{1}{T_{rfe}} \mathbf{i}_s - \left( \omega_s - \frac{T_r}{T_{rfe}} \omega \right) \mathbf{B} \mathbf{i}_m,$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{z_p}{J} (M_e - M_L),$$

$$M_e = 1.5 z_p (1 - \sigma) L_s (i_{md}' i_{rq}' - i_{mq}' i_{rd}'),$$

where  $M_L$ ,  $z_p$ , and  $J$  are the load torque, pair of poles and equivalent moment of inertia respectively and the rest of the terms are defined as follows  $\mathbf{i}_r = [i_{rd}' i_{rq}']^T$ ;

expressed by (1) is a function of magnetic field and frequency, a fixed equivalent resistor cannot represent the effect of iron loss in the dynamic model. The equivalent resistor could be placed in series or in parallel to the magnetizing inductance. In both approaches, the no load test and locked rotor test can be used to determine the value of the equivalent resistance. Fig. 2 shows the steady state model of IM including core loss with the leakage inductance in the stator mesh. Using Kirchhoff's voltage and current laws, the following equations can be written:

$$\mathbf{u}_s = R_s \mathbf{i}_s + \sigma L_s \frac{d\mathbf{i}_s}{dt} + \omega_s \sigma L_s \mathbf{B} \mathbf{i}_s + (1 - \sigma) L_s \frac{d\mathbf{i}_m}{dt} + \omega (1 - \sigma) L_s \mathbf{B} \mathbf{i}_m, \quad (2)$$

$$\mathbf{i}_s = \mathbf{i}_m + (1 - \sigma) L_s \left( \frac{1}{R_f} + \frac{T_r}{(1 - \sigma) L_s} \right) \frac{d\mathbf{i}_m}{dt} + (1 - \sigma) L_s \left( \frac{\omega_s}{R_f} + \frac{(\omega_s - \omega) T_r}{(1 - \sigma) L_s} \right) \mathbf{B} \mathbf{i}_m, \quad (3)$$

$$R_f \mathbf{i}_f = (1 - \sigma) L_s \frac{d\mathbf{i}_m}{dt} + (1 - \sigma) L_s \omega_s \mathbf{B} \mathbf{i}_m,$$

where  $\mathbf{i}_f = [i_{fd}' i_{fq}']^T$ .

$$T_r = \frac{L_r}{R_r}; \quad T_{rfe} = T_r + \frac{(1 - \sigma) L_s}{R_{fe}}; \quad \frac{1}{T_\sigma} = \frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{1 - \sigma}{\sigma T_{rfe}};$$

$$\mathbf{A} = \frac{1 - \sigma}{\sigma T_{rfe}}; \quad R_r' = \left( \frac{L_m}{L_r} \right)^2 R_r; \quad \mathbf{i}_r' = \frac{L_r}{L_m} \mathbf{i}_r.$$

#### Loss model and optimal $I_{sd}$ generation

Mechanical losses are independent of the stator current, but they depend on the speed. Therefore, the total electrical losses can be obtained by:

$$P_{loss} = R_s (i_{sd}'^2 + i_{sq}'^2) + R_r' (i_{rd}'^2 + i_{rq}'^2) + R_{fe} (i_{fd}'^2 + i_{fq}'^2).$$

Optimal magnetizing current generation in steady state

Using vector control, IM can have DC machine like performance. The stator voltage space vector can be

oriented with respect to space vector of either rotor flux, air gap flux or stator flux. Applying rotor-flux-oriented constraints, we get:

$$\begin{aligned}\psi_{rq} &= (1 - \sigma) L_s i_{mq} = 0, \\ i_{sd} &= i_{md} + T_{rfe} \frac{di_{md}}{dt}, \\ \omega_{slip} &= \frac{1}{T_{rfe}} \left( \frac{i_{sq}}{i_{md}} - (T_{rfe} - T_r) \omega \right), \\ M_e &= K_t i_{sq} i_{md},\end{aligned}$$

where  $K_t = 1.5z_p(1 - \sigma)L_s$ .

In steady state

$$\begin{aligned}i_{mq} &= 0; \quad i'_{rd} = 0; \quad i'_{fd} = 0; \quad i_{sd} = i_{md}; \\ i_{fe} &= i_{fq}; \quad i'_r = i'_{rq}; \quad i_{sq} = i_{fe} + i'_r\end{aligned}$$

and using KVL in rotor circuit  $i'_r$  can be written as:

$$i'_r = \frac{R_f}{R_f + R'_r} i_{sq} - \omega \frac{(1 - \sigma) L_s}{R_f + R'_r} i_{sd}.$$

Therefore, the total power loss can be written as:

$$P_{loss} = R_d i_{sd}^2 + R_q i_{sq}^2,$$

where

$$R_d = R_s + \frac{(1 - \sigma)^2 L_s^2}{R_f + R'_r} \omega^2; \quad R_q = R_s + \frac{R_f R'_r}{R_f + R'_r}.$$

Obviously, both direct and quadrature components of the controlled current have effect on the total energy loss. So, for a given torque producing current ( $i_{sq}$ ) the optimal flux producing current ( $i_{sd}$ ) exists which minimizes the electric motor losses.

The power loss can also be given in terms of operating condition:

$$P_{loss} = R_d i_{sd}^2 + R_q \frac{M_e^2}{K_t^2 i_{sd}^2}.$$

For constant torque, differentiating the loss function, the optimal flux producing current ( $i_{sd}$ ) can be calculated as follows:

$$i_{md}^{opt} = i_{sd}^{opt} = \left( \frac{\gamma}{R_d} \right)^{0.25}, \quad (4)$$

where  $\gamma = R_q \frac{M_e^2}{K_t^2}$ ,

then optimal rotor flux can be determined by:

$$\psi_r^{opt} = L_m i_{sd}^{opt}. \quad (5)$$

The optimal rotor flux is a function of speed and torque. It can be computed using (5) for each possible torque-speed operating point. However, in practice there are voltage and current constraints which reduce the range of values to be searched.

Optimal magnetizing current generation under voltage and current constraints

In practice, the problem of efficiency optimized control of induction motor drive aims to minimize energy consumption under voltage and current constraints. To avoid magnetic saturation, the rotor flux is further limited to its rated value. Furthermore, to maintain controllability and limit peak currents, the rotor flux is not reduced below an arbitrarily minimum level. Therefore, no optimization can be recommended in the region shaded by red in Fig. 3. Consequently, the reference flux is set equal to rated value. As it is shown in Fig. 3 the rotor flux can be optimized for torque load less than 149 at base speed and less than 40 at 10 percent of base speed.

In steady state for field-oriented coordinate system, the stator voltage equations can be written as:

$$\begin{aligned}v_{sd} &= R_s i_{sd} - \omega_s \sigma L_s i_{sq}, \\ v_{sq} &= R_s i_{sq} + \omega_s \sigma L_s i_{sd} + \omega_s (1 - \sigma) L_s i_{md}.\end{aligned}$$

If the voltage drop due to stator resistance is neglected, the voltage constraint can be stated as:

$$(\omega_s \sigma L_s i_{sq})^2 + (\omega_s L_s i_{sd})^2 \leq v_{max}^2.$$

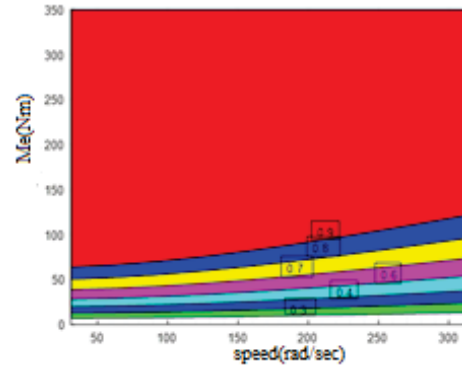


Fig. 3. Optimal rotor flux values per load torque and speed requirement

Рис. 3. Оптимальные значения магнитного потока ротора в функции момента нагрузки и скорости

Considering the constraints mentioned, the problem is formulated as:

$$\min \{ P_{loss}(i_{sd}, i_{sq}) \}, \quad (6)$$

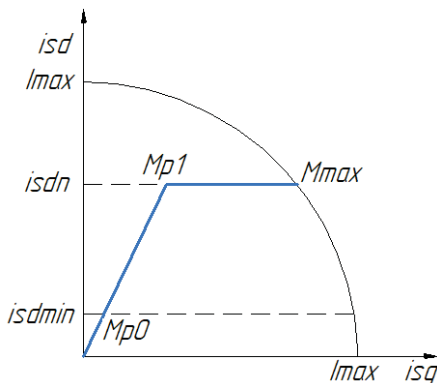
subject to:

$$\begin{aligned}M_e &= K_t i_{sd} i_{sq}, \quad i_{sd}^2 + i_{sq}^2 - I_{max}^2 \leq 0, \quad i_{sd} \leq i_{sdn}, \\ i_{sd} &\geq i_{sd \min}, \quad 0 \leq v_d^2 + v_q^2 < v_{max}^2.\end{aligned}$$

In the basic speed range, the voltage limitation is not effective. Fig. 4 shows the relation between optimal flux producing current and torque producing current in the basic speed range. For the region inside the inequality, the optimal flux producing current can be calculated by (4) and the following relation holds between torque producing current and flux producing current:



$$i_{qs} = \left( \frac{R_d}{R_q} \right)^{0.5} i_{sd}$$



**Fig. 4.** Relation between optimal flux and torque producing currents in base speed range

**Рис. 4.** Связь намагничивающей и моментной составляющих тока статора в диапазоне базовых скоростей

The lower limit of flux producing current defines the torque  $M_{p0}$ :

$$M_{p0} = K_t \left( \frac{R_d}{R_q} \right)^{0.5} i_{sd\min}^2$$

The upper limit of the flux producing current defines the torque  $M_{p1}$ :

$$M_{p1} = K_t \left( \frac{R_d}{R_q} \right)^{0.5} i_{sdn}^2$$

The maximum torque ( $M_{max}$ ) is defined by the maximum value of flux producing current and maximum stator current as:

$$M_{max} = K_t i_{sdn} \left( I_{max}^2 - i_{sdn}^2 \right)^{0.5}$$

For a load torque greater than  $M_{p1}$  and less than the maximum torque ( $M_{max}$ ), the following relation holds:

$$i_{sd} = i_{sdn}; \quad \left( \frac{R_d}{R_q} \right)^{0.5} i_{sdn} < i_{sq} \leq \left( I_{max}^2 - i_{sdn}^2 \right)^{0.5}$$

Optimal magnetizing current generation for sucker rod pump applications

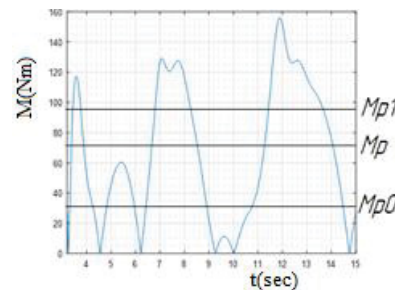
The nature of the load exerted on sucker rod pump drive is cyclic. Therefore, efficiency optimal control strategy for sucker rod pump drive deals with minimizing the total loss in a cycle under given constraints. Consequently, the objective function in (6) is replaced by:

$$\min \left\{ \int_0^T P_{loss}(i_{sd}, i_{sq}) dt \right\}, \quad (7)$$

where  $T$  is the period of one cycle of pump operation.

The task of the optimization is to find an optimal magnetizing current trajectory that satisfies the objective function (7). In offline for a given torque and speed

trajectories, for all possible magnetizing current trajectories, the energy consumption is examined, and the optimal magnetizing current trajectory is stored and uploaded to the controller. Since for a given sucker rod pump installations a change on trajectory occurs after long time, one calculated optimal trajectory can be used for a longer time. However, if any change occurs another optimal trajectory must be recalculated.



**Fig. 5.** Absolute value of given load torque curve

**Рис. 5.** Абсолютное значение заданной диаграммы момента нагрузки

To define rotor magnetizing current trajectory, the minimum and maximum flux producing current constraints and the minimum time interval for constant flux operation are considered. The minimum time interval for constant flux operation depends on the existing delay in the forming of rotor flux. Fig. 5 shows the absolute value of a given load torque trajectory. It is used for finding a good approximation of optimal magnetizing current trajectory. A simple numerical algorithm to find optimal rotor magnetizing current trajectory can be outlined as follows:

- calculate the steady state electromagnetic torque corresponding to lower limit of optimal flux producing current ( $M_{p0}$ ) and upper limit of the optimal flux producing current ( $M_{p1}$ );
- list constant torque ( $M_p$ ) operations in the range from  $M_{p0}$  to  $M_{p1}$ ;
- select the steady state electromagnetic torques which divide the absolute value of the torque trajectory into time intervals greater than the minimum time interval for constant flux operation;
- for each selected steady state electromagnetic torque, define the flux producing current trajectory by setting its value to  $i_{sdn}$  for the part of torque trajectory above the selected steady state electromagnetic torque otherwise to the corresponding optimal flux producing current;
- for each flux producing current trajectory, calculate the energy loss for one complete cycle of pump operation;
- the flux producing current trajectory with minimum energy loss is selected as an optimal magnetizing current trajectory.

The required optimal operating conditions are obtained with the help of control system. Fig. 6 shows block diagram for closed loop vector control scheme proposed for sucker rod pump drive. In steady state, the PI regulator forces the measured speed and reference

speed to be equal. The block PC LMA calculates optimal magnetizing current trajectory based on the proposed loss minimization strategy for a given speed and torque trajectories and stores it. The stored optimal magnetizing current trajectory is uploaded to the controller and used as a reference. But if the torque trajectory

shows some change, a new optimal magnetizing current trajectory is calculated to consider the effect of the changes.  $T_\phi$  is the time constant of a low pass filter. It presents a certain time delay in the forming of the rotor flux, which ensures decoupled flux and torque control in dynamic conditions.

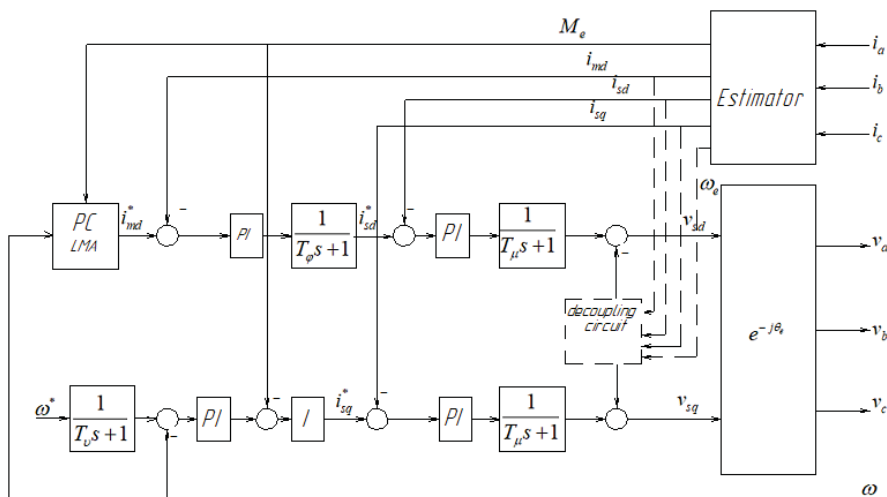


Fig. 6. Block diagram of proposed loss minimization strategy

Рис. 6. Блок-схема предлагаемой стратегии минимизации потерь

### Simulation results

To investigate the power loss minimization strategy for induction motor driving sucker rod pump, a numerical simulation has been carried in Matlab software. In the simulation the following parameters are used:  $R_s=0,1815$  ohm;  $R_r=0,0868$  ohm;  $L_s=0,048$  H;  $L_r=0,0481$  H;  $L_m=0,0465$  H;  $R_{fe}=400$  ohm;  $f=50$  Hz. Two cases: operation at rated flux and operation at optimal magnetizing current trajectory, were considered. Fig. 7 compares the input power for operation at rated rotor flux with the proposed optimal magnetizing current trajectory. Their difference is shown in Fig. 8 for clarity. From this result one can observe that the input power requirement at light loads is considerably reduced. As it is shown in the Table the energy consumed in one cycle of pump operation is lower when the efficiency optimized control strategy is applied than the operation at rated flux. 1,6 % of the required energy can be saved if the drive is run based on optimal magnetizing current trajectory than just running at constant rated magnetizing current. Since sucker rod pumps work for several hours per day, a small improvement in efficiency generates significant revenues.

Fig. 9–11 show the response of actual magnetizing current, flux producing stator current, rotor speed respectively, when the efficiency optimization strategy is activated. The role of the delay introduced in the d-axis is apparent from the response of flux producing current.

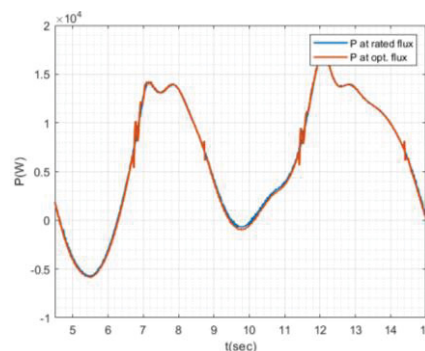


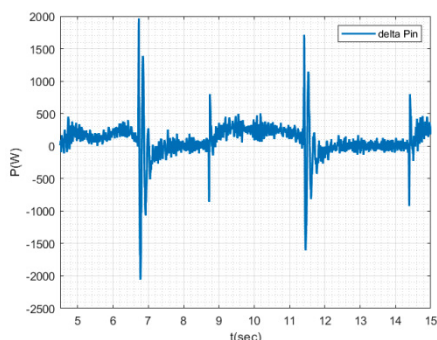
Fig. 7. Input power to the motor (blue – with rated flux, red – with optimal flux)

Рис. 7. Входная мощность двигателя (синий – при номинальном потоке, красный – при оптимальном потоке)

Table. Comparison of energy consumed for operation at rated flux and optimal magnetizing current trajectory

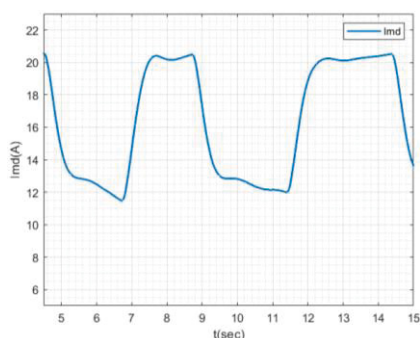
Таблица. Сравнение энергии, потребляемой двигателем при работе с номинальным потоком и при оптимальной траектории тока намагничивания

Case Вариант	Energy consumed in one cycle of pump operation (Joules) Энергия, потребляемая двигателем за один цикл работы насоса (Дж)	Fluid produced by downhole pump (m <sup>3</sup> ) for one cycle of operation Подача глубинного насоса (м <sup>3</sup> ) за один цикл работы	Volumetric efficiency (KWh/m <sup>3</sup> ) Удельная эффективность (кВт.ч/м <sup>3</sup> )
Operation at rated flux Работа при номинальном потоке	65078	0,0575	0,314
Operation at optimal flux Работа при оптимальном потоке	64123	0,0575	0,309



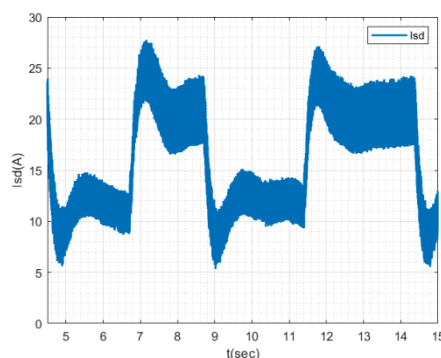
**Fig. 8.** Difference between power input at rated flux and input power operation at optimal flux

**Рис. 8.** Разница между входной мощностью двигателя при номинальном потоке и при оптимальном потоке



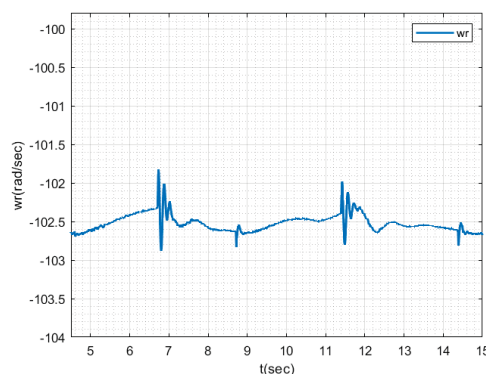
**Fig. 9.** Magnetizing current

**Рис. 9.** Намагничивающий ток



**Fig. 10.** Flux producing stator current

**Рис. 10.** Намагничивающая составляющая тока статора



**Fig. 11.** Rotor speed

**Рис. 11.** Скорость ротора

## Conclusion

Loss minimization strategy for sucker rod pump drive has been presented in this paper. The proposed strategy uses a steady state electromagnetic torque to define magnetizing current trajectory. Form a list of steady state electromagnetic torque in the range of  $M_{p0}$  and  $M_{p1}$ , the energy consumption for one cycle of pump operation have been examined for given torque and speed trajectory. The magnetizing current trajectory corresponding to min-

imum energy have been used by the developed controller as a reference. The simulation results show that the proposed strategy offers considerable loss reduction in one cycle of pump operation while maintaining acceptable dynamic performance. According to the performed simulation results we can conclude that a significant amount of energy can be saved every day if the optimal magnetizing current is used as a reference.

## REFERENCES

- Gupta V.K., Tiwari B., Dewangan B. Efficiency optimization of induction motor drive: a review. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 2015, vol. 2, pp. 650–665.
- Bose B.K. *Modern power electronics and AC drives*. Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall PTR, 2002. 711 p.
- Farhani F., Zaafour A., Chaari A. Real time induction motor efficiency optimization. *Journal of the Franklin Institute*, 2017, vol. 354, no. 8, pp. 3289–3304.
- Hopper W.B., Rajan S. NEMA standards for induction motors and their application to the cement industry. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1974, vol. IA-10, no. 1, pp. 34–41.
- Koncz Á. *Sucker rod pumping analysis based on measured electrical parameters*. Phd thesis. Miskolc, 2018. 109 p.
- Zhang D., Ren Z., Koh C.-S. Multi-objective optimal design of a NEMA design D three-phase induction machine utilizing gaussian-MOPSO algorithm. *Journal of electrical engineering and technology*, 2014, vol. 9, no. 1, pp. 184–189.
- Quang N.P., Dittrich J.-A. *Vector control of three-phase AC machines – system development in the practice*. 2<sup>nd</sup> ed. Berlin, Heidelberg, Springer, 2015. 364 p.

- New trends in technologies: devices, computer, communication and industrial systems*. Ed. by M.J. Er. London, United Kingdom, IntechOpen, 2010. Available at: <https://www.intechopen.com/books/3720> doi: 10.5772/292 (accessed 15 August 2022).
- Abrahamsen F., Blaabjerg F., Pedersen J. K., Thøgersen P.B. Efficiency-optimized control of medium-size induction motor drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2001, vol. 37, no. 6, pp. 1761–1767.
- Duran T., Šimović V., Komljen B.V. Comparison of different methods for efficiency determination acc.to IEC for specific induction motor. *44<sup>th</sup> International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO)*. Opatija, Croatia, 2021. pp. 172–176.
- Hristova M.I., Ruseva V.S., Krasteva A.H. Constant losses in induction motors and possible solutions for their reduction. *8<sup>th</sup> International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE)*. Ruse, Bulgaria, 2022. pp. 1–4.
- Khoury G. *Energy efficiency improvement of a squirrel-cage induction motor through the control strategy*. Phd thesis. Toulouse, 2018. pp. 31–33.
- Hung N.T., Nguyễn Chí Thiên, Thanh Phương Nguyễn, Viet So Le, Do Anh Tuan. Optimization of electric energy in three-phase induction motor by balancing of torque and flux dependent losses. *AETA 2013: Recent advances in electrical engineering and related*

- sciences. Verlag, Berlin, Haidelberg, Springer, 2014, vol. 282, pp. 497–507.
14. Baba A., Mendes E., Razek A. Losses minimisation of a field-oriented controlled induction machine by flux optimisation accounting for magnetic saturation. *1997 IEEE International Electric Machines and Drives Conference Record*. Milwaukee, WI, USA, 1997. pp. MD1–2.
  15. Bruno A., Caruso M., Tommaso A.O.D., Miceli R., Nevoloso C., Viola F. Simple and flexible power loss minimizer with low-cost MCU implementation for high-efficiency three-phase induction motor drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2021, vol. 57, no. 2, pp. 1472–1481.
  16. Sousa G.C.D., Bose B.K., Cleland J.G. Fuzzy logic based on-line efficiency optimization control of an indirect vector-controlled induction motor drive. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1995, vol. 42, no. 2, pp. 192–198.
  17. Feng Xiaogang, Chen Boshi. Constant slip control of induction motor at light load. *IECEC 96. Proceedings of the 31st Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, 1996, vol. 3, pp. 1828–1833.
  18. Abrahamsen F., Blaabjerg F., Pedersen J.K., Grabowski P.Z., Thogersen P. On the energy optimized control of standard and high-efficiency induction motors in CT and HVAC applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1998, vol. 34, no. 4, pp. 822–831.
  19. Chakraborty C., Ta M.C., Uchida T., Hori Y. Fast search controllers for efficiency maximization of induction motor drives based on DC link power measurement. *Proceedings of the Power Conversion Conference*. Osaka, 2002. Vol. 2, pp. 402–408.
  20. Eftekhari S.R., Davari S.A., Naderi P., Garcia C., Rodriguez J. Reducing the parameter dependency of model-based loss minimization method for induction motor drives. *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. Buenos Aires, Argentina, 2020. pp. 1106–1111.
  21. Jung C., Torrico C.R.C., Giovanni Carati E. Adaptive loss model control for robustness and efficiency improvement of induction motor drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, vol. 69, no. 11, pp. 10893–10903.
  22. Blanusa B., Knezevic B. Simple hybrid model for efficiency optimization of induction motor drives with its experimental validation. *Advances in Power Electronics*, 2013, vol. 2013, pp. 1–8.
  23. Blanusa B. New trends in efficiency optimization of induction motor drives. *New Trends in Technologies: Devices, Computer, Communication and Industrial Systems*. London, United Kingdom, IntechOpen, 2010. Available at: <https://www.intechopen.com/chapters/12290> (accessed 15 August 2022). DOI: 10.5772/10427.
  24. Mendes E., Baba A., Razek A. Losses minimization of a field oriented controlled induction machine. *Seventh International Conference on Electrical Machines and Drives* (Conf. Publ. No. 412). Durham, UK, 1995. pp. 310–314.
  25. Bizhani H., Muyeen S.M., Tatari F.R., Gao F., Geng H. Comparative analysis of search algorithm based loss minimization techniques used in vector controlled induction motors. *2<sup>nd</sup> International Conference on Smart Power & Internet Energy Systems (SPIES)*. Bangkok, Thailand, 2020. pp. 386–390.
  26. Tarviridilu-Asl R., Nalakath S., Xia Z., Sun Y., Wiseman J., Emadi A. Improved online optimization-based optimal tracking control method for induction motor drives. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, vol. 35, no. 10, pp. 10654–10672.
  27. Graciola C.L., Goedtel A., Angélico B.A. Energy efficiency optimization strategy for scalar control of three-phase induction motors. *J Control Autom Electr Syst*, 2022, vol. 33, pp. 1032–1043.
  28. Zhang Y., Baig S., Vahabzadeh T., Jatskevich J. Maximum efficiency volts-per-hertz control of induction motor drives considering core losses, saturation, and inverter losses. *International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET)*. Pargue, Czech Republic, 2022. pp. 1–7.
  29. Leonhard W. *Control of electrical drives*. 3<sup>rd</sup> ed. Berlin, Heidelberg, Springer, 2001. 460 p.
  30. Fratila M., Benabou A., Tounzi A., Dessoude M. Calculation of iron losses in solid rotor induction machine using FEM. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2014, vol. 50, no. 2, pp. 825–828.
  31. Kowal D., Sergeant P., Dupré L., Vandenbossche L. Comparison of iron loss models for electrical machines with different frequency domain and time domain methods for excess loss prediction. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2015, vol. 51, no. 1, pp. 1–10.

Received 15 October 2022.  
Reviewed 25 October 2022.

#### Information about the authors

**Samuel Isaac Teclé**, postgraduate student, Ural Federal University.

**Anatolii M. Ziuzev**, Dr. Sc., professor, Ural Federal University.

**Alex V. Kostylev**, Dr. Sc., Head of Department of Electrical Drives and Automation of Industrial Installations, Ural Federal University.

УДК 622.276.53

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ШТАНГОВОГО ГЛУБИННОГО НАСОСА

**Самуэль Исаак Текле<sup>1</sup>,**  
samuel47tecle@gmail.com

**Зюзов Анатолий Михайлович<sup>1</sup>,**  
a.m.zyuzev@urfu.ru

**Костылев Алексей Васильевич<sup>1</sup>,**  
a.v.kostylev@urfu.ru

<sup>1</sup> Уральский Федеральный университет,  
Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19.

**Актуальность.** В установках со штанговыми насосами стоимость электроэнергии, потребляемой приводным электродвигателем, составляет существенную долю затрат в общих эксплуатационных расходах на добычу нефти. Очевидно, что снижение энергопотребления электродвигателем приведёт к снижению эксплуатационных расходов. Поскольку штанговые насосы доминируют в нефтедобывающей отрасли, можно ожидать, что любые средства, обеспечивающие снижение потребления энергии, принесут значительную экономическую выгоду и позволят достичь целей и стандартов энергоэффективности. Анализ энергопотребления показывает, что из-за потерь в двигателе, наземной установке и колонне насосных штанг мощность, необходимая для подъема нефти на поверхность, ощутимо меньше мощности, потребляемой приводным двигателем. Асинхронные двигатели, широко используемые в штанговых насосных установках, работают с переменной нагрузкой, при этом среднецикловый КПД и коэффициент мощности значительно меньше номинального значения. Таким образом, спрос на повышение эффективности электропривода штанговых насосов очевиден. При использовании преобразователей частоты это требование может быть удовлетворено за счет уменьшения потерь в двигателе посредством коррекции закона частотного управления.

**Основной целью** исследования является разработка максимально эффективной по энергозатратам стратегии управления асинхронным частотно-управляемым электродвигателем штангового насоса на цикле работы механизма с переменной нагрузкой.

**Объекты:** частотно-регулируемый асинхронный электропривод, штанговый насос, нефтедобывающая скважина.

**Методы:** имитационное моделирование комплекса, состоящего из преобразователя частоты, асинхронного двигателя (с учетом потерь в стали), штангового насоса; аналитическое формирование оптимизированной траектории намагничивающей составляющей тока статора на цикле работы агрегата в системе векторного управления двигателем.

**Результат.** С использованием интегрированной имитационной модели сравнивались энергозатраты штанговой насосной установки при работе при номинальном потоке и при оптимизированной траектории намагничивающей составляющей тока статора. Результаты моделирования показывают, что около 1,6 % необходимой энергии может быть сэкономлено при работе штангового насоса на основе рассчитанной оптимальной траектории намагничивающего тока.

**Ключевые слова:**

штанговый насос, оптимизированное управление, асинхронная машина, потери в стали, поле-ориентированное управление, привод с регулируемой скоростью.

**Информация об авторах**

**Текле С.И.**, аспирант, Уральский Федеральный университет.

**Зюзов А.М.**, доктор технических наук, профессор, Уральский Федеральный университет.

**Костылев А.В.**, кандидат технических наук, заведующий кафедрой электропривода и автоматизации промышленных установок, Уральский Федеральный университет.

Поступила 15.10.2022.

Прошла рецензирование 25.10.2022.

УДК 620.179.14

## ЭМПИРИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСПОЗНАВАНИЯ ГРУППЫ СТРЕСС-КОРРОЗИОННЫХ ТРЕЩИН В МЕТАЛЛЕ ПО СИГНАЛУ НАКЛАДНОГО ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

**Загидулин Ринат Васикович<sup>1</sup>,**  
doctech.zagr@post.com

**Бакиев Арслан Тагирович<sup>1</sup>,**  
bakievars@gmail.com

**Бакиев Тагир Ахметович<sup>1</sup>,**  
tagirbak@mail.ru

<sup>1</sup> Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Россия, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

**Актуальность** исследования связана с повышением безопасности эксплуатации стальных газопроводов, содержащих стресс-коррозионные трещины и коррозионные повреждения металла, выявляемых при технической диагностике средствами вихретоковой дефектоскопии.

**Цель:** разработка математического метода распознавания группы стресс-коррозионных трещин в металле стального газопровода по сигналу накладного вихретокового преобразователя.

**Объекты:** группы стресс-коррозионных трещин, имеющие разные геометрические параметры, расположенные в металле с разными интервалами. Изменение геометрических параметров группы стресс-коррозионных трещин и интервалов между ними приводит к трансформации формы сигналов накладных вихретоковых преобразователей при неразрушающем контроле стального газопровода вихретоковыми дефектоскопами.

**Методы:** математическое моделирование сигналов накладных вихретоковых преобразователей над группой стресс-коррозионных трещин в металле; экспериментальные исследования по определению эмпирических зависимостей для информативных параметров сигнала накладного вихретокового преобразователя (амплитуда, полуширина сигнала) от интервала между дефектами сплошности на искусственных моделях стресс-коррозионных трещин; эмпирический метод распознавания группы стресс-коррозионных трещин по измеренным сигналам накладных вихретоковых преобразователей.

**Результаты.** Приведены основы эмпирического метода распознавания группы стресс-коррозионных трещин в металле по сигналу абсолютного накладного вихретокового преобразователя; на основе математической модели сигнала накладного вихретокового преобразователя установлены параметры (амплитуда и полуширины сигнала над группой трещин), содержащие консолидированную информацию о количестве дефектов сплошности в группе стресс-коррозионных трещин и интервале между ними; экспериментально получены эмпирические зависимости сигналов накладного вихретокового преобразователя на искусственных моделях стресс-коррозионных трещин в стальных образцах; показана применимость эмпирического метода распознавания группы стресс-коррозионных трещин в металле при использовании в качестве признаков классификации дефектов сплошности коэффициентов вейвлетного преобразования сигнала накладного вихретокового преобразователя разных типов (абсолютных и дифференциальных).

### **Ключевые слова:**

стальной газопровод, группа стресс-коррозионных трещин, дефект сплошности, распознавание группы стресс-коррозионных трещин, накладной вихретоковый преобразователь, математическая модель сигнала накладного вихретокового преобразователя, амплитуда сигнала, полуширина сигнала, вейвлетное преобразование сигнала накладного вихретокового преобразователя.

### **Введение**

Стресс-коррозионные трещины и коррозионные повреждения в металле и сварных соединениях стальных газопроводов создают реальную угрозу для их безопасной эксплуатации, поэтому для их обнаружения применяются самые современные методы технической диагностики и средства неразрушающего контроля промышленного оборудования [1, 2].

Практика технической диагностики магистральных газопроводов, содержащих стресс-коррозионные трещины и коррозионные повреждения металла, показала, что для их неразрушающего контроля наиболее эффективны технические средства вихретоковой дефектоскопии (как ручные, так и автоматизированные) [3–5].

Особенностью технических средств вихретоковой дефектоскопии является их высокая чувствительность

к поверхностным дефектам сплошности, имеющим малые геометрические размеры (глубина, ширина, протяженность), к которым относятся стресс-коррозионные трещины стального газопровода, отстройка от множества мешающих факторов (в том числе случайных помех) и высокая производительность контроля [5–9].

Еще одной отличительной особенностью вихретокового метода контроля металлов является однозначная зависимость амплитуды сигнала вихретокового преобразователя (ВТП) от глубины трещины и весьма слабая зависимость от ее ширины, что повышает достоверность амплитудного анализа измеренного сигнала над дефектами сплошности в металле [5, 9, 10].

Для надежной оценки опасности стресс-коррозионных трещин в металле, выявленных в результате неразрушающего контроля стальных газо-

проводов средствами вихретоковой дефектоскопии, требуются количественные данные о параметрах дефектов сплошности. По этим результатам устанавливаются виды, объемы и сроки ремонтных работ, необходимых для восстановления работоспособного состояния дефектного участка стального газопровода [2].

Как правило, стресс-коррозионные трещины располагаются на поверхности стального газопровода локальными группами, в которых дефекты сплошности расположены с некоторым интервалом, при этом на поверхности поврежденного металла площадью  $1 \text{ см}^2$  может находиться до двух десятков стресс-коррозионных трещин [11, 12].

Определение параметров дефектов сплошности, образующих группы стресс-коррозионных трещин в стальном газопроводе, по измеренным сигналам накладных ВТП, относится к математическим задачам распознавания образов [13]. Под распознаванием группы стресс-коррозионных трещин в металле подразумевается количественная оценка следующих параметров: количество дефектов сплошности в группе трещин  $n$ ; величина среднего интервала между дефектами  $\Delta$ ; глубина дефектов сплошности в группе трещин  $h$  (при постоянстве  $h$ )/глубина наибольшего дефекта (при разных глубинах трещин); координаты расположения группы трещин в металле  $x_k$ .

Для распознавания группы стресс-коррозионных трещин используются информативные параметры, содержащиеся в измеренном сигнале накладного ВТП:  $U_m$  – максимум сигнала  $U(x)$ , при отсутствии пространственного разрешения группы трещин/ $U_{mk}$  – локальные максимумы сигнала  $U(x)$ , при пространственном разрешении группы трещин;  $x_k$  – координаты локальных максимумов в сигнале;  $z$  – полуширина сигнала абсолютного накладного ВТП  $U(x)$ /половина расстояния между экстремумами сигнала дифференциального накладного ВТП  $U_1(x)$ . Исследования показали, что этой априорной информации достаточно для удовлетворительного распознавания группы стресс-коррозионных трещин в металле.

#### Основы эмпирического метода распознавания группы трещин в металле по сигналу абсолютного накладного вихретокового преобразователя

Для решения задачи распознавания дефектов сплошности в металле по измеренным сигналам ВТП применяются их цифровые и математические модели, в которых могут быть заложены параметры дефектов сплошности [14–16].

Рассмотрим эмпирический метод распознавания группы стресс-коррозионных трещин в металле с использованием логических предписаний для применяемых информативных признаков и воспользуемся математической моделью сигнала абсолютного накладного ВТП над группой трещин (рис. 1) [15, 16]:

$$U(x) = \sum_{j=-N}^N J_j \frac{z}{(x+j\Delta_j)^2+z^2}, \quad (1)$$

где  $J_j$  и  $z$  – параметры математической модели сигнала абсолютного накладного ВТП над отдельной трещиной;  $\Delta_j$  – интервалы между дефектами сплошности в группе трещин;  $x$  – координата точки измерения

сигнала ВТП на поверхности металла, индекс  $j=0, \pm 1, \dots, \pm N$ .

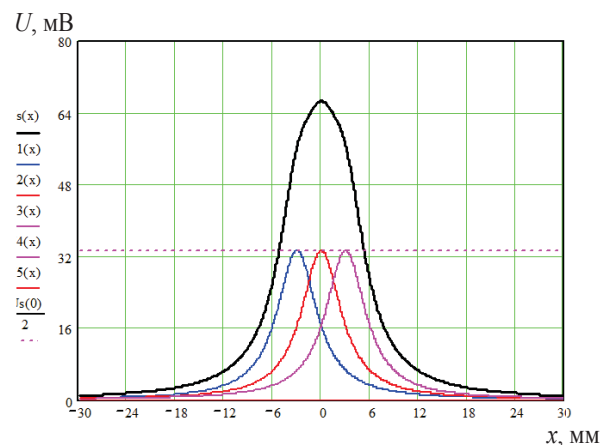


Рис. 1. Модель сигнала абсолютного накладного вихретокового преобразователя над группой из трех трещин при отсутствии пространственного разрешения дефектов

Fig. 1. Model of the signal of the absolute surface eddy-current sensor over a set of three joints with their non-resolution in space

При  $j=0$  из формулы (1) следует выражение для сигнала абсолютного накладного ВТП над отдельной трещиной:

$$U(x) = J_0 \frac{z}{x^2+z^2}. \quad (2)$$

В случае пространственного неразрешения группы трещин (они не разделены для восприятия – этот случай наиболее интересен для технической диагностики стальных газопроводов) отсутствует априорная информация о глубинах дефектов сплошности и соотношениях между ними.

Поэтому допустим, что группа стресс-коррозионных трещин в металле имеет постоянную (усредненную) глубину. Тогда в математической модели сигнала накладного ВТП (1) следует допустить постоянство параметра  $J$ :

$$J_j = J_0 = \text{const}(j = 0, \pm 1, \dots, \pm N).$$

Рассуждая аналогичным образом, допускаем постоянство интервалов между дефектами сплошности в группе стресс-коррозионных трещин:

$$\Delta_j = \Delta = \text{const}(j = 0, \pm 1, \dots, \pm N).$$

С учетом этого сигнал абсолютного накладного ВТП (1) примет вид:

$$U(x) = J_0 \sum_{j=-N}^N \frac{z}{(x+j\Delta)^2+z^2}. \quad (3)$$

В точке  $x=0$  сигнал абсолютного накладного ВТП (3) имеет максимум:

$$U_m = J_0 \sum_{j=-N}^N \frac{z}{(j\Delta)^2+z^2} = \frac{J_0}{z} \left[ 1 + \sum_{j=-N}^N \frac{1}{1 + \left(\frac{j\Delta}{z}\right)^2} \right], \quad (4)$$

где штрих при сумме второго слагаемого означает исключение из суммы ряда члена с индексом  $j=0$ .

Из формулы (4) видно, что параметр  $J_0$  для математической модели сигнала отдельного дефекта сплошности (2) в группе стресс-коррозионных трещин можно определить по измеренной величине максимума сигнала накладного ВТП  $U_m$ , если известно количество дефектов сплошности в группе трещин  $n=2N+1$  и величина интервала между ними  $\Delta$ :

$$J_0 = \frac{zU_m}{1 + \sum_{j=-N}^N \frac{1}{1 + \left(\frac{j\Delta}{z}\right)^2}}. \quad (5)$$

Далее по значению параметра  $J_0$  (5) можно определить (восстановить) максимум сигнала накладного ВТП над отдельным дефектом сплошности по формуле:

$$U_m^0 = J_0/z, \quad (6)$$

который однозначно связан с глубиной дефекта.

Существует информативный параметр в сигнале накладного ВТП над группой стресс-коррозионных трещин, который связан с интервалом между дефектами сплошности. Он следует из формулы (4) и определяется в виде отношения максимумов сигналов накладного ВТП над группой стресс-коррозионных трещин (4) и над отдельной трещиной (6):

$$K(\Delta) = U_m/U_m^0 = 1 + \sum_{j=-N}^N \frac{1}{1 + \left(\frac{j\Delta}{z}\right)^2}. \quad (7)$$

На рис. 2 показана зависимость параметра  $K$  от количества дефектов сплошности в группе стресс-коррозионных трещин и интервала между ними, полученная по формуле (7).

Видно, что при уменьшении интервала между дефектами сплошности ( $\Delta \leq 2$  мм) существенно возрастает влияние на параметр  $K$  количества дефектов сплошности  $n$ .

Из формулы (7) следует:

- отношение  $K$  является монотонной и однозначной функцией от интервала  $\Delta$  между дефектами сплошности. При увеличении  $\Delta$  величина  $K$  уменьшается и стремится к пределу  $\lim_{\Delta \rightarrow \infty} K(\Delta) = 1$ ;
- при сближении группы стресс-коррозионных трещин (уменьшении интервала  $\Delta$ ) величина  $K$  возрастает и стремится к пределу:

$$\lim_{\Delta \rightarrow \infty} K(\Delta) = \sum_{j=-N}^N 1 = 2N + 1 = n.$$

Здесь следует заметить, что максимум сигнала накладного ВТП практически не зависит от ширины трещины, поэтому при объединении группы трещин в одну (при  $\Delta=0$ ), но с большей шириной, максимум сигнала ВТП должен равняться  $U_m \approx U_m^0$  и должен существовать предел  $\lim_{\Delta \rightarrow \infty} K(\Delta) = 1$ .

Данное обстоятельство является одним из недостатков математической модели сигнала абсолютного накладного ВТП (1), которое свидетельствует о качественном характере этой модели.

Однако следует заметить, что выражение (7) верно отражает тенденцию изменения параметра  $K(\Delta)$  в определенных границах изменения интервала между

стресс-коррозионными трещинами (за исключением случая  $\Delta \approx 0$ ).

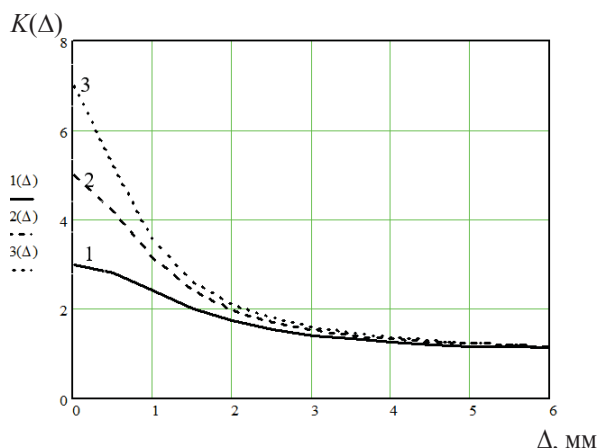


Рис. 2. Зависимость параметра  $K(7)$  от количества дефектов сплошности в группе трещин и интервала между ними (1 –  $n=3$ , 2 –  $n=5$ , 3 –  $n=7$ )

Fig. 2. Dependence of the parameter  $K(7)$  on the number of continuity defects in a group of cracks and the interval between them (1 –  $n=3$ , 2 –  $n=5$ , 3 –  $n=7$ )

Известна формула для расчета полуширины сигнала  $z$  абсолютного накладного ВТП над группой стресс-коррозионных трещин [15, 16]:

$$z = z_1 + \Delta(n - 1)/2, \quad (8)$$

где  $z_1$  – полуширина сигнала накладного ВТП над отдельной трещиной в металле (экспериментально полученное значение  $z_1 \approx 3$  мм);  $\Delta(n - 1)$  – ширина области расположения группы стресс-коррозионных трещин на поверхности металла.

Отсюда получаем уравнение для определения количества дефектов сплошности в группе стресс-коррозионных трещин и интервала между ними:

$$\Delta(n - 1) = 2(z - z_1) = f_1(z). \quad (9)$$

Из формулы (9) видно, что при наличии группы стресс-коррозионных трещин в металле ( $n \geq 2$ ) всегда должно выполняться условие  $z - z_1 > 0$ . Уравнению (9) удовлетворяют бесчисленное множество пар значений ( $n, \Delta$ ), при этом интервал между трещинами определяется по формуле:

$$\Delta = \frac{2(z - z_1)}{n - 1}. \quad (10)$$

Следует учесть, что область реальных значений интервала  $\Delta$  для группы стресс-коррозионных трещин в стальном газопроводе является ограниченной и удовлетворяет эмпирическому условию [11, 12]:

$$\Delta_{\min} \leq \Delta \leq \Delta_{\max}, \quad (11)$$

где  $\Delta_{\min} \approx (0,7 \dots 1)$  мм – нижняя граница статистической выборки стресс-коррозионных трещин;  $\Delta_{\max} = D$  – диаметр сердечника накладного ВТП.

При выполнении условия (11) отсутствует пространственное разрешение группы стресс-коррозионных трещин в стальном газопроводе по сигналу накладного ВТП (дефекты сплошности не разделены для восприятия).



В случае пространственного разрешения группы трещин в металле (при условии  $\Delta > D$  дефекты сплошности разделены для восприятия) отпадает необходимость в решении уравнения (9), так как значения параметров  $\Delta$  и  $n$  однозначно определяются по количеству и координатам месторасположения локальных максимумов в измеренном сигнале накладного ВТП.

Следует заметить, что относительно количества дефектов сплошности  $n$  в группе стресс-коррозионных трещин нет никакой априорной информации, поэтому ее можно приближенно оценить лишь методом перебора, подставляя его значения в формулу (10), с последующей проверкой выполнения условия (11) для расчетной величины  $\Delta$ .

В результате этих операций формируется некоторое множество из взаимосвязанных пар значений  $(n_i, \Delta_i)$ , где  $i=1, 2, \dots, L$ . Очевидно, что определенные таким образом значения параметров  $(n, \Delta)$  имеют равные вероятности для данного состояния группы стресс-коррозионных трещин в металле.

Далее полученные пары значений  $(n_i, \Delta_i)$  подставляются в формулу (7) для определения соответствующих величин параметра  $K$ :

$$K(\Delta_i) = \sum_{j=-N_i}^{N_i} \frac{1}{1 + (\frac{j\Delta_i}{z})^2} = f_2(\Delta),$$

где  $N_i = (n_i - 1)/2$ ,  $(i=1, 2, \dots, L)$ .

На основе полученных значений  $K(\Delta)$  (7) и по максимуму измеренного сигнала накладного ВТП над группой стресс-коррозионных трещин  $U_m$  можно восстановить максимумы сигналов накладного ВТП над отдельными дефектами сплошности, которым соответствуют значения  $(n, \Delta)$ :

$$U_{mi}^0 = U_m / K(\Delta_i), (i = 1, 2, \dots, L). (12)$$

Из формулы (12) видно, что расчетные значения максимума сигнала накладного ВТП  $U_{mi}^0$  зависят от величины интервала между дефектами сплошности, при этом с увеличением интервала  $\Delta$  в заданном диапазоне значений происходит непрерывное возрастание значений  $U_{mi}^0$ .

Определенные таким образом расчетные значения  $U_{mi}^0$  (12) являются равновероятными, поэтому за восстановленное значение максимума сигнала накладного ВТП над отдельным дефектом сплошности следует взять среднее арифметическое для множества этих значений:

$$\overline{U_m^0} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L U_{mi}^0,$$

которое будет иметь наименьшее расхождение относительно истинного значения  $U_m^0$ .

На основе эмпирической зависимости максимума сигнала накладного ВТП от глубины отдельной трещины, имеющей вид:

$$U_m^0(h) = c_1 h + c_2 h^2 = f_3(h),$$

( $c_1 \gg c_2$  – постоянные множители), по восстановленному значению  $\overline{U_m^0}$  оценивается глубина отдельного дефекта сплошности из группы стресс-коррозионных трещин.

Предварительно можно оценить погрешность восстановленного значения максимума сигнала наклад-

ного ВТП над группой стресс-коррозионных трещин в металле.

Допустим, что группа из  $n=3$  стресс-коррозионных трещин, которые расположены с одинаковым интервалом  $\Delta=1$  мм, (1) имеет одинаковую глубину (параметр  $J=100$ ). На основе формул (8)–(11) получаем следующее множество взаимосвязанных пар ( $n=3$ ,  $\Delta=1$  мм), ( $n=4$ ,  $\Delta=0,67$  мм), удовлетворяющих условию (11).

Вычисляя по формуле (12) максимумы сигналов накладного ВТП над отдельными дефектами сплошности, которым соответствуют расчетные значения  $(n, \Delta)$ , определив их среднее арифметическое  $\overline{U_m^0}$ , устанавливаем, что оно меньше истинного значения  $U_m^0$  не более чем на 15 %.

Если же рассмотреть эту же группу трещин, расположенных с интервалом  $\Delta=3$  мм, то из формул (8)–(11) получаем множество взаимосвязанных пар ( $n=3$ ,  $\Delta=3$  мм), ( $n=4$ ,  $\Delta=2$  мм), ( $n=5$ ,  $\Delta=1,5$  мм). Восстановленное по расчетным значениям  $(n, \Delta)$  среднее арифметическое максимума сигнала накладного ВТП  $\overline{U_m^0}$  (12) меньше истинного значения  $U_m^0$  не более чем на 30 %.

Рассмотренный эмпирический метод распознавания группы стресс-коррозионных трещин применим также для информативных признаков дефектов сплошности, имеющих однополярный характер, полученных преобразованием измеренных сигналов накладных (абсолютного, дифференциального) ВТП, таких как распределения коэффициентов вейвлетного преобразования сигналов по параметру сдвига.

#### **Распознавание группы трещин по сигналам накладного вихретокового преобразователя (абсолютного/дифференциального) в специальных стандартных стальных образцах**

Эмпирический метод распознавания группы стресс-коррозионных трещин в металле по измеренным сигналам накладного ВТП был апробирован на специальных стандартных образцах с искусственными моделями стресс-коррозионных трещин (ССО-01, ССО-1, ССО-2, ССО-3), изготовленных в плоскопараллельных пластинах из конструкционной стали марки 09Г2С методом фрезерования (рис. 3).

В ССО-01 дефекты сплошности в группе из  $n=3$  стресс-коррозионных трещин имеют одинаковую глубину  $h=1$  мм, при этом интервалы между дефектами  $\Delta$  меняются от 1 до 5 мм. Группа стресс-коррозионных трещин с интервалом  $\Delta=2$  мм имеет разные глубины: центральная трещина – глубину  $h=1,5$  мм, боковые трещины – глубину  $h=1$  мм.

В ССО-1 дефекты сплошности в группе из трех стресс-коррозионных трещин имеют одинаковую глубину  $h=1$  мм, в ССО-2 – одинаковую глубину  $h=3$  мм, в ССО-3 дефекты сплошности в группе из трех стресс-коррозионных трещин имеют разные глубины: центральная трещина имеет глубину  $h=2$  мм, две соседние трещины – глубину  $h=1$  мм.

Измерения на стальных образцах осуществлялись с помощью вихретокового дефектоскопа ВД-12НФП с абсолютными накладными ВТП, имеющими разные

диаметры сердечника  $D$  ( $D=1,8$  мм,  $D=3,5$  мм), а также вихретокового сканера-дефектоскопа РСД-16 с дифференциальными накладными ВТП параметрического типа ( $D=3$  мм).

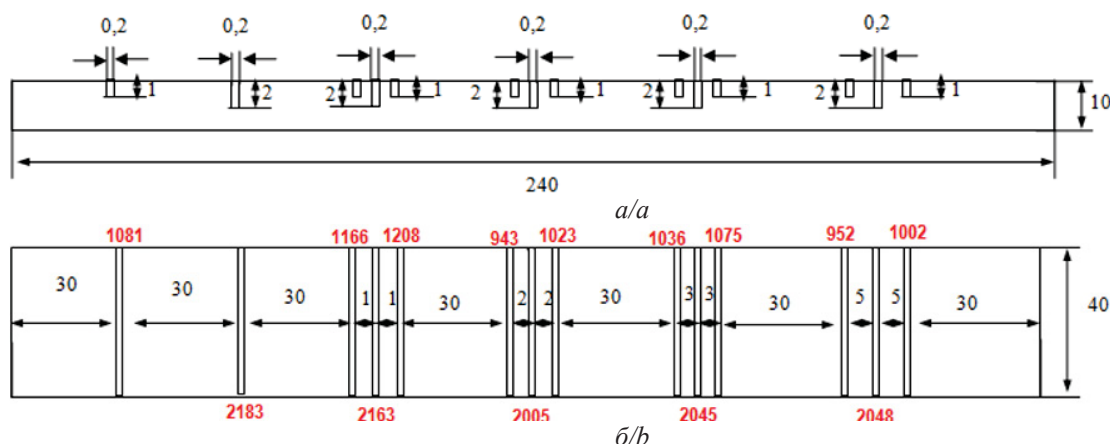


Рис. 3. Схема специального стандартного образца № 3 с группой трещин с заданными параметрами (а) (цветными цифрами (б) указаны действительные значения глубины трещин, в мкм)

Fig. 3. Scheme of a special standard sample no. 3 with a group of cracks with specified parameters (a) (colored numbers (b) indicate the actual values of the depth of cracks  $\times 10^{-3}$ )

Для накладных ВТП предварительно были получены эмпирические зависимости, которые применяются в методе распознавания группы стресс-коррозионных трещин. Например, для абсолютного накладного ВТП с диаметром  $D=1,8$  мм они имеют следующий вид:

$$\Delta(n-1) = f_1(z) = \frac{-0,7864 + \sqrt{0,7864^2 + 0,064(z-2,7109)}}{0,032},$$

$$K(\Delta) = f_2(\Delta) = 2,2198 - 0,5624\Delta + 0,0615\Delta^2,$$

$$U_m^0(h) = f_3(h) = 1075,385h - 124,378h^2. \quad (13)$$

Следует заметить, что функциональная зависимость  $f_2(\Delta)$  была получена при количестве дефектов в группе стресс-коррозионных трещин  $n=3$ . Вследствие этого для обеспечения приемлемого уровня погрешности в расчетном значении параметра  $K$  (рис. 2) перебор значений количества стресс-коррозионных трещин  $n$  в формулах (9), (10) осуществлялся в интервале  $2 \leq n \leq 4$ .

При распознавании группы стресс-коррозионных трещин по коэффициентам вейвлетного преобразования сигнала накладного ВТП для них также предварительно были получены эмпирические зависимости, аналогичные (13).

Дискретное вейвлетное преобразование измеренных сигналов накладных ВТП над дефектами сплошности осуществлялись по формулам из [17–19]:

- для сигнала абсолютного накладного ВТП в дискретном виде  $U_j$  ( $j=1, 2, \dots, N$ ):

$$WU(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_{j=1}^N U_j \left[ \frac{z_1}{\left(\frac{j-b}{a}\right)^2 + z_1^2} - \frac{z_2}{\left(\frac{j-b}{a}\right)^2 + z_2^2} \right]; \quad (14)$$

- для сигнала дифференциального накладного ВТП в дискретном виде  $U1_j$  ( $j=1, 2, \dots, N$ ):

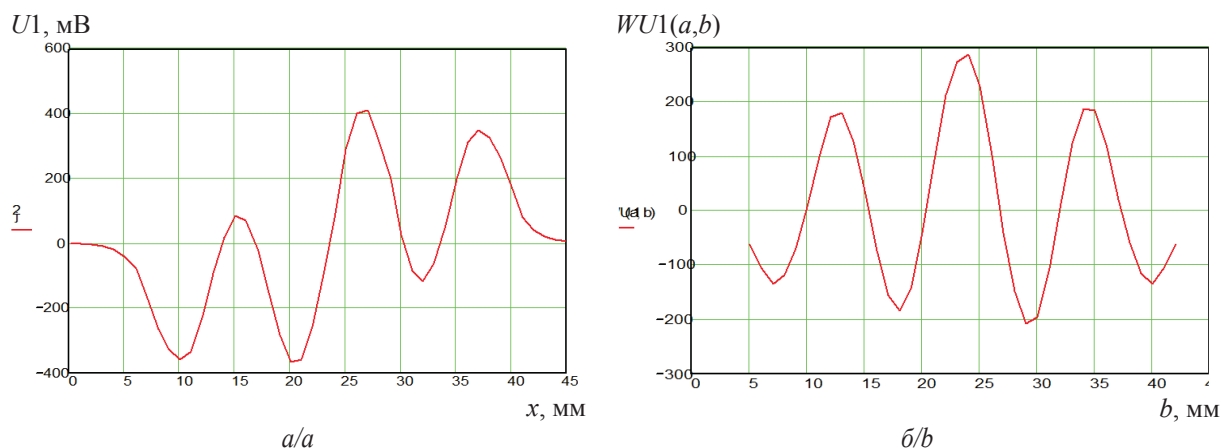
$$WU1(a, b) = \frac{1}{a\sqrt{a}} \sum_{j=1}^N U1_j \left[ \frac{j-b}{\left(\frac{j-b}{a}\right)^2 + z_1^2} - \frac{j-b}{\left(\frac{j-b}{a}\right)^2 + z_2^2} \right], \quad (15)$$

где  $a$  – масштабирующий параметр;  $b$  – параметр сдвига;  $z_1, z_2$  – параметры вейвлетной функции.

На рис. 4 показан измеренный сигнал дифференциального накладного ВТП над группой стресс-коррозионных трещин в ССО-3 и зависимость коэффициентов вейвлетного преобразования данного сигнала ВТП от параметра сдвига.

Результаты распознавания группы стресс-коррозионных трещин в ССО-01, ССО-1 по измеренным сигналам абсолютного и дифференциального накладного ВТП и коэффициентам их вейвлетного преобразования приведены в табл. 1–3.

В столбце 1 табл. 1–3 приводится действительная глубина  $h$  (в мм) отдельных дефектов сплошности и группы трещин в металле, там же указаны интервалы  $\Delta$  между трещинами (в мм); в столбце 2 – амплитуда измеренного сигнала накладного ВТП  $U_m$  (в мВ), или размах (разница между экстремумами) коэффициентов вейвлетного преобразования  $WU_m$  сигнала накладного ВТП (14), (15); в столбце 3 – полуширина измеренного сигнала накладного ВТП над трещинами  $z$  (в мм); в столбце 4 – расчетная величина ширины группы трещин на поверхности металла (в мм); в столбце 5 – пара значений  $(n, \Delta)$ , полученных на основе решения уравнений (9)–(11); в столбце 6 – средняя оценка глубины группы трещин в металле  $h^*$  (в мм), установленная по восстановленному значению  $U_m^0$ ; в столбце 7 – относительная погрешность оценки глубины группы трещин в металле  $\delta h^*$  (в %).



**Рис. 4.** Сигнал дифференциального накладного вихретокового преобразователя над группой трещин в специальном стандартном образце № 3 (а) и зависимость коэффициентов вейвлетного преобразования от параметра сдвига (б)  $D=3,5$  мм,  $\Delta=5$  мм,  $a=1$ ,  $z_1=0,12$ ,  $z_2=1$

**Fig. 4.** Signal of the absolute surface eddy-current sensor over a group of cracks in the special standard sample no. 3 (a) and the dependence of the wavelet transform coefficients of the signal on the shift parameter (b)  $D=3,5$  mm,  $\Delta=5$  mm,  $a=1$ ,  $z_1=0,12$ ,  $z_2=1$

**Таблица 1.** Распознавание группы трещин в специальном стандартном образце № 1 по сигналу абсолютного накладного вихретокового преобразователя ( $D=1,8$  мм)

**Table 1.** Signal parameters of absolute surface eddy-current sensor ( $D=1,8$  mm) over a group of cracks in special standard sample no. 1

Глубина трещины $h$ , мм Crack depth $h$ , mm	Амплитуда сигнала ВТП $U_m$ , мВ ECS signal amplitude $U_m$ , mV	Полуширина $z$ , мм Half-width $z$ , mm	$\Delta(n-1)$ , мм/мм	Кол-во трещин $n$ Number of cracks $n$	Глубина трещины (ср.) $h^*$ , мм Depth (avg.) $h^*$ , mm	Погрешность Error $\delta h^*$ , %
1,091	1038 (1)	2,5	–	–	–	–
1,874	1510 (1,46)	3,1	–	–	–	–
{1,04,1,18, 1,09} $\Delta=1$ мм/мм	2274 (2,19)	3,8	1,35	$n=2 \Delta=1,35$ $n=3 \Delta=0,67$	1,48	+25
{1,09,1,09, 1,09} $\Delta=2$ мм/мм	1768 (1,7)	6,0	3,88	$n=3 \Delta=1,94$ $n=4 \Delta=1,29$	1,32	+21
{1,0,1,02, 1,02} $\Delta=3$ мм/мм	1253 (1,21)	8,5	6,5	$n=3 \Delta=3,3$ $n=4 \Delta=2,2$	1,17	+15
{1,09,1,11, 1,12} $\Delta=5$ мм/мм	1125 (1,08)	12,4	10,2	$n=3 \Delta=5,1$ $n=4 \Delta=3,4$	1,24	+11

Исследования показали, что относительная погрешность глубины дефектов сплошности в стальных образцах, установленных при распознавании группы стресс-коррозионных трещин по амплитуде сигнала абсолютного накладного ВТП, в среднем не превышает  $\pm 25\%$  (табл. 1).

Эти данные хорошо согласуются с расчетными оценками, полученными на основе математической модели сигнала абсолютного накладного ВТП над группой стресс-коррозионных трещин в металле (1).

**Таблица 2.** Распознавание группы трещин в специальном стандартном образце № 1 по коэффициентам вейвлетного преобразования сигнала абсолютного накладного вихретокового преобразователя ( $D=1,8$  мм)

**Table 2.** Signal parameters by the wavelet transform coefficients of absolute surface eddy-current sensor ( $D=1,8$  mm) over a group of cracks in special standard sample no. 1

Глубина трещины $h$ , мм Depth $h$ , mm	Амплитуда (размах) $WU_m$ , мВ Amplitude (excursion) $WU_m$ , mV	Полуширина $z$ , мм Half-width $z$ , mm	$\Delta(n-1)$ , мм/мм	Кол-во трещин $n$ Number of cracks $n$	Глубина трещины (ср.) $h^*$ , мм Depth (avg.) $h^*$ , mm	Погрешность Error $\delta h^*$ , %
1,091	6584 (1)	2,4	–	–	–	–
1,874	9405	2,93	–	–	–	–
{1,04,1,18, 1,09} $\Delta=1$ мм/мм	13911 (2,11)	3,7	1,17	$n=2 \Delta=1,17$ $n=3 \Delta=0,58$	1,41	+19,5
{1,09,1,09, 1,09} $\Delta=2$ мм/мм	10523 (1,6)	5,95	3,57	$n=3 \Delta=1,79$ $n=4 \Delta=1,19$	1,21	+10,6
{1,0,1,02, 1,02} $\Delta=3$ мм/мм	7551 (1,15)	8,4	6,11	$n=3 \Delta=3,05$ $n=4 \Delta=2,04$	1,1	+7,8
{1,09,1,11, 1,12} $\Delta=5$ мм/мм	7006 (1,06)	12,3	9,97	$n=3 \Delta=4,98$ $n=4 \Delta=3,32$	1,18	+5

**Таблица 3.** Распознавание группы трещин в специальном стандартном образце № 01 по коэффициентам вейвлетного преобразования сигнала дифференциального накладного вихретокового преобразователя ( $D=3$  мм)

**Table 3.** Signal parameters by the wavelet transform coefficients of absolute surface eddy-current sensor ( $D=3$  mm) over a group of cracks in special standard sample no. 01

Глубина трещины $h$ , мм Depth $h$ , mm	Амплитуда (размах) $W1U_m$ , мВ Amplitude (excursion) $W1U_m$ , mV	Полуширина $z$ , мм Half-width $z$ , mm	$\Delta(n-1)$ , мм/мм	Кол-во трещин $n$ Number of cracks $n$ интервал $\Delta$ , мм interval $\Delta$ , mm	Глубина трещины (ср.) $h^*$ , мм Depth (avg.) $h^*$ , mm	Погрешность Error $\delta h^*$ , %
1,245	371 (1,0)	2,7	–	–	–	–
2,156	607	2,83	–	–	–	–
{1,13;1,16, 1,03} $\Delta=1$ мм/мм	1227.5 (3,3)	3,6	1,24	$n=2 \Delta=1,24$ $n=3 \Delta=0,62$	1,18	+1,7
{1,01;1,46, 1,08} $\Delta=2$ мм/мм	972.5 (2,62)	6	3,86	$n=3 \Delta=1,93$ $n=4 \Delta=1,28$	1,24	-15
{1,09;1,09, 1,11} $\Delta=3$ мм/мм	436.6 (1,18)	8,8	6,53	$n=3 \Delta=3,26$ $n=4 \Delta=2,18$	0,91	-18
{1,15;1,14, 1,13} $\Delta=5$ мм/мм	340 (0,92)	12,8	9,87	$n=3 \Delta=4,94$ $n=4 \Delta=3,29$	1,1	-4,8

Относительная погрешность оценки глубины дефектов сплошности снижается при распознавании группы стресс-коррозионных трещин по коэффициентам вейвлетного преобразования сигнала абсолютного и дифференциального накладного ВТП, при этом более точными являются оценки глубины группы стресс-коррозионных трещин в металле, установленных для преобразованных сигналов дифференциального накладного ВТП (табл. 2, 3).

Это обстоятельство можно объяснить тем, что в восстановленном сигнале накладного ВТП над дефектом сплошности (11) присутствует методическая (в значениях параметра  $K$ ) и инструментальная (в измеренных значениях амплитуды сигнала накладного ВТП  $U_m$ ) погрешности.

Применение дифференциальной схемы измерения сигнала накладного ВТП, а также последующее вейвлетное преобразование измеренного сигнала ВТП приводит к снижению величины инструментальной погрешности за счет уменьшения уровня случайных шумов и помех. Методическая погрешность при этом практически остается неизменной, поэтому уточнение оценок глубины группы трещин в табл. 2–3 обусловлено, прежде всего, снижением инструментальной погрешности.

В результате исследований было установлено, что:

- относительная погрешность оценок глубины дефектов сплошности в стальных образцах, установленных при распознавании группы стресс-коррозионных трещин по коэффициентам вейвлетного преобразования сигнала абсолютного накладного ВТП, в среднем не превышает  $\pm 20\%$  (табл. 2);
- относительная погрешность оценок глубины дефектов сплошности, установленных при распознавании группы стресс-коррозионных трещин по коэффициентам вейвлетного преобразования сигнала дифференциального накладного ВТП, не превышает  $18\%$  (табл. 3).

Результаты апробирования эмпирического метода распознавания группы стресс-коррозионных трещин показывают, что погрешности оценки глубины дефектов сплошности имеют приемлемые значения и существенно меньше величин погрешностей, полу-

ченных при однопараметровом методе оценки глубин стресс-коррозионных трещин (по амплитуде или фазе сигнала накладного ВТП), которые составляют  $50...100\%$  и более.

На рис. 5 показана блок-схема алгоритма описанного эмпирического метода распознавания группы стресс-коррозионных трещин в металле по измеренному сигналу абсолютного накладного ВТП.

В данном алгоритме по измеренной величине полуширины сигнала накладного ВТП определяется ширина области распределения группы стресс-коррозионных трещин. Методом перебора из формулы (9) определяется количество дефектов  $n$  в группе стресс-коррозионных трещин и интервал между трещинами  $\Delta$ , которые удовлетворяют условию  $D \geq \Delta$  (11).

По этим значениям по формуле (7) рассчитывается величина отношения  $K$ , которая позволяет определить амплитуду сигнала абсолютного накладного ВТП над отдельной стресс-коррозионной трещиной.

На основе предварительно полученной градуировочной зависимости для сигнала накладного ВТП оценивается глубина дефектов в группе стресс-коррозионных трещин (при постоянстве глубины  $h$ )/глубина наибольшего дефекта (при разных глубинах  $h$  трещин).

Данный алгоритм, реализованный в соответствующем программном модуле вихретокового дефектоскопа [20], показал свою работоспособность и удовлетворительные результаты при распознавании группы стресс-коррозионных трещин в стальных образцах, вырезанных из реального стального газопровода.

#### Заключение

В измеренном сигнале накладного вихретокового преобразователя над группой стресс-коррозионных трещин в стальном газопроводе содержится информация, достаточная для решения задачи их распознавания в случае отсутствия пространственного разрешения дефектов сплошности.

На основе математической модели сигнала накладного преобразователя над группой стресс-коррозионных трещин установлено, что можно при-

мерно определить количество дефектов сплошности в группе трещин и оценить их глубину с приемлемой точностью на основе двух информативных парамет-

ров – максимума сигнала накладного преобразователя над группой стресс-коррозионных трещин и полуширины этого сигнала.

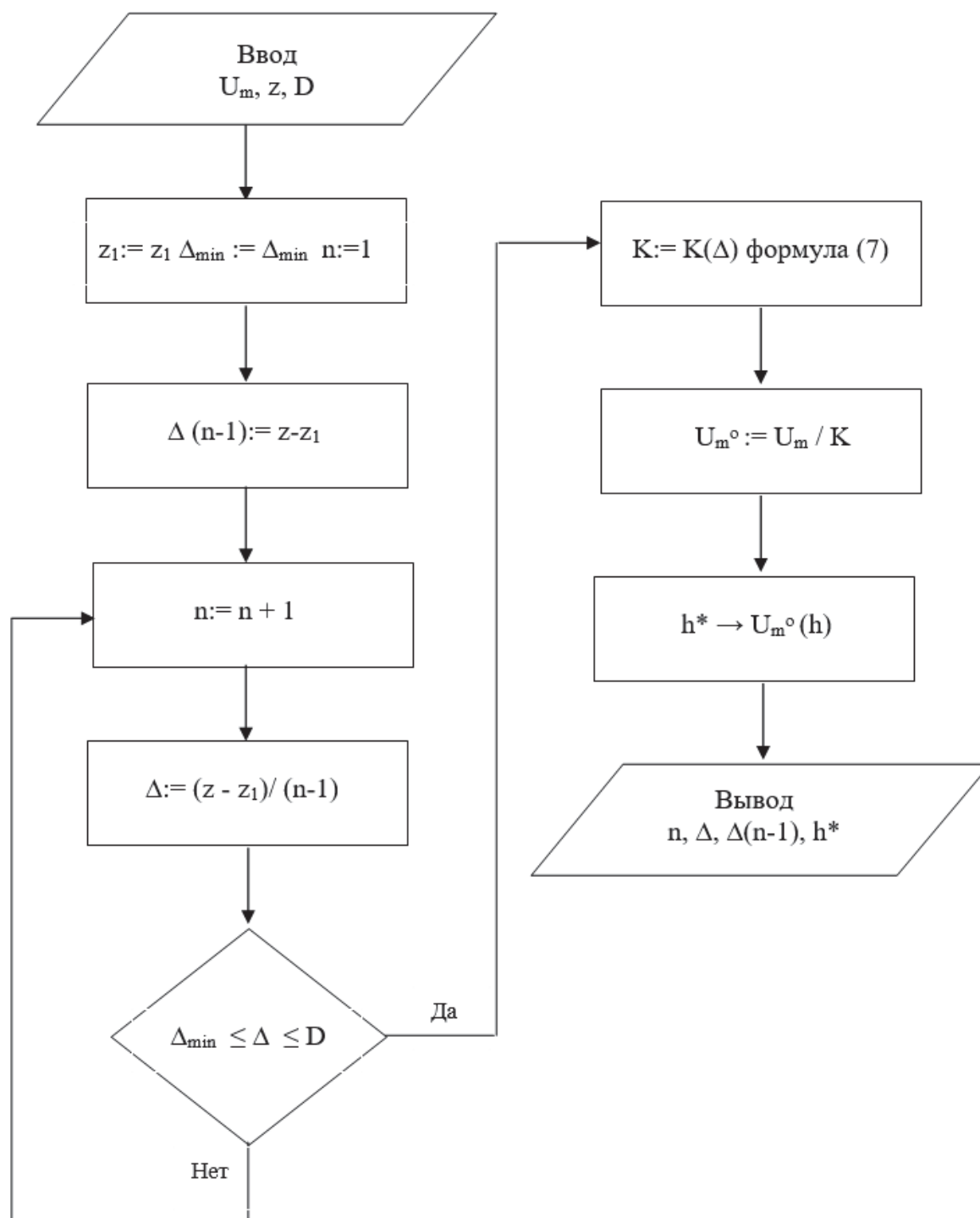


Рис. 5. Алгоритм распознавания группы стресс-коррозионных трещин в металле по сигналу абсолютного накладного вихретокового преобразователя

Fig. 5. Algorithm for recognizing a group of stress-corrosion cracks in metal based on the absolute surface eddy-current sensor signal

Для распознавания группы стресс-коррозионных трещин в металле используются лишь эмпирические зависимости, предварительно полученные по сигналам накладных вихретоковых преобразователей на образцах с группой дефектов сплошности.

В эмпирическом методе распознавания группы стресс-коррозионных трещин отсутствуют сложные математические модели и громоздкие алгоритмы расчета. Несмотря на это, данный метод обеспечивает приемлемый уровень погрешности оценки глубины

дефекта сплошности в группе стресс-коррозионных трещин в случае отсутствия их пространственного разрешения.

Этот эмпирический метод применим также при распознавании группы стресс-коррозионных трещин по коэффициентам вейвлетного преобразования сигнала накладного вихретокового преобразователя раз-

ных типов (абсолютных/дифференциальных), при котором достигается некоторое уточнение оценки глубины дефекта сплошности в металле.

*Исследование проводится при поддержке Фонда содействия инновациям по договору № 474ГУЦЭС8-Д3/62153 от 05 октября 2020 г.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миторхин М.Ю., Велиулин И.И., Касьянов А.Н. Анализ средств и технологий технического диагностирования и отбраковки труб при проведении капитального ремонта линейной части магистральных газопроводов ОАО «Газпром» // Территория нефтегаз. – 2010. – № 12. – С. 57–60.
2. Алимов С.В., Арабей А.Б., Ряховских И.В. Концепция диагностирования и ремонта магистральных газопроводов в регионах с высокой предрасположенностью к стресс-коррозии // Газовая промышленность. Спецвыпуск. – 2015. – Т. 724. – С. 10–15.
3. Автоматизированный вихретоковый сканер-дефектоскоп АСД «Вихрь-1» / А.В. Коннов, А.М. Кузнецов, В.А. Новиков, Т.Р. Загидулин // 20 Всероссийская научно-техническая конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике: тезисы докладов. – М.: ИД «Спектр», 2014. – С. 64–67.
4. Коннов В.В., Коннов Вл.Вл., Кузнецов А.М. Результаты опытной эксплуатации автоматизированного сканера-дефектоскопа АСД «Вихрь» при капитальном ремонте линейной части магистральных газопроводов // Контроль. Диагностика. – 2015. – № 2. – С. 32–37.
5. Федосенко Ю.К., Шкатов П.Н., Ефимов А.Г. Вихретоковый контроль. – М.: ИД «Спектр», 2011. – 224 с.
6. Garcia-Martin J., Gomez-Gil J, Vazquez-Sanchez E. Non-destructive techniques based on eddy current testing // Sensors. – 2011. – V. 11. – P. 2525–2565.
7. Yang H.C., Tai C.C. Pulsed eddy-current measurement of a conducting coating on a magnetic metal plate // Measurement Science and Technology. – 2002. – V. 13. – P. 1259–1265.
8. Eddy current characterization of cold-worked AISI 321 stainless steel / V.M.A. Silva, C.G. Camerini, J.M. Pardal, J.C.G. de Blás, G.R. Pereira // Journal of Materials Research and Technology. – 2018. – V. 7. – P. 395–401.
9. Yuting L., Fangji G., Zhengjun W., Junbi L., Wenqiang L. Novel method for sizing metallic bottom crack depth using multi-frequency alternating current potential drop technique // Measurement Science Review. – 2015. – V. 15. – P. 268–273.
10. Hu S.W., Hu X., Lu J. Study on eddy current principle-based nondestructive testing method for broken wire of PCCP // Water Resources & Hydropower Engineering. – 2016. – V. 47. – № 2. – P. 101–114.
11. Moskovkina V.N., Zagidulin R.V. The statistic analyze of stress-corrosion cracks on the main gas pipeline section // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Science and Technology Conference «EarthScience». – 2020. – V. 459. – P. 042009.
12. The study of eddy current sensors signals over a group of cracks in metal / R.V. Zagidulin, T.R. Zagidulin, T.A. Bakiev, A.T. Bakiev // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – V. 666. – P. 042068.
13. Горелик А.Л., Скрипкин В.А. Методы распознавания. – М.: Изд-во «Высшая школа», 1989. – 232 с.
14. Characterization of surface cracks using eddy current NDT simulation by 3D-FEM and inversion by neural network / B. Helifa, M. Féliachi, I.K. Lefkaier, F. Boubenider, A. Zaoui, N. Lagraa // ACES. – 2016. – V. 31. – P. 187–194.
15. Загидулин Р.В., Бакиев А.Т. Моделирование сигнала вихретокового преобразователя над стресс-коррозионными трещинами магистрального газопровода // Современные проблемы физики: межвузовский сборник научных статей, посвященный 100-летию открытия Уфимского Физического института. – Уфа: БашГУ, 2019. – С. 99–102.
16. Models of signals of eddy-current transducers above defects of the continuity of metal / R. V. Zagidulin, T.R. Zagidulin, T.A. Bakiev, A.T. Bakiev // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – V. 666. – P. 042066.
17. Бадамшин Р.А., Загидулин Т.Р., Коннов А.В. Некоторые вопросы оптимизации параметров вейвлетного преобразования сигналов преобразователей электромагнитного поля // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2013. – Т. 17. – № 54. – С. 122–127.
18. Daubechies I. Orthonormal bases of compactly supported wafelets. Communications on Pure and Applied Mathematics // Ingrid Daubechies. – 1988. – V. 41. – P. 909–996.
19. Grman J., Ravas R. Application of Wavelet transformation in eddy current testing of steam generator tubes // IEEE Instrumentation and Measurement. – 2001. – V. 1. – P. 392–396.
20. Распознавание группы стресс-коррозионных трещин в металле по сигналу накладного абсолютного вихретокового преобразователя: пат. Рос. Федерация, № 2021668280, заявл. 20.10.2021; опубл. 12.11.2021. Бюл № 11. – 1 с.

*Поступила 19.04.2022 г.*

*Прошла рецензирование 13.10.2022 г.*

#### Информация об авторах

**Загидулин Р.В.**, доктор технических наук, профессор кафедры гидрогазодинамики трубопроводных систем и гидромашин, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

**Бакиев А.Т.**, аспирант, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

**Бакиев Т.А.**, доктор технических наук, заведующий кафедрой гидрогазодинамики трубопроводных систем и гидромашин, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

UDC 620.179.14

## EMPIRICAL METHOD FOR RECOGNIZING A GROUP OF STRESS-CORROSION CRACKS IN METAL BY THE SIGNAL OF EDDY-CURRENT SENSOR

Rinat V. Zagidulin<sup>1</sup>,  
doctech.zagr@post.com

Arslan T. Bakiev<sup>1</sup>,  
bakievars@gmail.com

Tagir A. Bakiev<sup>1</sup>,  
tagirbak@mail.ru

<sup>1</sup> Ufa State Petroleum Technological University,  
1, Kosmonavtov street, Ufa, 450062, Russia.

**The relevance** of the research is related to improving the safety of operation of steel gas pipelines containing stress-corrosion cracks and corrosion damage to metal detected during technical diagnostics by eddy-current non-destructive testing.

**The main aim** of the research is to develop a mathematical method for recognizing a group of stress-corrosion cracks in the metal of a steel gas pipeline by the signal of a surface eddy-current sensor.

**Objects:** groups of stress-corrosion cracks with different geometric parameters located in the metal at different intervals. Changing the geometric parameters of a group of stress-corrosion cracks and the intervals between them leads to the transformation of the signal shape of surface eddy-current sensors during non-destructive testing of a steel gas pipeline with eddy-current flaw detectors.

**Methods:** mathematical modeling of signals of surface eddy-current sensors over a group of stress-corrosion cracks in metal; experimental studies to determine empirical dependencies for informative parameters of the signal of a surface eddy-current sensor (amplitude, signal half-width) on the interval between continuity defects on artificial models of stress-corrosion cracks; empirical method for recognizing a group of stress-corrosion cracks from measured signals of surface eddy-current sensors.

**Results.** The paper introduces the basics of an empirical method for recognizing a group of stress-corrosion cracks in metal by the signal of an absolute surface eddy-current sensor. Based on a mathematical model of the signal of a surface eddy-current sensor the authors established the parameters (amplitude and half-widths of the signal over a group of cracks) containing consolidated information on the number of continuity defects in a group of stress-corrosion cracks and the interval between them. The empirical dependences of the signals of a surface eddy-current sensor were experimentally obtained on artificial models of stress-corrosion cracks in steel samples. The applicability of the empirical method of recognizing a group of stress-corrosion cracks in metal when using the coefficients of the wavelet transformation of the signal of surface eddy-current sensor of different types (absolute and differential) as signs of the classification of continuity defects is shown.

### Key words:

steel gas pipeline, group of cracks in a metal, metal continuity defect, recognition of a group of stress-corrosion cracks, surface eddy-current sensor, mathematical model of a signal of a surface eddy-current sensor, signal amplitude, signal half-width, wavelet transform of signal.

This study was carried out with the support of the Fund for the Promotion of Innovations under the agreement No. 474GUTSES8-D3 / 62153 dated October 05, 2020.

### REFERENCES

- Mitorkhin M.Yu., Veliyulin I.I., Kasyanov A.N. Analiz sredstv i tekhnologiy tekhnicheskogo diagnostirovaniya i otrabotki trub pri provedenii kapitalnogo remonta lineinoy chasti magistralnykh gazoprovodov Gazprom [Analysis of means and technologies of technical diagnostics and rejection of pipes during the overhaul of the linear part of the main gas pipelines of Gazprom]. *Territory of Neftegaz*, 2010, no. 12, pp. 57–60.
- Alimov S.V., Arabey A.B., Ryakhovskikh I.V. Kontseptsiya diagnostirovaniya i remonta magistralnykh gazoprovodov v regionakh s vysokoy predraspolozhennostyu k stress-korrozii [The concept of diagnostics and repair of main gas pipelines in regions with a high predisposition to stress corrosion]. *Gas Industry*, 2015, Special Issue, vol. 724, pp. 10–15.
- Konnov A.V., Kuznetsov A.M., Novikov V.A., Zagidulin T.R. Avtomatizirovanny skaner-defektoskop ASD «Vikhr» [Automated eddy current scanner-flaw detector ASD «Vortex-1»]. *20 vseroissiysskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya po nerazrushayushchemu kontrolyu i tekhnicheskoy diagnostike. Tezisy dokladov* [20th All-Russian Scientific and Technical Conference on Non-destructive testing and technical diagnostics: abstracts of reports]. Moscow, March 3–6, 2014. Moscow, Spectrum Publ. House, 2014. pp. 64–67.
- Konnov V.V., Konnov V.I., Kuznetsov A.M. The results of the pilot operation of the automated scanner-flaw detector ASD «VIKHR» during overhaul of the linear part of main gas pipelines. *Control. Diagnostics*, 2015, no. 2, pp. 32–37. In Rus.
- Fedosenko Yu.K., Shkatov P.N., Efimov A.G. *Vikhretokovyy kontrol* [Eddy current control]. Moscow, Spectrum Publ. house, 2011. 224 p.
- Garcia-Martin J., Gomez-Gil J., Vazquez-Sanchez E. Non-destructive techniques based on eddy current testing. *Sensors (Basel)*, 2011, vol. 11, pp. 2525–2565.
- Yang H.C., Tai C.C. Pulsed eddy-current measurement of a conducting coating on a magnetic metal plate. *Measurement Science and Technology*, 2002, vol. 13, pp. 1259–1265.
- Silva V.M.A., Camerini C.G., Pardal J.M., De Blás J.C.G., Pereira G.R. Eddy current characterization of cold-worked AISI 321 stainless steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 2018, vol. 7, pp. 395–401.
- Yuting L., Fangji G., Zhengjun W., Junbi L., Wenqiang L. Novel method for sizing metallic bottom crack depth using multi-frequency alternating current potential drop technique. *Measurement Science Review*, 2015, vol. 15, pp. 268–273.
- Hu S.W., Hu X., Lu J. Study on eddy current principle-based non-destructive testing method for broken wire of PCCP. *Water Resources & Hydropower Engineering*, 2016, vol. 47, pp. 101–114.

11. Moskovkina V.N., Zagidulin R.V. The statistic analyze of stress-corrosion cracks on the main gas pipeline section. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 459, p. 042009.
12. Zagidulin R.V., Zagidulin T.R., Bakiev T.A., Bakiev A.T. The Study of Eddy Current Sensors Signals over a Group of Cracks in Metal. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 666, p. 042068.
13. Gorelik A.L., Skripkin V.A. *Metody raspoznavaniya* [Recognition methods]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1989. 232 p.
14. Helifa B., Féliachi M., Lefkaier I.K., Boubenider F., Zaoui A., Lagraa N. Characterization of surface cracks using eddy current NDT simulation by 3D-FEM and inversion by neural network. *ACES*, 2016, vol. 31, pp. 187–194.
15. Zagidulin R.V., Bakiev A.T. Modelirovanie signala vikhretokovogo preobrazovatelya nad stress-korroziionnymi treshchinami magistralnogo gazoprovoda [Modeling of the eddy current converter signal over stress-corrosion cracks of the main gas pipeline]. *Sovremennye problemy fiziki. Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh statey, posvyashchenny 100-letiyu otkrytiya Ufimskogo Fizicheskogo instituta* [Modern problems of physics. Interuniversity collection of scientific articles dedicated to the 100th anniversary of the opening of the Ufa Institute of Physics]. Ufa, BashGU Publ., 2019. pp. 99–102.
16. Zagidulin R.V., Zagidulin T.R., Bakiev T.A., Bakiev A.T. Models of signals of eddy-current transducers above defects of the continuity of metal. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 666, p. 042066.
17. Badamshin R.A., Zagidulin T.R., Konnov A.V. Nekotorye voprosy optimizatsii parametrov veyvletnogo preobrazovaniya signalov preobrazovatelyey elektromagnitnogo polya [Some issues of optimization of parameters of wavelet transformation of signals of electromagnetic field converters]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, vol. 17, no. 1, pp. 122–127.
18. Ingrid Daubechies orthonormal bases of compactly supported wavelets. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 1988, vol. 41, pp. 909–996.
19. Grman J., Ravas R. Application of Wavelet transformation in eddy current testing of steam generator tubes. *IEEE Instrumentation and Measurement*, 2001, vol. 1, pp. 392–396.
20. Bakiev A.T., Zagidulin R.V., Bakiev T.A. *Raspoznavanie gruppy stress-korroziionnykh treshchin v metalle po signalu nakladnogo absolyutnogo vikhretokovogo preobrazovatelya* [Recognition of a group of stress-corrosion cracks in metal by the signal of a surface absolute eddy current sensor]. Patent RF, no. 2021668280, 2021.

*Received: 19 April 2022.  
Reviewed: 13 October 2022.*

#### Information about the authors

**Rinat V. Zagidulin**, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University.

**Arslan T. Bakiev**, postgraduate student, Ufa State Petroleum Technological University.

**Tagir A. Bakiev**, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University.



УДК 550.370, 556

## ПРИМЕНЕНИЕ НАЗЕМНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ В СОСТАВЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ ПОДТАПЛИВАЕМОЙ ТЕРРИТОРИИ ОДНОГО ИЗ ЖИЛЫХ РАЙОНОВ Г. ИРКУТСКА

Шкиря Михаил Сергеевич<sup>1</sup>,  
mshkiria@geo.istu.edu

Ланкин Юрий Константинович<sup>2</sup>,  
yur-lankin@yandex.ru

Терешкин Станислав Андреевич<sup>1</sup>,  
stereshkin@geo.istu.edu

Лазурченко Антон Витальевич<sup>1</sup>,  
alazurchenko@geo.istu.edu

Давыденко Юрий Александрович<sup>1</sup>,  
dya@geo.istu.edu

<sup>1</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

<sup>2</sup> АО «Росгео», Россия, 664039, г. Иркутск, ул. Клары Цеткин, 9а.

**Актуальность** исследования заключается в необходимости оценки проблемы подтопления одного из жилых районов г. Иркутска Иркутской области. Подтопления урбанизированных территорий в большинстве своем имеют сезонный характер. Определение условий залегания водоупорных и хорошо проницаемых пород, а также выявление участков возможного скопления грунтовых вод методом электротомографии позволяет разработать мероприятия по ликвидации ущерба, вызванного процессом подтопления.

**Цель:** Оценка геолого-гидрогеологических условий развития процесса подтопления, оказывающего негативное воздействие на жилую застройку.

**Объекты:** монолиты коренных пород, характеризующиеся высокими сопротивлениями и являющиеся практически водоупорами; проницаемые зоны на поверхности земли, через которые происходит фильтрация атмосферных осадков и питание грунтовых вод; области, где возможно образование подвешенных вод и развитие за счет них процесса подтопления.

**Методы:** наземные геофизические исследования методом электротомографии; двумерная и трехмерная инверсия данных электротомографии и их интерпретация с учетом инженерно-геологических данных бурения.

В результате наземных геофизических исследований установлено, что склон, на котором расположена оцениваемая территория, является древним оползевым цирком, где нарушено естественное состояние толщи пород. Геофизическими исследованиями выявлены хорошо проницаемые зоны на поверхности земли, через которые происходит фильтрация атмосферных осадков и питание грунтовых вод. По данным электротомографии выделены подзоны: сильного подтопления с уровнем подземных вод близким к поверхности земли; умеренного подтопления с глубиной залегания подземных вод от 0,3 до 2 м и слабого подтопления с глубиной залегания уровня подземных вод от 2,0 до 5,0 м.

### Ключевые слова:

подтопление, электротомография, удельное электрическое сопротивление, грунтовые воды, зона аэрации, верховодка.

### Введение

В статье рассматривается применение наземных геофизических исследований методом электротомографии в составе инженерно-геологических изысканий для оценки условий развития негативного процесса подтопления и разработки мероприятий по ликвидации вызванных им проявлений или по уменьшению его активности в одном из жилых районов г. Иркутска. Естественная причина подтопления – это в первую очередь сезонные колебания выпадения атмосферных осадков [1–3]. Подтопление – явление, которое в последние 20–30 лет стало наиболее распространенным в центральных районах города и некоторых других населенных пунктов [4]. Периодическое или постоянное подтопление жилой застройки в г. Иркутске происходит во время интенсивного выпадения осадков за счет нерациональной планировки рельефа в ее пределах, неэффективной системы водоотведения атмосферных осадков или ее отсутствия. Особенно это касается старых районов города. Гидрогеологический процесс, протекающий в условиях увеличивающегося техногенного воздействия, приводит к постепенному расширению подтопления застроенной территории. Подтопление застроенной территории города происходит при участии дополнительного техногенного питания [5]. В одном из старых районов города в конце 2021 г. проведены специальные инженерно-геологические изыскания с применением наземных геофизических исследований методом электротомографии. Электротомографические измерения выполняются, как правило, в тех случаях, когда требуется изучение геологических разрезов со слож-

ным строением [6–8]. Рассматриваемый район характеризуется неоднородным геолого-гидрогеологическим строением зоны аэрации. Здесь терригенная толща юрских отложений состоит из пластов хорошо проницаемых песчаников, разделенных тремя водоупорными пластами аргиллитов. В песчаниках на водоупорных аргиллитах сформирована серия грунтовых горизонтов – верховодок, которые, разгружаясь по склонам, подтапливают жилую застройку. Часть верховодок имеет незначительные размеры и временный характер, многие же существуют постоянно. Кроме этого, в пониженных участках рельефа, где отсутствуют коммуникации водоотведения, атмосферные осадки фильтруются в зону аэрации, что обуславливает насыщение грунтов вблизи поверхности земли, образуются подвешенные грунтовые воды, что провоцирует развитие процесса подтопления.

Наземные геофизические исследования методом электротомографии являются одним из ведущих методов при

малоглубинных исследованиях, позволяющих достаточно детально расчленить изучаемый разрез по удельному электрическому сопротивлению ( $УЭС$ ) пород [9–11]. Работы этим методом проводились для оценки геолого-гидрогеологических условий развития процесса подтопления. Их задачей являлось расчленение геологического разреза до глубины 30–40 м по сопротивлению пород, что дало возможность определения условий залегания водоупорных и хорошо проницаемых пород, оконтуривание участков инфильтрации атмосферных осадков (питания «верховодок»), выявление участков возможного скопления грунтовых вод на водоупорных породах и участков образования подвешенных грунтовых вод.

#### Методика работ

Исследуемый участок находится в предместье Радищева г. Иркутска Иркутской области (рис. 1). Объем полевых работ составил 4 погонных километра.

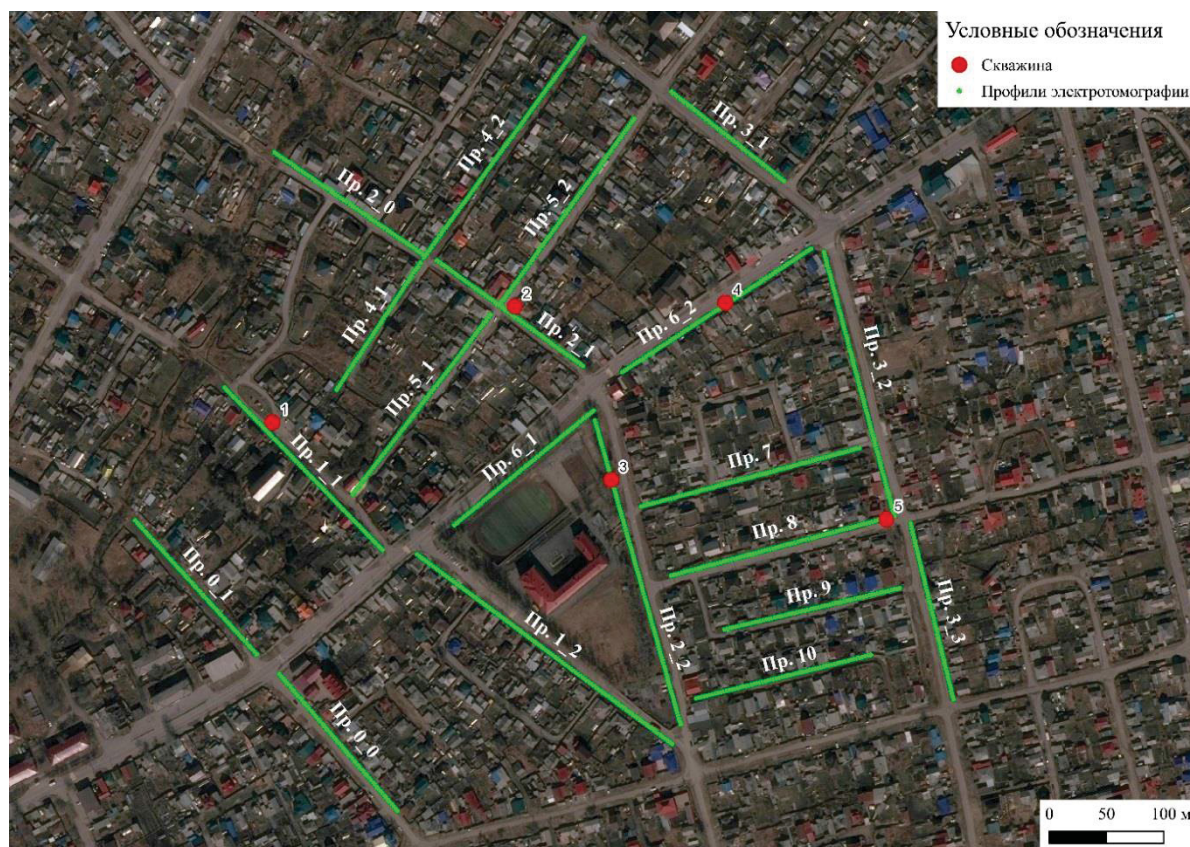


Рис. 1. Схема расположения профилей электротомографии

Fig. 1. Map of electrical resistivity tomography survey lines

Детальное строение верхней части разреза до глубин 30–40 м было получено по данным электротомографии, выполненной аппаратурой «Скала-64» [12].

Электротомография – это электроразведочный комплекс, включающий в себя как методику полевых работ, так и технологию обработки и интерпретации полевых данных. Электротомография основана на применении многоэлектродных электроразведочных кос, подключаемых к аппаратуре, способной коммутировать токовые и измерительные электроды на

произвольные выводы косы [13]. Ее особенностью является многократное использование в качестве питающих и измерительных одних и тех же фиксированных на профиле электродов. Данная методика приводит к уменьшению общего числа рабочих положений электродов при существенном увеличении плотности измерений по сравнению с обычным методом вертикальных электрических зондирований. Такой подход позволяет, с одной стороны, работать с современной высокопроизводительной аппаратурой,

а с другой – применять эффективные алгоритмы моделирования и инверсии [14, 15].

Удельное электрическое сопротивление горных пород зависит от поровой влаги (свободной и связанной) и определяется такими факторами, как пористость, трещиноватость, водонасыщенность, с увеличением которых сопротивление пород уменьшается. Именно это определяет выбор данного метода для поиска и локализации проницаемых зон [16–19].

При проведении электротомографии использовалась установка Шлюмберже [20]. Она обладает одинако-

вой чувствительностью к горизонтальным и вертикальным границам, являясь компромиссом между установками Веннера и дипольной, глубиной на 10 % большей, чем у Веннера и средним горизонтальным покрытием [21]. Расстояние между электродами было принято в 2,5 м. Выбор расстояния между электродами позволяет регулировать глубину исследования и влиять на разрешающую способность [22]. Выходное напряжение составляло 200 В. Продолжительность импульса тока – 100 мс, паузы – 20 мс. Схема используемой установки электротомографии представлена на рис. 2.

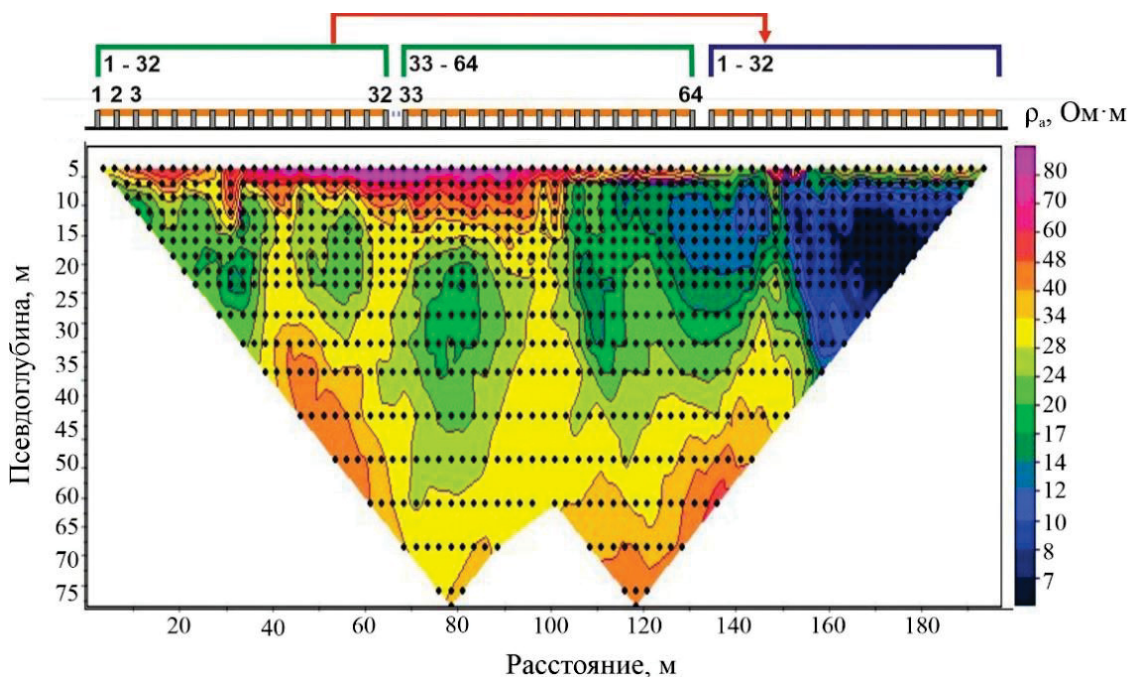


Рис. 2. Схема установки электротомографии

Fig. 2. Diagram of the electrical resistivity tomography installation

Работы были осложнены плохими условиями заземления электродов. Половина территории работ заасфальтирована и забетонирована, также 25 % ее осложнена каменистыми насыпями. По возможности заземления проводились в трещины на асфальте. На участках пересечения дорог выполнить заземление было невозможно, вследствие чего некоторые профили построены с разрывами.

#### Результаты и их обсуждение

Инверсия данных выполнялась в программах ZondRes2d и ZondRes3d, которые предназначены для двумерной и трехмерной интерпретации данных электротомографии методом сопротивлений и вызванной поляризации [23]. Качество и достоверность результатов работы алгоритма автоматической двумерной инверсии зависело и от качества полевых данных, и от соответствия изучаемой геологической среды двумерной геоэлектрической модели, и от полноты использования априорной информации [24]. Среднеквадратическое отклонение между наблюдаемыми и модельными данными составило 3 %. По результатам двумерной инверсии, выполненной в про-

грамме ZondRes2d, были отстроены разрезы по всем одиннадцати профилям.

На рис. 3 представлены разрезы УЭС по профилям 2\_1 и 6\_2. Техногенный слой, мощность которого изменяется в пределах от 0,5 до 5 м, прослежен на всех профилях. УЭС данного слоя в пределах 70–100 Ом·м. На разрезах УЭС кровля водоупорного слоя хорошо прослеживается (выделена пунктирной линией). В данных условиях водоупорные среднеюрские породы удалось проследить на глубину до 40 м. В районе скважин 2 и 4 подтопление происходит за счет формирования «подвешенных» вод. Интервал сезонного подтопления меняется в течение года в периоды осадконакопления и таяния снега. Интервал подтопления включает в себя современные элюваально-делювиальные отложения и среднеюрские коренные породы. Первые сложены дресвой и щебнем, супесями с включениями песка. Коренные породы представлены переслаивающимися песчаниками и алевролитами.

В геологическом отношении участок работ достаточно сложный. На профилях электротомографии отчетливо наблюдается блоковое строение.

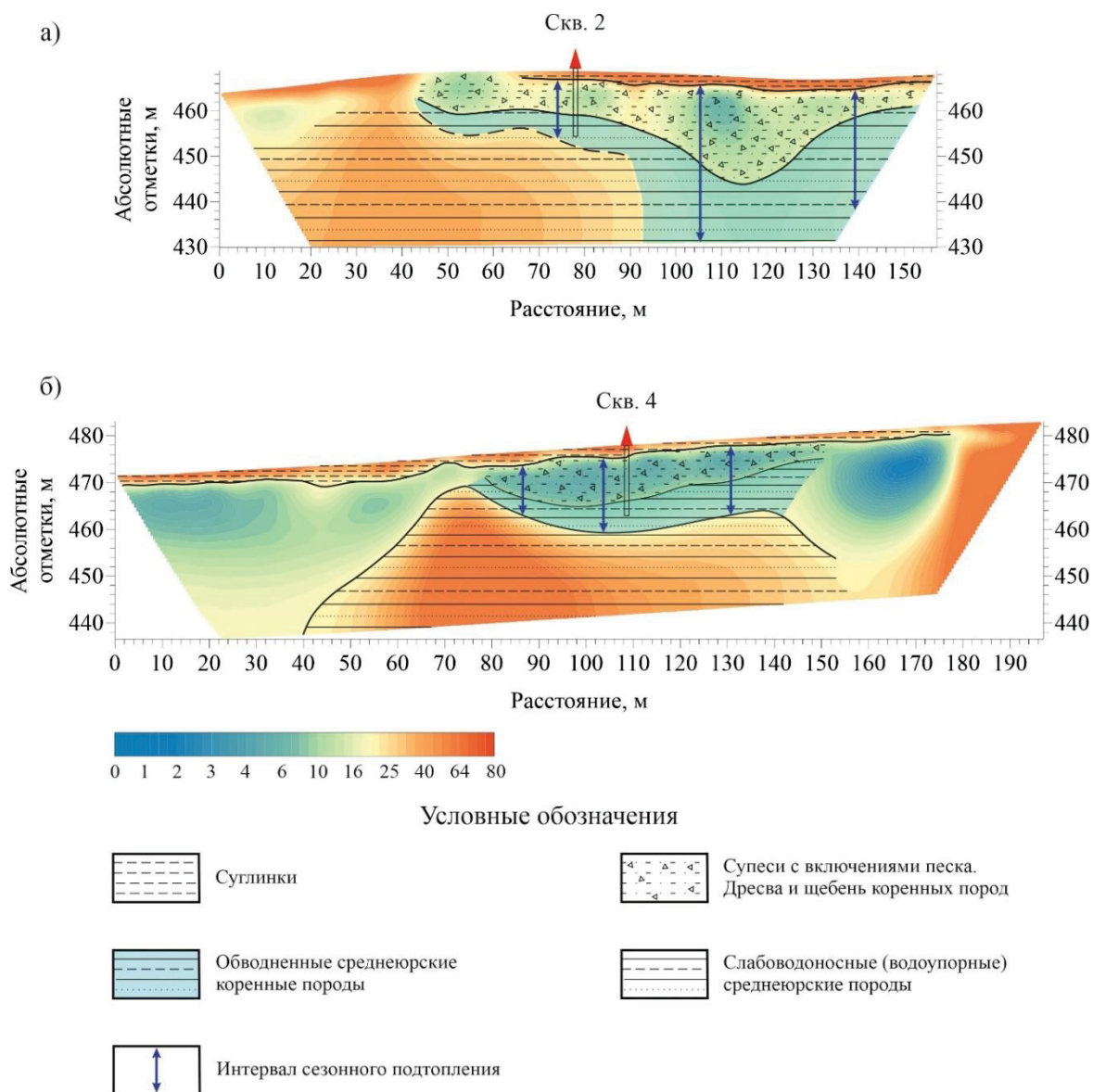


Рис. 3. Разрезы УЭС: а) профиль 2\_1; б) профиль 6\_2  
 Fig. 3. Sections of electrical resistivity: a) section 2\_1; b) section 6\_2

Для анализа полученных материалов использовалась программа трехмерной визуализации многокомпонентных данных «Voxler». На рис. 4 бирюзовым цветом показаны отдельные, не связанные между собой, проницаемые зоны, сложенные среднеюрскими коренными породами. Они характеризуются пониженными значениями УЭС в пределах от 8 до 15 Ом. Предполагаемая кровля водоупорного горизонта (коричневая) характеризуется значениями УЭС от 40 до 60 Ом. Предполагается, что мощность водоупорных среднеюрских пород, более 10 м.

Уверенное построение достоверной трехмерной модели изучаемой территории по результатам двумерной инверсии данных электротомографии зависит от нескольких причин. Одна из них – это соответствие изучаемой геологической среды двумерной геоэлектрической модели. В алгоритме двумерной инверсии данных электротомографии реализованы практические приемы подбора удельных электриче-

ских сопротивлений блоков модели на основе сходства электрических полей «подбираемой» модели и исследуемой среды [25–27].

По результатам интерпретации данных электротомографии было задано пять мест для бурения инженерно-геологических скважин глубиной 9,0–20,0 м. В них после бурения проведены опытно-фильтрационные работы.

В результате выполненных инженерно-геологических изысканий с использованием наземных геофизических исследований установлено, что склон, на котором расположена оцениваемая территория, является древним оползневым цирком, где нарушено естественное состояние толщи пород кудинской свиты средней юры. Оползневые деформации нивелированы в рельефе и перекрыты покровными делювиальными образованиями. Инженерно-геологическими скважинами не вскрыты коренные песчаники в естественном состоянии и пласты водоупорных аргиллитов, по кровле которых может быть

разгрузка верховодок, что наблюдается на сопредельных территориях. Оползневые деформации наглядно прослежены по данным наземных геофизических исследований (рис. 5). Монолиты коренных пород, характеризующиеся высокими сопротивлениями до

60 Ом, разделены на отдельные блоки, которые имеют различные абсолютные отметки кровли. Они в виде ступеней залегают параллельно оползневому склону, по которому происходило смещение пород.

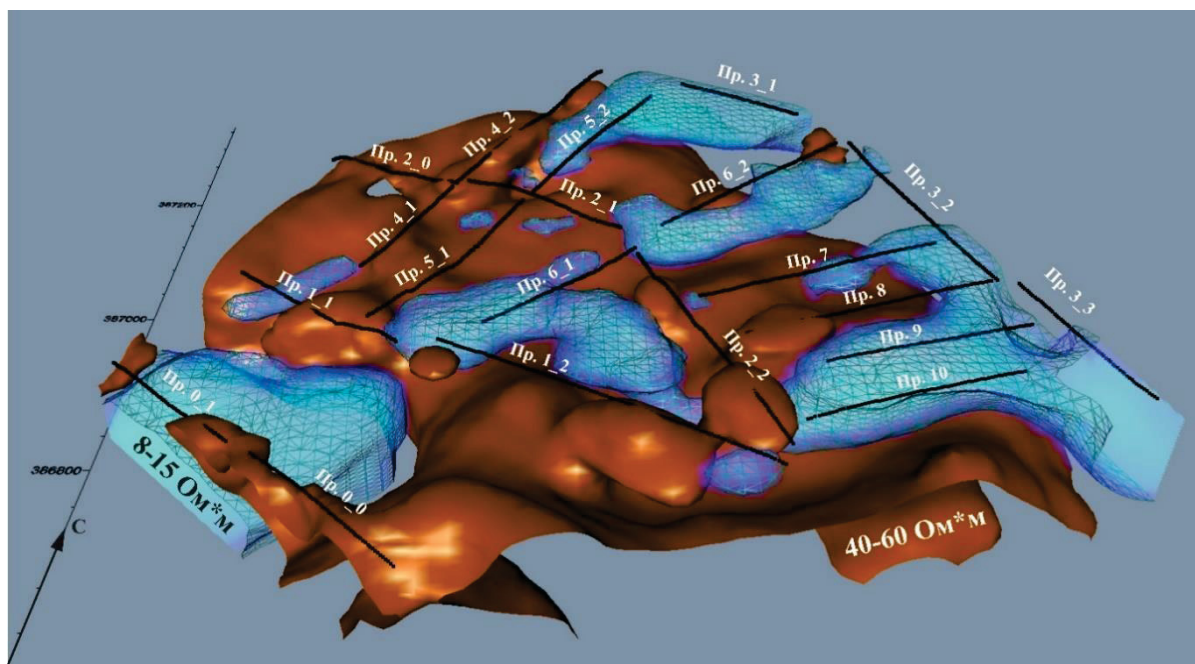


Рис. 4. Модель расположения линз верховодки и водоупорного горизонта

Fig. 4. Model of the location of the perched water lenses and the aquiclude

Результаты опытно-фильтрационных работ показали, что водовмещающие породы рассматриваемого участка недр имеют более высокие фильтрационные показатели, чем те же породы зоны аэрации с верховодками в ненарушенных оползневыми деформациями условиях. Это свидетельствует о том, что массив пород оползневой склона раздроблен, а перекрывающие древние делювиальные отложения проницаемы. Данные опытно-фильтрационных исследований приведены в таблице.

Таблица. Данные опытно-фильтрационных исследований

Table. Data of pilot seepage studies

№ скв. Borewell no.	Дебит Water discharge		Понижение, м Well drawdown, m	Удельный дебит, л/с Specific capacity, l/s	Кэф. фильтр., м/сут Permeability coefficient, m/day	Водопроницаемость, м <sup>2</sup> /сут Transmissibility, m <sup>2</sup> /day
	л/с l/s	м <sup>3</sup> /сут m <sup>3</sup> /day				
1	0,28	24,2	1,41	0,2	5,2	26
2	0,25	21,5	1,1	0,23	5,6	27
3	0,22	18,8	0,6	0,22	15,6	36
4	0,23	19,4	1,03	0,22	8,9	33
5	0,22	18,8	0,7	0,22	16	24

Фильтрационные показатели водовмещающих пород по коэффициенту водопроницаемости относительно однородны. Наиболее высокие коэффициенты

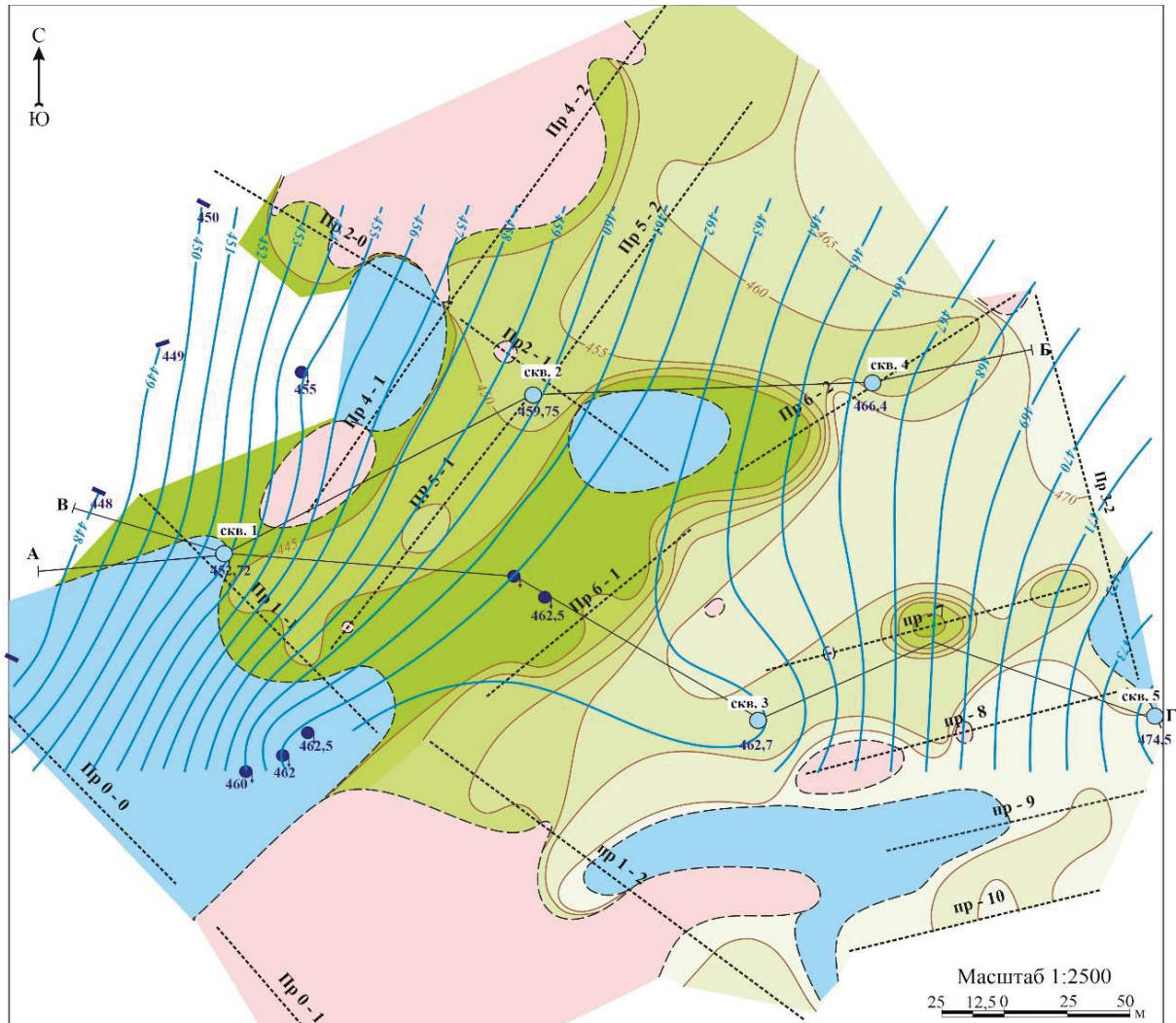
фильтрации отмечаются по скважинам 3 и 5. Скважина 3 расположена в линейной впадине, которая может быть приурочена к древнему рву оседания оползневых деформаций, то же самое касается и скважины 5.

По химическому составу вскрытые подземные воды либо хлоридно-гидрокарбонатные, либо гидрокарбонатно-хлоридные с минерализацией 0,49–0,74 г/л. Это не свойственный состав грунтовых вод юрских отложений. В естественных условиях хлориды практически отсутствуют, а минерализация подземных вод значительно ниже. Присутствие хлоридов в воде можно связать только с хорошей фильтрацией воды с поверхности земли, за счет противогололедных мероприятий, которые проводятся в холодный период года. Тем более практически до начала декабря преобладала теплая погода и часто наблюдалось снеготаяние. Это значит, что атмосферные осадки в теплый период года хорошо фильтруются в зону аэрации, где сформирован грунтовый горизонт, который залегают выше основного водоносного горизонта зоны полного водонасыщения в отложениях кудинской свиты средней юры.

По полученным данным установлено, что на рассматриваемой площади в районе улиц Радищева, Кирпичная и Ивана Кочубея расположена зона развития негативного процесса подтопления. В ее пределах выделяются следующие подзоны: сильного подтопления с уровнем подземных вод близким к поверхности земли; умеренного подтопления с глубиной залегания подземных вод от 0,3 до 2 м; слабого подтопле-

ния с глубиной залегания уровня подземных вод от 2,0 до 5,0 м. Кроме этого, за пределами зоны постоянного подтопления наблюдаются явления подтопления, имеющего временный характер. Они развиваются преимущественно в зоне аэрации. В целом вся

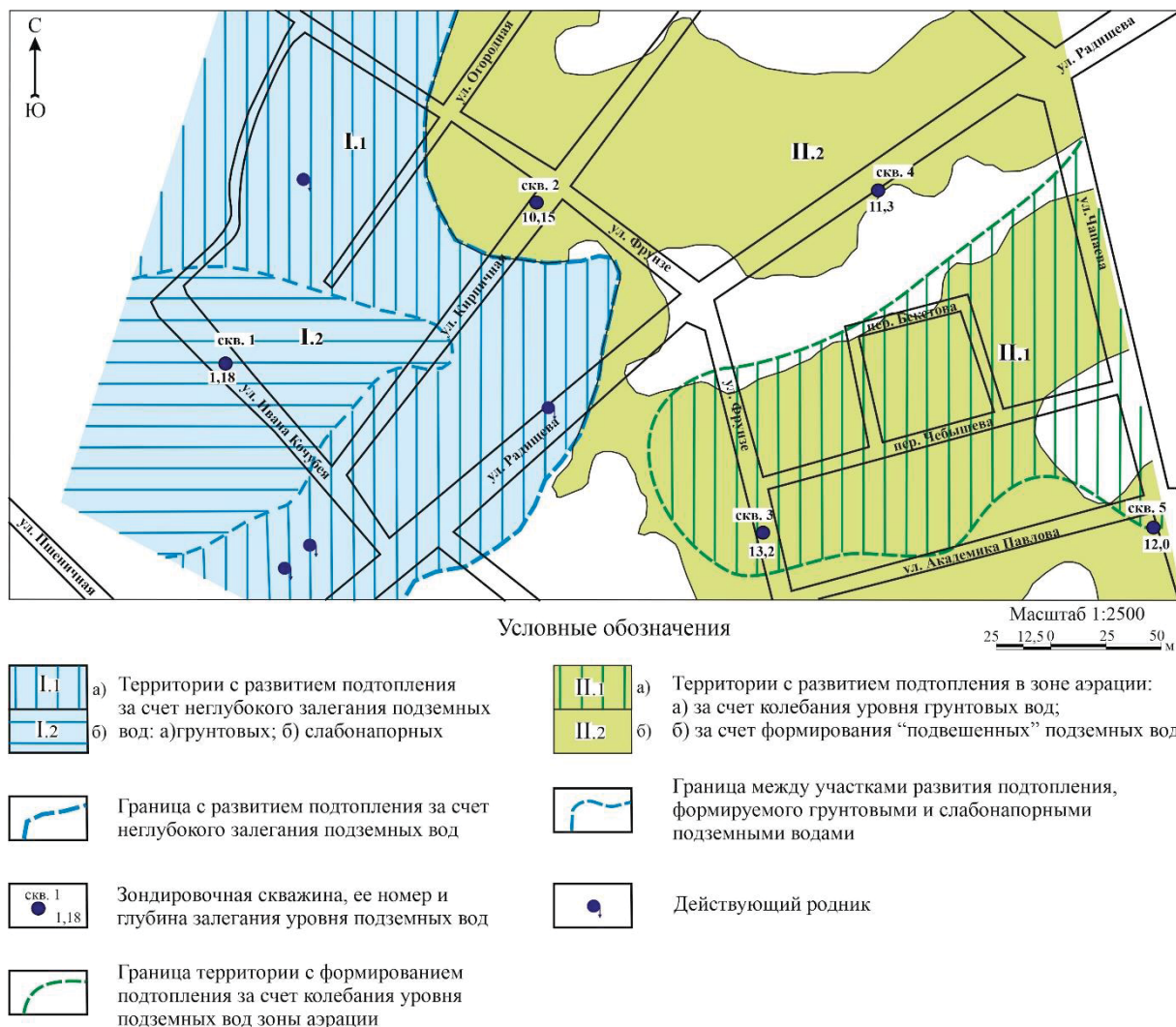
площадь разделяется на следующие территории (рис. 6): с развитием постоянного подтопления за счет неглубокого залегания подземных вод (I) и с развитием подтопления в зоне аэрации (II).



Условные обозначения

- |  |  |
|--|--|
| Шкала абсолютных отметок залегания кровли пород (слабопроницаемых-водоупорных) с высокими сопротивлениями, м | Зона залегания пород с наименьшими сопротивлениями на всю глубину исследований   |
|  | Зона залегания пород с максимальными сопротивлениями на всю глубину исследований |
| Изогипсы абсолютных отметок подошвы пород с низкими сопротивлениями пород                                    | Зондировочная скважина, ее номер и абсолютная отметка уровня воды                |
| Геофизический профиль и его номер  | Родниковая разгрузка подземных вод и абсолютная отметка уровня воды              |
| Морфоствор на ручье с постоянным стоком и абсолютная отметка уровня воды                                     | Линия геолого-гидрогеологического разреза  |
| Гидроизогипсы уровня подземных вод по состоянию на начало декабря 2021 г.                                    |  |

Рис. 5. Схематическая карта гидрогеологических условий предместья Радищева  
 Fig. 5. Contour map of the hydrogeological conditions in Radishchev outskirts



**Рис. 6.** Схема условий подтопления территории: с развитием постоянного подтопления за счет неглубокого залегания подземных вод (I) и с развитием подтопления в зоне аэрации (II).

**Fig. 6.** Plan of the settings for groundwater flooding of the territory: The increase of permanent flooding due to shallow groundwater occurrence (I) and the increase of flooding in the aeration zone (II).

По результатам бурения сильно выветрелые коренные породы в виде песчаника вскрыты скважинами 3, 4, 5 на глубине 11,0–13,5 м и скважиной 1 на глубине 6 м. Они перекрыты древними делювиальными образованиями, представленными супесью песчаной с прослойками песка, суглинка, включениями дресвы, щебня алевролита и песчаника. Сверху залегают современные делювиальные отложения, представленные преимущественно тяжелым суглинком. Мощность этих образований изменяется от 2 до 8 м. В целом же отдельные верховодки во время бурения скважин не вскрыты.

Территории с развитием подтопления за счет неглубокого залегания подземных вод разделяются на зоны с грунтовыми (I1) и напорными подземными водами (I2).

I1. Зона подтопления за счет грунтовых вод характеризуется естественным залеганием уровня на глубине от 0 до 5 м. Она примыкает к впадине в кровле водоупорных пород, которая расположена между улицами Радищева и Кирпичная. В ней концентриру-

ется подземный сток со всего оползневого цирка. Впадина является как бы аккумулятором ресурсов подземных вод, который служит источником питания грунтовых вод территории, испытывающей подтопление.

I2. Зона подтопления за счет слабонапорных подземных вод располагается ниже по склону. Здесь сверху преимущественно залегают слабопроницаемые (водоупорные) делювиальные суглинки, подошва которых расположена ниже уровня подземных вод. Местный напор обусловлен гидростатическим напором, сформированным в рядом расположенной впадине.

Для ликвидации подтопления на территориях с неглубоким залеганием подземных вод наиболее эффективным может быть только горизонтальный дренаж.

Развитие подтопления в зоне аэрации происходит за счет колебания уровня грунтовых вод (II1) и формирования «подвешенных» подземных вод (II2).

II1. Детально режим колебания уровня верховодок в зоне аэрации изучался по контрольно-наблюдательной

сети скважин на ТБО «Александровский». Амплитуда его изменения достигала, а часто и превышала 10 м. Очевидно, что такая же ситуация имеет место и в районе ул. Чебышева. В конце летнего периода 2021 г. после длительных осадков здесь оказались подтоплены подвалы на глубине 2,5–3,0 м. По результатам выполненных работ на начало декабря уровень находился на глубине 10–12 м. В районе ул. Чебышева расположена впадина в кровле водоупорных (высокоомных) пород, где концентрируется сток атмосферных осадков. Водоупорные породы вскрыты скважиной 5 на ул. Чапаева на глубине 13,5 м, мощностью 6,5 м. Водоприток в скважину из них отсутствовал, сверху залегал грунтовый горизонт мощностью 1,5 м. По результатам химического анализа воды по скважинам 3 и 5, между которыми расположена ул. Чебышева, состав воды оказался гидрокарбонатно-хлоридным с минерализацией 0,45–0,74 г/л. В летний период, во время развития подтопления, состав воды был чисто гидрокарбонатным. Хлор практически отсутствовал. Это может свидетельствовать только о том, что хлориды попали в подземные воды с поверхности земли после противогололедной обработки дорог, когда грунт еще достаточно не промерз. Таким образом, атмосферные осадки свободно могут пополнять грунтовые воды, в значительной степени повышая уровень хлора.

II2. Подтопление за счет формирования «подвешенных» подземных вод имеет временный характер и происходит на слабопроницаемых отложениях при отсутствии или нерациональной системе водоотведения атмосферных осадков. Скважинами вскрыты техногенные грунты мощностью от 0,8 до 2,3 м и делювиальные суглинки мощностью от 1 до 4 м. В замкнутых понижениях рельефа в техногенных грунтах и суглинках могут концентрироваться атмосферные осадки, подтапливая жилую застройку. Время подтопления обычно соответствует времени фильтрации воды через грунт, в котором происходит подтопление.

Для ликвидации процесса подтопления необходима организация стока атмосферных осадков. Требуется исключать концентрацию дождевых и талых вод в пониженных формах земной поверхности. Отведение

осадков с крыш необходимо по водостокам в городскую систему водоотведения.

В целом важное значение в питании очагов подтопления оказывают подземные коммуникации, через которые атмосферные осадки способны беспрепятственно поступать в зону аэрации. Такие случаи имеют достаточное распространение.

### Заключение

В процессе проведенных инженерно-геологических изысканий установлено, что естественное геологическое строение оцениваемого участка недр в предместье Радищева г. Иркутска нарушено древними оползневыми деформациями. На склоне пади Пшеничная наземными геофизическими исследованиями выявлен оползневый цирк. Монолиты коренных пород, характеризующиеся высокими сопротивлениями и являющиеся практически водоупорами, разделены на отдельные блоки, которые имеют различные абсолютные отметки кровли. Подземный сток, формируемый атмосферными осадками, концентрируется в межблоковых впадинах и опущенных блоках оползневых цирка, провоцируя проявление негативного процесса подтопления. Геофизическими исследованиями выявлены хорошо проницаемые зоны на поверхности земли, через которые происходит фильтрация атмосферных осадков и питание грунтовых вод. Кроме этого, определены участки, где возможно образование подвешенных вод и развитие за счет них процесса подтопления.

По результатам выполненных работ на основании наземных геофизических исследований и бурения зондировочных инженерно-геологических скважин выполнено районирование площади изысканий по условиям развития подтопления, оценен ущерб населению, разработаны мероприятия по ликвидации этого негативного процесса.

Применение метода электротомографии позволило весьма эффективно оценить геолого-гидрогеологические условия подтопления жилой застройки предместья Радищева г. Иркутска. По результатам только бурения это было бы невозможно.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аузина Л.И. Прогноз подпора подземных вод на территориях исторических центров городов Восточной Сибири // *Науки о Земле и недропользование*. – 2021. – Т. 44. – № 1 (74). – С. 73–84. DOI: 10.21285/2686-9993-2021-44-1-73-84.
2. Аузина Л.И., Ланкин Ю.К., Вахромеев А.Г. *Опытно-фильтрационные исследования. Основные виды работ. Методы обработки*. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2016. – 120 с.
3. Лоншаков Г.С., Аузина Л.И. Оценка ведущих факторов эволюции подземной гидросферы урбанизированных территории (на примере Г. Иркутска) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328. – № 11. – С. 50–59.
4. Поспелова И.Ю., Семигановский Б.В. Проблемы затопления г. Иркутск // *Водные ресурсы – основа устойчивого развития поселений Сибири и Арктики в XXI веке: Сборник докладов XXI Международной научно-практической конференции*. – Тюмень, 22 марта 2019. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2019. – С. 243–249.
5. Шенькман Б.М., Шолохов П.А., Шенькман И.Б. Подтопление Иркутска грунтовыми водами // *География и природные ресурсы*. – 2011. – № 2. – С. 54–62.
6. Модин И.Н., Большаков Д.К., Бомкин С.В., Скобелев А.Д., Баранчук К.И., Ефремов К.Д., Пелевин А.А., Репьев А.С. Построение объемной модели верхней части геологической среды по данным электротомографии для решения инженерно-геологических задач // *Геомодель 2015: 17-я научно-практическая конференция по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа*. – Геленджик, 07–10 сентября 2015. – Геленджик: European Association of Geoscientists & Engineers, 2015. – V. 2015. – ср-448-00019. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201412239>
7. Dahlin T. 2D resistivity surveying for environmental and engineering applications // *First Break*. – 1996. – № 14. – P. 275–283.
8. Hydrogeophysical tools for investigating groundwater storage in the subsurface of a karst system / A. Watlet, K. van Noten, T. Lecocq, J. Chambers, P. Meldrum, O. Francis, M. van Camp, O. Kaufmann // *Near Surface Geoscience: 20th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. – Greece, September 2014. – Athens: European Association of Geoscientists



- & Engineers, 2014. – V. 2014. – P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20142008>.
9. Patella D. Geophysical tomography in engineering geology: an overview // 7th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. – Brazil, October 2001. – Salvador: European Association of Geoscientists & Engineers, 2001. – cp-217-00044. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.217.044>.
10. Jones G., Sentenac P., Zielinski M. Fissure detection in flood embankments using electrical resistivity tomography // Near Surface Geoscience 2012: 18th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. – France, September 2012. – Paris: European Association of Geoscientists & Engineers, 2012. – cp-306-00184. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20143359>.
11. Visualising groundwater flow using time-lapse electrical resistivity tomography / M. Karaoulis, W. Bakx, P. Doornenba, P. Kruiver, S. Rijpkema // 25th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. – Netherlands, September 2019. – The Hague: European Association of Geoscientists & Engineers, 2019. – V. 2019. – P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902439>.
12. GEODEVICE. URL: <https://geodevice.ru/main/electric/units/skala64> (дата обращения 21.06.2022).
13. Стойкин Т.А., Балков Е.В., Манштейн Ю.А. Опыт применения электротомографии для решения инженерно-геологических задач // Инженерная и рудная геофизика 2011: 7-я научно-практическая конференция и выставка. – М., апрель 2011. – М.: European Association of Geoscientists & Engineers, 2011. – cp-236-00034. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201403895>.
14. Многоэлектродные электрические зондирования в условиях горизонтально-неоднородных сред / А.А. Бобачев, И.Н. Модин, Е.В. Перваго, В.А. Шевнин // Разведочная геофизика. Обзор. – М.: АОЗТ «Геоинформмарк», 1996. – Вып. 2. – 50 с.
15. Бортникова С.П., Ельцов И.Н., Борисенко Д.А. Возможности малоглубинной электротомографии при решении инженерно-геологических задач // Инженерная геофизика 2013: 9-я международная конференция и выставка. – Геленджик, 22–26 апреля 2013. – Геленджик: EAGE Publications BV, 2013. DOI: [10.3997/2214-4609.20142499](https://doi.org/10.3997/2214-4609.20142499).
16. Fetter C.W. Applied hydrogeology. – Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 2001. – 615 p.
17. Санчаа А.М., Фаре А.Н., Шемелина О.В. Применение метода электротомографии для поиска водоносных горизонтов в геологических условиях восточной части Новосибирской области // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 10. – С. 90–105. DOI: [10.25018/0236-1493-2019-10-090-105](https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-10-090-105).
18. Investigating hillslope hydrology with electrical resistivity tomography / E. Gasperikova, R. Salve, D. Rempe, J. Peterson // 24th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems. – Texas, April 2011. – Forth Worth: European Association of Geoscientists & Engineers, 2011. – cp-247-00023. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.247.30>.
19. Fadilah T., Gross L., Schaa R. Estimation of aquifer properties using surface based electrical resistivity tomography // EAGE-HAGI 1st Asia Pacific Meeting on Near Surface Geoscience and Engineering. – Indonesia, April 2018. – Yogyakarta: European Association of Geoscientists & Engineers, 2018. – V. 2018. – P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201800374>.
20. Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации / А.А. Бобачев, А.А. Горбунов, И.Н. Модин, В.А. Шевнин // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2006. – № 2. – С. 14–17.
21. Бобачев А.А., Модин И.Н. Электротомография со стандартными электроразведочными комплексами // Разведка и охрана недр. – 2008. – № 1. – С. 43–47.
22. Ostrowski S., Lasocki M., Pacanowski G. Electrical resistivity tomography as a tool in geological mapping // 72nd EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC. – Spain, June 2010. – Barcelona: European Association of Geoscientists & Engineers, 2010. – cp-161-00478. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201401070>.
23. Zond Software. URL: <http://zond-geo.com/software/resistivity-imaging-ves/zondres2d/> (дата обращения 21.06.2022).
24. Опыт применения электротомографии в геофизике / Е.В. Балков, Г.Л. Панин, Ю.А. Манштейн и др. // Геофизика. – 2012. – № 6. – С. 54–63.
25. Loke M.H., Barker R.D. Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections // Geophysics. – 1995. – V. 60. – P. 1682–1690.
26. Loke M.H., Barker R.D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method // Geophysical Prospecting. – 1996. – № 44. – P. 131–152.
27. Loke M.H., Acworth I., Dahlin T. A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys // Explor. Geophys. – 2003. – V. 34. – P. 182–187.

Поступила 11.07.2022 г.

Прошла рецензирование 13.09.2022 г.

#### Информация об авторах

**Шкиря М.С.**, младший научный сотрудник департамента геофизики «Сибирской Школы Геонаук» Иркутского национального исследовательского технического университета.

**Ланкин Ю.К.**, руководитель Иркутского территориального центра государственного мониторинга геологической среды АО «Росгео».

**Терешкин С.А.**, младший научный сотрудник департамента геофизики «Сибирской Школы Геонаук» Иркутского национального исследовательского технического университета.

**Лазурченко А.В.**, студент кафедры прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем Иркутского национального исследовательского технического университета.

**Давыденко Ю.А.**, кандидат технических наук, директор по маркетингу и проектному обучению «Сибирской Школы Геонаук» Иркутского национального исследовательского технического университета.

UDC 550.370, 556

## APPLYING GROUND GEOPHYSICAL PROSPECTING USING THE METHOD OF ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY AS PART OF ENGINEERING AND GEOLOGICAL SURVEYS OF A FLOODED AREA IN ONE OF THE RESIDENTIAL AREAS OF IRKUTSK

Mikhail S. Shkiriya<sup>1</sup>,  
mshkiriya@geo.istu.edu

Yury K. Lankin<sup>2</sup>,  
yur-lankin@yandex.ru

Stanislav A. Tereshkin<sup>1</sup>,  
stereshkin@geo.istu.edu

Anton V. Lazurchenko<sup>1</sup>,  
alazurchenko@geo.istu.edu

Yury A. Davydenko<sup>1</sup>,  
dya@geo.istu.edu

<sup>1</sup> Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russia.

<sup>2</sup> JSC «Rosgeo»,  
9a, Clara Zetkin street, Irkutsk, 664039, Russia.

**The relevance** of the study is caused by the necessity to assess the problem of flooding of one of the residential areas in Irkutsk, Irkutsk region. The flooding of urban areas is mostly seasonal. Identifying the conditions of aquicludes and well-permeable rocks, as well as, determining areas of possible groundwater accumulation using the method of electrical resistivity tomography makes it possible to develop measures to eliminate the damage caused by flooding.

**The objective.** The work was carried out using the method of electrical resistivity tomography to assess the geological and hydrogeological conditions for flooding development, which has negative impact on residential development.

**Objects:** bedrock monoliths characterized by high electrical resistance and being practically aquicludes; permeable zones on the land surface, which provide precipitation filtration and ground-water supply through them; areas, where the formation of vadose waters that cause the development of groundwater flooding is possible.

**Methods:** ground geophysical prospecting using the method of electrical resistivity tomography; two-dimensional and three-dimensional inversion of electrical resistivity tomography data and its interpretation with regard to geotechnical drilling data.

As a result of ground geophysical prospecting, it was established that the slope on which the assessed territory is located is an ancient landslide cirque, where the natural state of the rock mass is disturbed. Geophysical prospecting has revealed well-permeable zones on the land surface, which provide precipitation filtration and ground-water supply through them. According to electrical resistivity tomography, subzones were identified: severe flooding with groundwater level close to the land surface; moderate flooding with a groundwater level depth of 0,3 to 2 meters and weak flooding with a groundwater level depth of 2,0 to 5,0 meters.

### Key words:

groundwater flooding, electrical resistivity tomography, electrical resistivity, groundwater, vadose zone, perched water.

### REFERENCES

1. Auzina L.I. Predicting groundwater rise in historical centres of Eastern Siberian cities. *Earth sciences and subsoil use*, 2021, vol. 44, no. 1, pp. 73–84. In Rus. DOI: <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-1-73-84>.
2. Auzina L.I., Lankin Yu.K., Vakhromeev A.G. *Opytno-filtratsionnye issledovaniya. Osnovnye vidy rabot. Metody obrabotki* [Pilot seepage studies. Main types of work. Processing methods]. Irkutsk, Irkutsk National Research Technical University Publ., 2016. 120 p.
3. Lonshakov G.S. Evaluation of determining factors of underground hydrosphere evolution within urban areas (on the example of Irkutsk). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 11, pp. 50–59.
4. Pospelova I.Yu., Semiganovsky B.V. Problemy zatopeniya g Irkutsk [Problems of flooding in Irkutsk]. *Vodnye resursy – osnova ustoychivogo razvitiia poseleniy Sibiri i Arktiki v XXI veke. Sbornik dokladov XXI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Water resources – the basis for sustainable development of settlements in Siberia and the Arctic in the XXI century. Conference proceedings of the XXI International scientific and practical conference]. Tyumen, March 22, 2019. Tyumen, Tyumen Industrial University, 2019. pp. 243–249.
5. Shenkman B.M., Sholokhov P.A., Shenkman I.B. Underflooding of Irkutsk caused by phreatic rise. *Geography and Natural Resources*, 2011, vol. 2, pp. 54–62. In Rus.
6. Modin I.N., Bolshakov D.K., Bomkin S.V., Skobelev A.D., Baranchuk K.I., Efremov K.D., Pelevin A.A., Repiev A.S. Construction of three-dimensional model top of the geological environment according electrical resistivity tomography for geotechnical problems. *Geomodel 2015 – 17th science and applied research conference on oil and gas geological exploration and development*. Gelendzhik, September 2015. Vol. 2015, cp-448-00019. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201412239>.
7. Dahlin T. 2D resistivity surveying for environmental and engineering applications. *First Break*, 1996, no. 14, pp. 275–283.
8. Watlet A., Van Noten K., Lecocq T., Chambers J., Meldrum P., Francis O., Van Camp M., Kaufmann O. Hydrogeophysical tools for investigating groundwater storage in the subsurface of a karst system. *Near Surface Geoscience 2014. 20th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. Greece, September 2014. Athens, European Association of Geoscientists & Engineers,

2014. Vol. 2014, pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20142008>.
9. Patella D. Geophysical tomography in engineering geology: an overview. *7<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society*. Brazil, October 2001. Salvador, European Association of Geoscientists & Engineers. cp-217-00044. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.217.044>.
  10. Jones G., Sentenac P., Zielinski M. Fissure detection in flood embankments using electrical resistivity tomography. *Near Surface Geoscience 2012. 18<sup>th</sup> European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. France, September 2012. Paris, European Association of Geoscientists & Engineers, 2012. cp-306-00184. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20143359>.
  11. Karaoulis M., Bakx W., Doornenba P., Kruiver P., Rijpkema S. Visualising groundwater flow using time-lapse electrical resistivity tomography. *25<sup>th</sup> European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. Netherlands, September 2019. The Hague, European Association of Geoscientists & Engineers, 2019. Vol. 2019, pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902439>.
  12. *Geodevice* [Geo device]. Available at: <https://geodevice.ru/main/electric/units/skala64> (accessed 21 June 2022).
  13. Stoikin T.A., Balkov E.V., Manstein Yu.A. Experience in the use of electrical resistivity tomography for solving engineering-geological problems. *7<sup>th</sup> EAGE International Scientific and Practical Conference and Exhibition on Engineering and Mining Geophysics*. Moscow, April 2011. Moscow, European Association of Geoscientists & Engineers cp-236-00034. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201403895>.
  14. Bobachev A.A., Modin I.N., Pervago E.V., Shevnin V.A. Mno-goelektrodneye elektricheskie zondirovaniya v usloviyakh gorizont-alno-neodnorodnykh sred [Multielectrode electric sounding in conditions of horizontally inhomogeneous media]. *Razvedochnaya geofizika. Obzor* [Exploration Geophysics. Review]. Moscow, CJSC Geoinformmark, 1996. Iss. 2, 50 p.
  15. Bortnikova S.P., Eltsov I.N., Borisenko D.A. Vozmozhnosti maloglobulinoy elektrotomografii pri reshenii inzhenerno-geologicheskikh zadach [Possibilities of shallow electrical resistivity tomography in solving engineering-geological problems]. *In-zhenernaya geofizika 2013. 9 Mezhdunarodnaya konferentsiya i vystavka* [Engineering geophysics 2013: 9th international conference and exhibition, Gelendzhik, April 22–26, 2013. Gelendzhik, EAGE Publications BV, 2013. DOI: [10.3997/2214-4609.20142499](https://doi.org/10.3997/2214-4609.20142499).
  16. Fetter C.W. *Applied hydrogeology*. Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall, 2001. 615 p.
  17. Sanchaa A.M., Fage A.N., Shemelina O.V. Application of electrical tomography to detecting aquifers in geological conditions of the eastern Novosibirsk Region. *Mining Inf. Anal. Bull.*, 2019, no. 10, pp. 90–105. In Rus. DOI: [10.25018/0236-1493-2019-10-0-90-105](https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-10-0-90-105).
  18. Gasperikova E., Salve R., Rempe D., Peterson J. Investigating hillslope hydrology with electrical resistivity tomography. *24<sup>th</sup> EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*. Texas, April 2011. Forth Worth, European Association of Geoscientists & Engineers. cp-247-00023. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.247.30>.
  19. Fadilah T., Gross L., Schaa R. Estimation of aquifer properties using surface based electrical resistivity tomography. *EAGE-HAGI 1st Asia Pacific Meeting on Near Surface Geoscience and Engineering*. Indonesia, April 2018. Yogyakarta, European Association of Geoscientists & Engineers. Vol. 2018, pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201800374>.
  20. Bobachev A.A., Gorbunov A.A., Modin I.N., Shevnin V.A. ERT as the method of resistivity and induced polarization. Instruments and systems of exploration. *Geofizika*, 2006, no. 2, pp. 14–17. In Rus.
  21. Bobachev A.A., Modin I.N. Electrical resistivity tomography with standard electrical prospecting complexes. *Prospect and protection of mineral resources*, 2008, no. 1, pp. 43–47. In Rus.
  22. Ostrowski S., Lasocki M., Pacanowski G. Electrical resistivity tomography as a tool in geological mapping. *72<sup>nd</sup> EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC*. Spain, June 2010. Barcelona, European Association of Geoscientists & Engineers. cp-161-00478. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201401070>.
  23. *Zond Software*. Available at: <http://zond-geo.com/software/resistivity-imaging-ves/zondres2d/> (accessed 21 June 2022).
  24. Balkov E.V., Panin G.L., Manstein Yu.A. Experience in the use of electrical resistivity tomography in geophysics. *Geophysics*, 2012, no. 6, pp. 54–63. In Rus.
  25. Loke M.H., Barker R.D. Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. *Geophysics*, 1995, no. 60, pp. 1682–1690.
  26. Loke M.H., Barker R.D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 1996, no. 44, pp. 131–152.
  27. Loke M.H., Acworth I., Dahlin T. A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys. *Explor. Geophys.*, 2003, vol. 34, pp. 182–187.

Received: 11 July 2022.

Reviewed 13 September 2022.

#### Information about the authors

**Mikhail S. Shkiriya**, junior researcher, Irkutsk National Research Technical University.

**Yury K. Lankin**, head of the Irkutsk Territorial Center for State Monitoring of Geological Environment, JSC «Rosgeo».

**Stanislav A. Tereshkin**, junior researcher, Irkutsk National Research Technical University.

**Anton V. Lazurchenko**, student, Irkutsk National Research Technical University.

**Yury A. Davydenko**, Cand. Sc., Marketing and Project Education Director, Siberian School of Geosciences, Irkutsk National Research Technical University.

УДК 621.039.75

## ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ЛАЗЕРНОЙ ДЕЗАКТИВАЦИОННОЙ ОЧИСТКЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ МЕТАЛЛОВ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ РАДИОАКТИВНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

**Софронов Владимир Леонидович<sup>1</sup>,**  
vlsofronov@mephi.ru

**Карташов Евгений Юрьевич<sup>1</sup>,**  
kart.62@yandex.ru

**Ткачук Семён Александрович<sup>1</sup>,**  
semenaleksandrovih@gmail.com

**Пак Александр Дмитриевич<sup>1</sup>,**  
AIDPak@rosatom.ru

**Тинин Василий Владимирович<sup>2</sup>,**  
shk@atomsib.ru

**Галата Андрей Александрович<sup>2</sup>,**  
shk@atomsib.ru

<sup>1</sup> Северский технологический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Россия, 636036, г. Северск, пр. Коммунистический, 65.

<sup>2</sup> АО «Сибирский химический комбинат», Россия, 636039, г. Северск, ул. Курчатова, 1.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью поиска нового, более эффективного, метода дезактивации больших объемов металлических отходов, загрязненных радиоактивными веществами. Накопление такого вида отходов связано с производством и последующим сокращением ядерных боезарядов, демонтажем отработавших ресурс объектов атомной промышленности и неядерного сектора.

**Цель:** проведение исследований по дезактивационной очистке металлических поверхностей, загрязненных радиоактивными материалами, с использованием передвижной лазерной установки модульного типа.

**Объекты:** системы, состоящие из образцов различных металлов и связанных с ними слоев покрытий различной морфологии (слой коррозии, лакокрасочного покрытия, смазки), загрязненных радиоактивными веществами, а также лазерное излучение.

**Методы:** лазерная дезактивация (установка «HTF Clean 500»), радиометрический анализ (МКС-01А «МУЛЬТИРАД» и МКС-АТ-1117М), оптическая микроскопия (Micromed Polar Nikon SMZ745T), фотофиксация (Sony α-6000), сканирующая электронная микроскопия (Carl Zeiss Sigma), шлифовальный и обрезной инструменты, электронные весы (СПВ-60), линейный измерительный инструмент.

**Результаты.** Разработаны методики проведения исследований процесса лазерной дезактивации металлических поверхностей, загрязненных радиоактивными веществами и дозиметрических исследований образцов металлических поверхностей до и после их лазерной обработки. Определены оптимальные параметры процесса лазерной дезактивации поверхностей различной морфологии и состава; построены графики зависимостей степени удаляемого загрязнения различной морфологии и состава от числа проходов лазерной дезактивации; сделаны выводы о целесообразности использования метода лазерной очистки для обработки металлов, содержащих на поверхности радиоактивные вещества, и даны рекомендации по проведению процесса лазерной дезактивации для различных металлических отходов, загрязненных радиоактивными веществами.

### **Ключевые слова:**

радиация, дезактивация, поверхность, установка лазерной дезактивации, степень очистки, радиоактивное загрязнение, загрязненные поверхности.

### **Введение**

Одной из важнейших проблем, которую необходимо решить ГК «Росатом», является обращение с радиоактивными отходами, в том числе с металлическими, загрязненными радиоактивными веществами (МОЗРВ). Наличие достаточно большого объема таких отходов обусловлено как накоплением в результате производства и массового сокращения ядерных вооружений, так и демонтажем отработавших ресурс объектов атомной энергетики и промышленности. Большое количество МОЗРВ также накоплено на объектах неядерного сектора, в первую очередь, на

предприятиях нефтяной и газовой промышленности. Эти отходы представляют собой трубопроводы, арматуру и технологические аппараты газо- и нефтеперерабатывающих заводов, загрязненные природными радионуклидами (радий, торий, калий и др.) [1, 2].

Дезактивация поверхностей оборудования способствует значительному уменьшению вероятности поступления радиоактивных веществ в организм человека через органы дыхания, желудочно-кишечный тракт и кожные покровы, а также снижает дозовые нагрузки персонала, занятого в условиях воздействия источников ионизирующего излучения [3].

Способы дезактивации МОЗРВ традиционными химическими, физико-химическими и физико-механическими методами имеют существенные недостатки. В зависимости от состава и уровня радиоактивного загрязнения очистка проводится с использованием установок механической (дробеструйной), термической и лазерной дезактивации. У лазерной дезактивации есть ряд неоспоримых преимуществ перед другими методами.

В условиях производства очень важным фактором является возможность быстрого перехода с обработки одного вида деталей на другой или перехода с одного рабочего места на другое. Лазерный пучок в сочетании с современными средствами компьютерного управления позволяет реализовать эти возможности. Перевод лазерной обработки материалов с одного рабочего места на другое или с одного технологического процесса на другой может составлять несколько секунд, в этом проявляется гибкость лазерного пучка как технологического инструмента. Особенно ярко это свойство лазерного пучка проявляется при использовании его со световолоконными системами.

Лазерный пучок, как технологический инструмент, не подвержен износу, в отличие, например, от реза или фрезы, применяющихся при механической обработке. Эффект «безызносности» дает пучку лазера большие экономические преимущества и обеспечивает высокую воспроизводимость технологических процессов [4–7].

#### Физические основы лазерной дезактивации

Физические процессы, происходящие при лазерной дезактивации поверхности, отличаются большим разнообразием и зависят от плотности лазерного излучения.

Общая схема процесса воздействия лазерного излучения на обрабатываемый материал приведена рис. 1.

Взаимодействие лазерного излучения со сложной многокомпонентной системой поверхностных слоёв можно в целях упрощения представить в виде совокупности процессов. Главный процесс, определяющий

течение остальных процессов, – это, как правило, поверхностное поглощение лазерного излучения основным слоем металла. Динамика этого процесса определяет характер всех последующих явлений, устанавливая распределение энергии лазерного излучения по различным каналам [1]. Исключением из этого правила является предварительное разрушение лазерным излучением слоя лакокрасочных покрытий (ЛКП), за которым, впрочем, обязательно следует удаление разрушенного слоя следующим проходом, в котором опять главную роль играет поглощение лазерного излучения основным слоем металла. Другие основные процессы, имеющие место при лазерной очистке поверхности металла, – это разлёт лазерной искры (газов и фрагментов поверхности), термомеханическая реакция поверхности металла, фотоэмиссия лазерной искры (рис. 2).

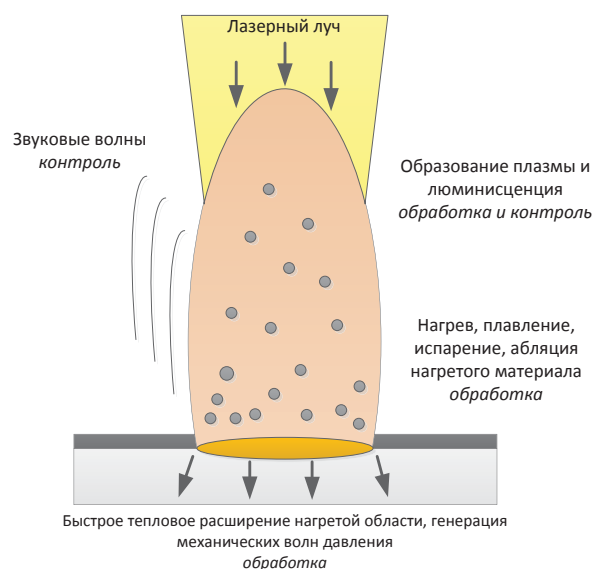


Рис. 1. Общая схема процессов воздействия лазерного излучения на материалы

Fig. 1. General scheme of laser radiation impact on materials

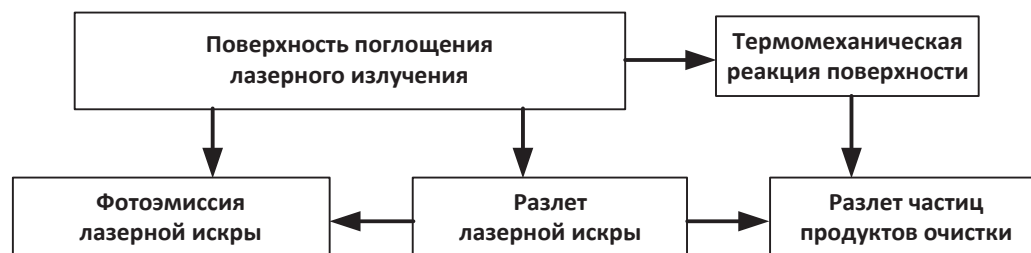


Рис. 2. Основные явления в составе процесса лазерной очистки

Fig. 2. Main phenomena in the composition of the laser cleaning

Физические процессы, происходящие при лазерной очистке поверхности, отличаются большим разнообразием и зависят от плотности мощности лазерного излучения на поверхности. Первоначально использовались преимущественно испарительные механизмы лазерной дезактивации поверхности, когда

плотность мощности излучения превышает значение, при котором начинается испарение загрязняющих веществ с поверхности [5, 8].

В этом случае в основе физики процесса лазерного удаления поверхностных слоёв (ржавчины, окарины, оксидов, загрязнений, лаков, красок, жиров и

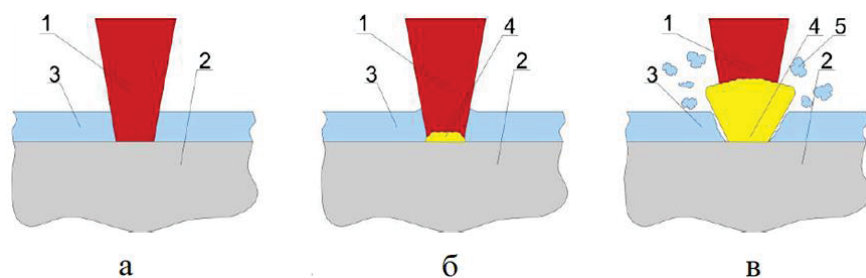
т. д.) лежит эффект испарения, то есть перевода материала из твердой фазы в паро-газо-плазменную, при этом желательнее минимизировать образование жидкой фазы.

Распространение света в веществе зачастую описывается законом Бугера–Ламберта–Бэра [9]:

$$q(x) = q_0 \cdot (1 - R) \cdot (\exp(-\alpha x)),$$

где  $q_0$  – плотность мощности излучения, падающего на поверхность;  $q(x)$  – плотность мощности излучения на глубине  $x$ ;  $R$  – коэффициент отражения вещества;  $\alpha$  – показатель поглощения вещества.

Показатель поглощения для металлов на длине волны 1,06 мкм составляет  $10^3 \dots 10^4 \text{ см}^{-1}$ , тогда как показатель поглощения неметаллических веществ на несколько порядков ниже и составляет  $10^{-1} \dots 10^{-3} \text{ см}^{-1}$



**Рис. 3.** Испарительный механизм лазерной очистки: 1 – лазерный пучок; 2 – загрязненный материал; 3 – загрязнение; 4 – облако испаренного вещества; 5 – частицы загрязнения, удаленные с поверхности материала

**Fig. 3.** Evaporative mechanism of laser cleaning: 1 – laser beam; 2 – contaminated material; 3 – pollution; 4 – vaporized substance cloud; 5 – pollution particles removed from the material surface

В случае, когда плотность мощности лазерного излучения достаточна для того, чтобы разогреть материал (металл) до температуры кипения на границе раздела загрязнение – основной материал, начинается испарение материала (рис. 3, б). Под давлением разогретых до высоких температур паров слой неметаллического загрязнения разрушается и удаляется с поверхности материала (рис. 3, в). Кроме того, во многих случаях давление разогретого газа разрушает слой загрязнения не только в зоне области прямого лазерного воздействия, но и в близлежащей области, что повышает производительность очистки.

Таким образом, задача выбора оптимального режима работы лазера в испарительном режиме очистки сводится к обеспечению минимального порога испарения вещества основного металла. Известно, что таковой обеспечивается в импульсном режиме воздействия [9]. Кроме того, чем меньше длительность воздействия, тем меньше размер прогретой зоны вещества и, следовательно, меньше коли-

[9]. Из закона Бугера–Ламберта–Бэра следует, что металлы на этой длине волны поглощают излучение лазера в тонком поверхностном слое, тогда как неметаллические вещества имеют объемное поглощение. Таким образом, при толщине неметаллического загрязнения несколько сотен микрон допустимо считать, что этот слой относительно прозрачен.

Опираясь на изложенное выше, опишем качественно испарительный механизм лазерной очистки (поверхности металлов от неметаллических загрязнений). Будем считать, что лазерный импульс, попадая на загрязненную поверхность, проходит сквозь загрязнение практически без ослабления и поглощается в приповерхностном слое материала (рис. 3, а).

чество образующегося расплава и пара при большем давлении последнего. Например, при воздействии импульса длительностью 10 нс и мощностью в 10 мДж, сфокусированного в пятно диаметром 0,2 мм, плотность мощности в зоне обработки достигает  $3 \text{ ГВт/см}^2$ . При данной плотности мощности глубина прогреваемого слоя в стали  $x_{\text{пр}}$  составляет  $10^{-4} \dots 10^{-5} \text{ см}$ , при этом испарение происходит практически без образования расплава на поверхности вещества (абляция), и модификация исходной поверхности минимальна [9, 10].

Для этого применяют импульсное лазерное излучение с короткой длительностью импульса (несколько десятков наносекунд) и высокой пиковой мощностью, обеспечивающей плотность мощности в зоне обработки  $10^7 \dots 10^{10} \text{ Вт/см}^2$  при диаметре сфокусированного пятна пучка лазера около 0,5 мм, с энергией в импульсе несколько мДж и частотой следования импульсов более 20 кГц. Схема лазерной очистки поверхности сканированием пучка показана на рис. 4.



**Рис. 4.** Схема процесса лазерной дезактивации поверхности со сканированием

Fig. 4. Scheme of laser surface decontamination with scanning

Большинство испарительных режимов промышленной лазерной дезактивации требует достаточно высоких температур, и часть тепла переходит в приповерхностный слой основного (очищаемого) материала. Это может вызвать его повреждения различного характера: поверхностное плавление или испарение, инициирование химических процессов в приповерхностном слое, механическое повреждение. Кроме того, при высоких температурах может происходить вжигание вещества загрязняющих пленок и частиц в поверхностный слой основного материала, после этого очистка возможна только при совместном удалении с приповерхностным слоем основного материала. Испарительные режимы лазерной дезактивации возможны при использовании как импульсного, так и непрерывного лазерного излучения, когда речь идет о

черновых процессах, требующих высокой производительности [11–14].

#### Схема установки и методика проведения экспериментов

В работе приведены результаты исследований по лазерной дезактивации загрязненных поверхностей при помощи модульной лазерной установка «НТФ Clean 500». Установка характеризуется высокой производительностью, достигающей нескольких квадратных метров в час, более высокой безопасностью по сравнению с другими установками по дезактивации, отсутствием расходных материалов. Применение оборудования такого типа позволит комплексно решить проблему очистки поверхности от органических и неорганических загрязнений [15].

Принципиальная схема установки приведена на рис. 5.

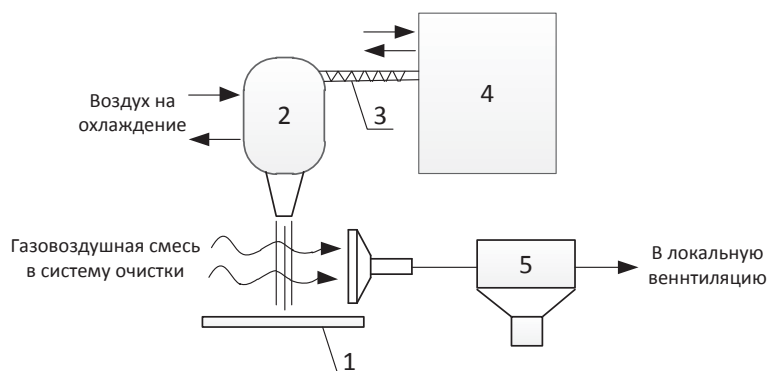


Рис. 5. Принципиальная схема установки лазерной дезактивации: 1 – обрабатываемая поверхность; 2 – ручной манипулятор; 3 – оптоволоконный кабель; 4 – генератор лазерного излучения; 5 – фильтровально-вытяжной модуль

Fig. 5. Schematic diagram of the laser decontamination unit: 1 – treated surface; 2 – manual manipulator; 3 – fiber optic cable; 4 – laser radiation generator; 5 – filtering and exhaust module

Основой установки является охлаждаемый генератор лазерного излучения – 4 с максимальной мощностью 500 Вт, работающий с частотой от 5 до 50 кГц. Источник через оптоволоконный кабель – 3 соединяется с ручным манипулятором – 2, снабженным «воздушным ножом» – системой охлаждения и удаления пыли с фокусирующей линзы манипулятора. Манипулятор управляется вручную оператором установки.

При обработке металла образуются аэрозоли, содержащие частицы металла, оксидов, радиоактивных элементов, которые захватываются потоком воздуха фильтровально-вытяжного модуля (ФВМ) – 5 на базе передвижной вентиляционно-аспирационной установки, где происходит очистка примерно на 98 % от твердых включений.

Технические характеристики оборудования приведены в таблице.

Параметры работы установки (мощность, скорость прохода) для каждого конкретного материала и загрязнения подбирали экспериментальным путем.

Для проведения исследований вырезали образцы из различных металлов с коррозионными отложениями, лакокрасочными покрытиями, отработавшим маслом и сварными швами, незагрязненные и загряз-

ненные радиоактивными веществами различной морфологии и состава.

Таблица. Характеристики оборудования

Table. Equipment characteristics

Характеристика установки Installation characteristics	Значение Value
Мощность лазерного источника, Вт Laser source power, W	от 50 до 500/50 to 500
Частота следования импульсов, кГц Pulse repetition rate, kHz	от 5 до 50/5 to 50
Ширина сканирования, мм Scanning width, mm	от 30 до 100/30 to 100
Скорость развертки, м/с Sweep speed, m/s	от 1 до 10/1 to 10
Длительность импульса, нс Pulse duration, ns	100
Длина волны, мкм/Wavelength, $\mu\text{m}$	1,07
Режим работы/Working mode	Импульсный/Pulse
Тип охлаждения/Cooling type	Жидкостной/Liquid

Исследуемые образцы до и после лазерной обработки анализировали на наличие радиоактивных веществ радиометром (МКС-01А «МУЛЬТИРАД»). Эти образцы имели следующие диапазоны радиоактивных загрязнений:

- $\beta$ : от 0 до 2500 част./ $(\text{мин} \cdot \text{см}^2)$ ;
- $\alpha$ : от 0 до 100 част./ $(\text{мин} \cdot \text{см}^2)$ .

При этом также проводили фотофиксацию поверхностей образцов металлов до и после лазерной обработки фотоаппаратом (Sony  $\alpha$ -6000) и определяли их площади поверхности ( $\text{см}^2$ ), толщины (мм) и массы (г).

Исследования по сухой лазерной обработке начинали с незагрязненных РВ образцов и далее переходили к МОЗРВ.

В процессе исследований установили, что после лазерной обработки поверхность металла модифицируется, оставляя характерный рисунок, связанный с высокотемпературными процессами, что также может сопровождаться *паразитным явлением* – заплыванием радиоактивных частиц в приповерхностный слой. Поэтому оптимальными считали параметры, обеспечивающие удаление загрязненного слоя с минимальным количеством «проходов» манипулятора по единице площади образца с мощностью и частотой лазерного генератора, исключающей заплывание радиоактивных элементов в объем модифицированной поверхности [16–20].

Для оценки степени сплавления радиоактивных частиц с модифицированным слоем проводили кратковременную обработку абразивным материалом (полукруглым напильником) поверхности образцов, после чего измерили остаточную  $\alpha$ - и  $\beta$ - активности поверхности в местах зачистки, а также в образовавшихся металлических шлифотходах.

Согласно МУК 2.6.1.1087-02 незагрязненным является металл, вблизи которого плотность потока альфа-излучения менее  $2,4 \text{ част./}(\text{мин} \cdot \text{см}^2)$ , а плотность потока бета-излучения не превышает  $24 \text{ част./}(\text{мин} \cdot \text{см}^2)$ . Такой металл приравнивают к металлическому лому.

### Результаты экспериментов и обсуждение

*Подбор основных параметров процесса лазерной обработки.* С целью определения оптимальных параметров работы лазерной установки (мощность, скорость прохода и т. д.) вначале проводили исследования по лазерной обработке образцов материалов с нерадиоактивным загрязнением.

Установка по лазерной обработке металлических поверхностей имеет ряд параметров, которые можно

регулировать для достижения наилучших показателей процесса очистки. Такими параметрами являются:

- мощность лазерного пучка (P), %;
- частота лазерного излучения ( $\omega$ ), кГц;
- скорость развертки (N), м/с;
- ширина обработки (H), мм;
- скорость движения сервопривода (v), см/с.

Для определения параметров, которые оказывают наибольшее влияние на показатели процесса очистки, провели тестовые проходы на ряде образцов из Ст. 3, покрытых ржавчиной, но незагрязненных радиоактивными веществами.

Проведенные исследования, результаты которых графически приведены на рис. 6, показывают, что при вариации мощности лазерного излучения в интервале от 100 до 50 % наблюдается значительное уменьшение массы удаляемого с поверхности обработанного материала. При этом показатели очистки металлической поверхности остаются практически постоянными при изменении мощности установки в пределах от 100 до 90 %.

Частота лазерного излучения установки может меняться в интервале от 5 до 50 кГц. При увеличении частоты от 5 до 50 кГц наблюдается снижение ширины обрабатываемой поверхности от 100 до 30 мм (таблица).

Экспериментально при предварительных исследованиях по лазерной обработке загрязненных поверхностей различных металлов нами было установлено, что уменьшение ширины обработки детали до 50 мм и ниже приводит к локальному перегреву обрабатываемой поверхности, а также увеличивает число проходов, необходимых для достижения требуемых параметров обработки. Вследствие этого такие режимы характеризуются наименьшей производительностью на единицу мощности лазерного излучения.

Скорость развертки лазерного луча может изменяться в диапазоне от 1 до 10 м/с. При увеличении скорости наблюдаются явления, аналогичные тем, что фиксировали при увеличении частоты, т. е. происходит значительное уменьшение ширины обрабатываемой поверхности.

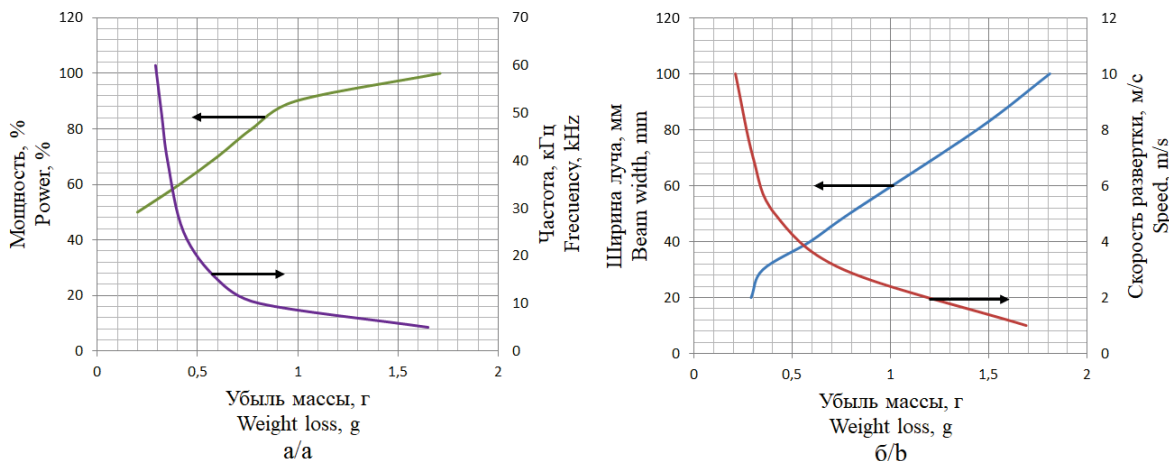


Рис. 6. Зависимости влияния основных параметров лазерного излучения на убыль массы образца из Ст. 3: а) мощности и частоты лазерного излучения; б) скорости развёртки и ширины лазерного излучения



**Fig. 6.** Dependences of the influence of the laser radiation main parameters on the weight loss of the sample from St. 3: a) power and frequency of laser radiation; b) sweep speed and width of laser radiation

Таким образом, из результатов приведенных исследований следует, что для достижения лучших показателей лазерной очистки металлической стальной поверхности, имеющей нерадиоактивные загрязнения, при минимальном числе проходов оптимальными параметрами являются: мощность лазерной установки – 90–100 %, частота – 5–10 кГц, скорость развертки – 1–2,5 м/с, ширина лазерного пучка – 90–100 мм.

Скорость движения сервопривода подбирали исходя из рекомендаций [14–17] для каждого исследуемого материала в диапазоне от 0,4 до 2,5 см/с.

*Исследования процесса очистки МОЗРВ.* Для проведения испытаний были отобраны следующие образцы, загрязненные радиоактивными элементами:

- Ст. 3 со слоем коррозионных отложений;
- Ст. 3, имеющая лакокрасочное покрытие типа ПФ-115;
- Ст. 3, загрязненная консистентной смазкой типа Литол-24;
- Ст. 10 со слоем коррозионных отложений;
- легированная сталь 12Х18Н10Т (полированная), загрязненная консистентной смазкой типа Литол-24;
- цветные металлы (Al и Cu), имеющие поверхностные окисления.

Кратко рассмотрим основные характеристики выбранных образцов металлов и условия их исследования:

- 1) *Ст. 3 со слоем коррозионных отложений.* Для исследования выбрали перфорированный настил в виде листового проката толщиной 3 мм, покрытый слоем продуктов коррозии, из которого вырезали пластины прямоугольной формы с площадью поверхности около 260 см<sup>2</sup>. Исследования проводили при скорости перемещения сервопривода от 0,4 до 2,3 см/с и постоянной мощности лазерного излучения (100 %);
- 2) *Ст. 3 со слоем ЛКП.* Для исследования выбрали листовую прокат толщиной 3 мм, покрытый слоем лакокрасочного покрытия неизвестного происхождения толщиной около 50 мкм, из которого вырезали пластины прямоугольной формы с площадью поверхности 180 см<sup>2</sup>. Исследования проводили при скорости перемещения сервопривода от 0,4 до 2,3 см/с и постоянной мощности лазерного излучения (100 %);
- 3) *Ст. 10 со слоем коррозионных отложений.* Для опытов выбрали отрезок трубы с толщиной стенки 3 мм, покрытый слоем продуктов коррозии, из которого вырезали части с площадями поверхности от около 300 см<sup>2</sup>. Исследования проводили при скорости перемещения сервопривода от 0,4 до 2,3 см/с и постоянной мощности лазерного излучения (100 %);
- 4) *легированная сталь марки 12Х18Н10Т, имеющая поверхностное окисление.* Для нарезания образцов прямоугольной формы с площадью поверхности

270 см<sup>2</sup> выбрали листовую прокат из стали толщиной 2 мм, покрытый тонким слоем поверхностного окисления;

- 5) *легированная сталь марки 12Х18Н10Т, имеющая поверхностные отложения.* Для нарезания образцов выбрали две единицы листового проката, использовавшихся в качестве составных частей аппаратов толщиной 4 и 8 мм, имеющих сварные швы. Площади поверхностей исследованных образцов варьировались от 170 до 220 см<sup>2</sup>;
- 6) *цветные металлы (Al марки АМг2 и Cu марки М1),* имеющие поверхностные окисления. Из листов вырезали образцы прямоугольной формы с площадью поверхности 270 см<sup>2</sup>.

Результаты проведенных исследований по лазерной дезактивации указанных образцов металлических материалов, загрязненных РВ, приведены на рис. 7.

Из данных, приведенных на рис. 7, следует:

- 1) лазерная дезактивация позволяет очистить образцы из легированной стали с уровнем  $\alpha$ -загрязнения 20–40 част./((мин·см<sup>2</sup>)) и  $\beta$ -загрязнения 90–100 част./((мин·см<sup>2</sup>)) до допустимых по МУК 2.6.1.1087-02 норм за 1 проход. Однако при дезактивации образцов с уровнем  $\beta$ -загрязнения более 600 част./((мин·см<sup>2</sup>)) не удается дезактивировать металл до допустимых норм по радиоактивному загрязнению. При этом после 3–5 проходов устанавливается постоянная величина по  $\alpha$ - и  $\beta$ -загрязнениям. Образцы с уровнем  $\beta$ -загрязнения порядка 600–4000 част./((мин·см<sup>2</sup>)) дезактивируются до 300–350 част./((мин·см<sup>2</sup>)). Недостаточная степень дезактивации образцов с высоким уровнем  $\beta$ -загрязнения связана с высокой отражающей способностью лазерного луча от поверхности легированной стали, видимо, поэтому в порах остается остаточное радиоактивное загрязнение. Следует отметить, что использование дополнительной химической дезактивации этих поверхностей раствором 6 % серной кислоты при температуре (60±5) °С в течение 4 часов позволило растворить слой образовавшейся после лазерной обработки окислы и удалить вместе с ним остаточное радиоактивное загрязнение;
- 2) при дезактивации образцов из цветных металлов (алюминий, медь) происходит полное удаление оксидной пленки и их очистка от радионуклидов до допустимых норм за 1–3 прохода лазерного луча;
- 3) при обработке образцов из углеродистой стали с коррозионными отложениями не удается дезактивировать металл до допустимых норм, так как наблюдается образование окислы на поверхности металла, которая, видимо, не полностью удаляется лазерным лучом. При этом установили, что уровень не снимаемого загрязнения напрямую зависит от начального уровня загрязнения образца;
- 4) при дезактивации образцов из стали с ЛКП вместе с краской также удаляются радиоактивные частицы, при этом установили, что чем толще слой краски,

тем большее количество проходов лазерной обработки необходимо для его удаления с поверхности;  
 5) лазерная обработка образцов металлов с отработавшим маслом оставляет на локальных участках продукты коррозии, которые имеют радиоактивное загрязнение;

б) лазерная обработка малоэффективна при дезактивации сварных швов. Основная часть  $\alpha$ -,  $\beta$ -активности после дезактивации остается именно в сварных швах.

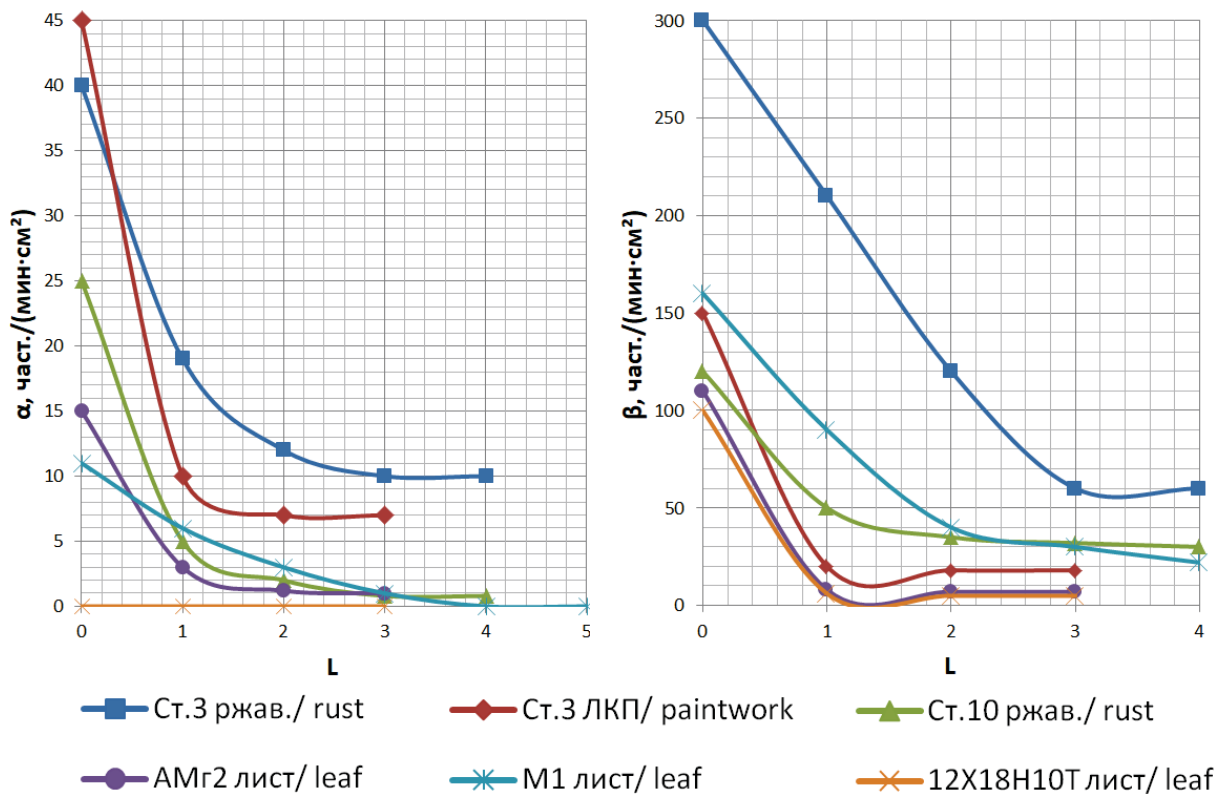


Рис. 7. Зависимости плотности  $\alpha$ - и  $\beta$ -излучений от металлических образцов из различных материалов от числа проходов лазерной обработки

Fig. 7. Dependences of the density of  $\alpha$ - and  $\beta$ -radiations from metal samples from various materials on the number of laser processing passes

На рис. 8 представлены структуры поверхности исследуемых образцов из стали 12Х18Н10Т до и после лазерной обработки, снятые при помощи фотоаппарата, оптического стереомикроскопа и электронного микроскопа.

Из фотоснимков видно, что поверхности образцов из легированной стали марки 12Х18Н10Т до и после лазерной обработки мало различаются (рис. 8, а, б). На поверхности исходного образца видны сетки зерновой структуры металла размерами от 1 до 10 мкм (рис. 8, а). После обработки на поверхности наблюдается цвет побежалости металла, характерный для оксидной пленки железа (рис. 8, б).

Характер покрытия поверхности по результатам оптической и сканирующей электронной микроскопии мало изменился, поверхность после обработки не стала более гладкой (рис. 8, б–е). Морфология поверхности мало изменилась (рис. 8, з–е), но, судя по всему, с неё был удален очень тонкий аморфный слой оксидов.

На рис. 9 представлены структуры поверхности исследуемых образцов из Ст. 10 до и после лазерной обработки, снятые при помощи фотоаппарата, опти-

ческого стереомикроскопа и электронного микроскопа.

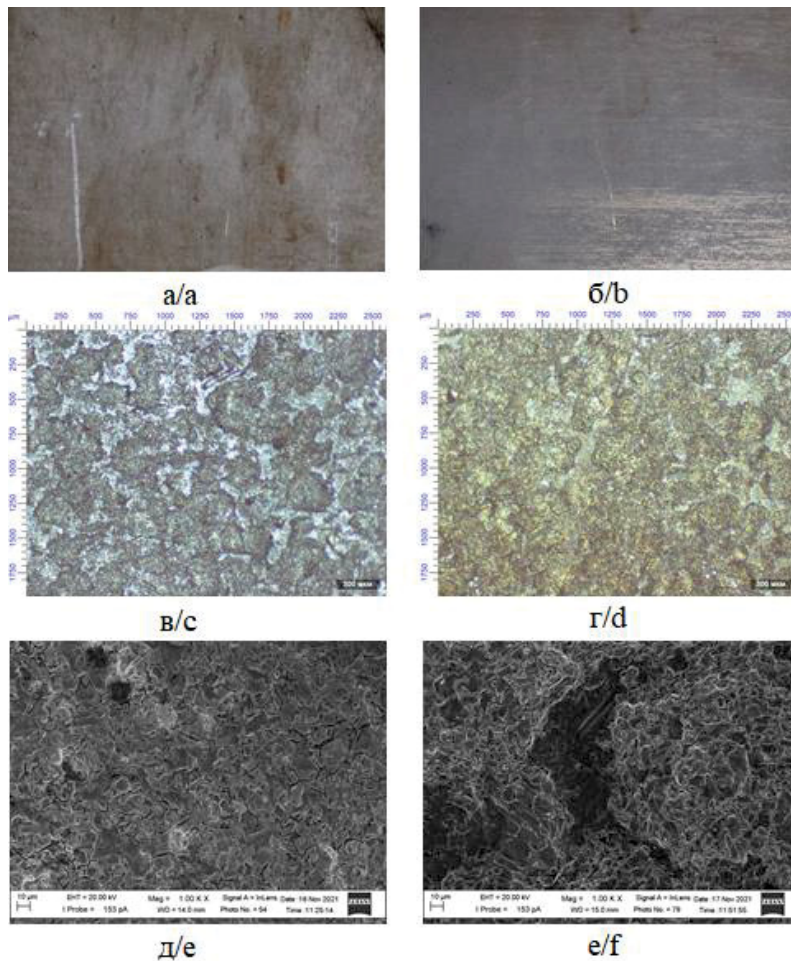
На большей части поверхности образца Ст. 10 наблюдаются следы пигментной коррозии коричневого цвета (рис. 9, а, в). После лазерной обработки на поверхности образца следы коррозии присутствуют в незначительном количестве, в основном наблюдается слой «окалины» и участки серебристо-белого цвета, характерные для металла (рис. 9, б, г).

Изменения морфологии поверхности образца из Ст. 10 после обработки выражены более явно: исходный образец практически полностью покрыт оксидными формами (рис. 9, д), после обработки поверхность приобретает гладкий вид (рис. 9, е). Проявляется внутренняя структура поверхностного слоя без заплывания пространства между агломератами (рис. 9, е). На поверхности исходного образца, кроме сетчатой структуры, слоя оксида железа, присутствуют частицы с размерами от 2 до 10 мкм различных форм (рис. 9, д). Посторонние частицы на поверхности образца после обработки отсутствуют.

После обработки наблюдается ярко выраженная структура металла со следами термического воздей-

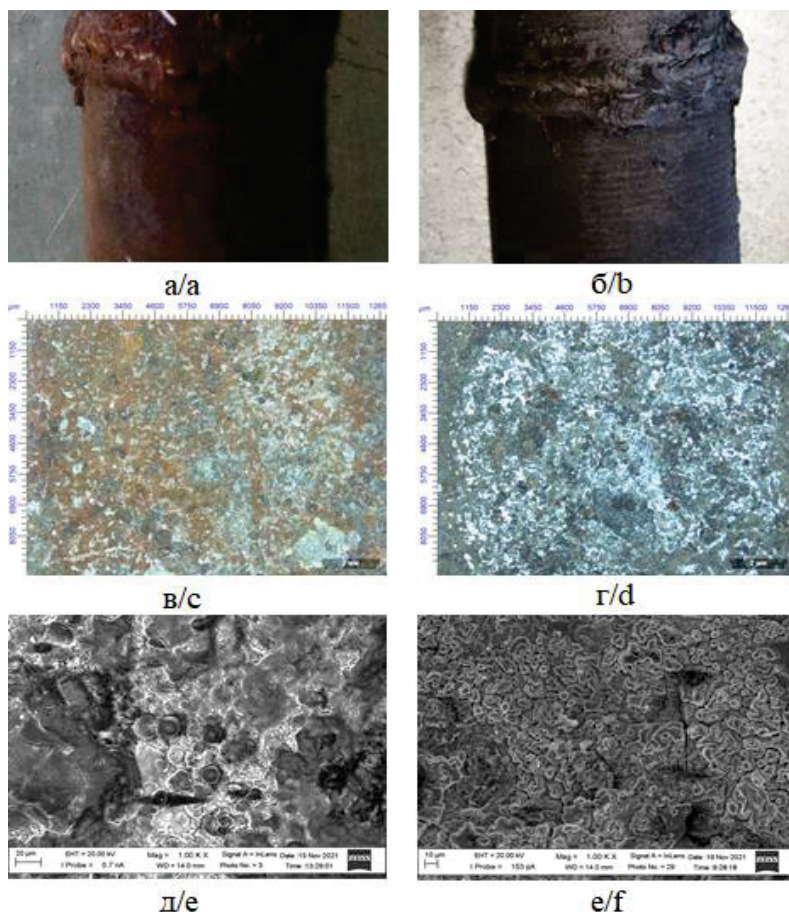
ствия (округлые края зерна). Микротрещины на поверхности после обработки остаются открытыми, что уменьшает вероятность заплывания радиоактивных

загрязнений на этих труднодоступных для дезактивации участках (рис. 9, в–е).



**Рис. 8.** Результаты обработки поверхности образца из стали 12X18H10T: а, б) общий вид образца до и после обработки; в, г) оптическая микроскопия до и после обработки; д, е) электронная микроскопия до и после обработки

**Fig. 8.** Results of processing the surface of the sample from steel 12X18H10T: a, b) general view of the sample before and after processing; c, d) optical microscopy before and after treatment; e, f) electron microscopy before and after treatment



**Рис. 9.** Результаты обработки поверхности образца из Ст. 10: а, б) общий вид образца до и после обработки; в, г) оптическая микроскопия до и после обработки; д, е) электронная микроскопия до и после обработки

**Fig. 9.** Results of processing the surface of the sample from St. 10: a, b) general view of the sample before and after processing; c, d) optical microscopy before and after treatment; e, f) electron microscopy before and after treatment

#### Заключение

Приведены результаты исследования процесса лазерной очистки поверхностей различных металлов (Ст. 3, Ст. 10, легированная сталь 12X18H10T, алюминий АМг2 и медь М1) от нерадиоактивных (продукты коррозии, лакокрасочного покрытия, смазки) и радиоактивных (дезактивация) загрязнений. При очистке образцов от нерадиоактивных загрязнений определили оптимальные параметры:

- мощность лазерного луча (P) 100 %;
- частота лазерного излучения ( $\omega$ ) 5 кГц;
- скорость позиционирования лазерного луча (N) 1 м/с;
- ширина обработки (H) 100 мм;
- скорость перемещения манипулятора в диапазоне от 1 до 2,5 см/с.

При исследованиях по лазерной дезактивации поверхностей образцов указанных металлов от радиа-

ционных загрязнений на установке HTF CLEAN 500 показано:

- установка эффективна для дезактивации сталей, цветных металлов, которые имеют уровень радиоактивного загрязнения не более 40 част./ $(\text{мин} \cdot \text{см}^2)$  по  $\alpha$ -частицам и не более 360 част./ $(\text{мин} \cdot \text{см}^2)$  по  $\beta$ -частицам. При этом металл очищается от радионуклидов до требований МУК 2.6.1.1087-02, т. е. является незагрязнённым и его приравнивают к металлическому лому;
- для проведения полной дезактивации материалов с более высоким уровнем загрязнений требуется проведение дополнительных исследований, видимо, на лазерных установках большей мощности;
- лазерная обработка позволяет очистить поверхности металлов как от ЛКП, смазок, продуктов коррозии, так и от радиоактивных загрязнений. При этом чем толще слой загрязнений, тем большее количество проходов необходимо для их удаления (более 2–3).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мутин Т.Ю. Лазерная дезактивация металлических поверхностей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб, 2012. – 101 с.
2. Оспенникова О.Г., Козлова А.А., Козлов И.А. Лазерные технологии для удаления лакокрасочных покрытий в процессе ремонта и обслуживания авиационной техники // Труды ВИАМ. – 2021. – № 4. – С. 110–123.
3. Кулагина Т.А., Шеленкова В.В. Методы обезвреживания загрязнений поверхностей // Журнал СФУ. – 2017. – Т. 10. – № 3. – С. 352–366.
4. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюрлов А.И. Технологические процессы лазерной обработки. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 664 с.
5. Лазерная очистка в машиностроении и приборостроении / В.П. Вейко, В.Н. Смирнов, А.М. Чирков, Е.А. Шахно. – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 103 с.
6. Роботизированная лазерная влажная очистка тонкостенных конструкций / Ю.Н. Кульчин, Н.Ю. Анисимов, А.А. Ионов, Д.С. Пивоваров, Е.А. Шарова, А.И. Никитин // Вестник ДВО РАН. – 2021. – № 4. – С. 30–39.

7. Кульчин Ю.Н., Никитин А.И., Субботин Е.П. Лазерная под-водная очистка корпусов морских судов // Прикладная фото-ника. – 2020. – № 4. – С. 90–104.
8. О возможности спектроскопического контроля процесса ла-зерной очистки / В.П. Вейко, С.А. Волков, Т.Ю. Мутин, В.Н. Смирнов // Известия ВУЗов. Приборостроение, темати-ческий выпуск «Лазерные технологии в приборостроении». – 2001. – Т. 54. – № 2. – С. 65–68.
9. Lu Y.F., Song W.D., Low T.C. Laser cleaning of micro-particles from a solid surface – theory and applications // Materials Chemistry and Physics. – 1998. – V. 54. – № 2. – P. 181–185.
10. Вейко В.П., Шахно Е.А. Индуцированное лазером локальное осаждение тонких пленок // Оптический журнал. – 1998. – Т. 65. – № 10. – С. 107–110.
11. Pasquet P., DelCoso R., Boneberg J. Laser cleaning of oxide iron layer: efficiency enhancement due to electrochemical induced absorptivity change // Applied Physics A. –1999. – V. 69. – № 6. – P. 727–730.
12. Dry laser cleaning of anodised aluminium / P. Meja, M. Autric, P. Delaporte, P. Alloncle // Applied Physics A. –1999. – V. 69. – № 6. – P. 121–128.
13. Вейко В.П., Шахно Е.А. Физические механизмы лазерной очистки поверхности // Известия РАН. – 2001. – Т. 65. – № 4. – С. 584–587.
14. Лазерная очистка и дезактивация поверхностей металлов: фи-зические процессы и применение / В.П. Вейко, Т.Ю. Мутин, В.Н. Смирнов, Г.Д. Никишин, Е.А. Шахно // Журнал Лазер-Информ. – 2008. – № 1. – С. 8–16.
15. Delaporte Ph., Gastaud M., Marine W. Dry excimer laser cleaning applied to nuclear decontamination // Applied Surface Science. – 2003. – V. 208. – P. 298–305.
16. Brygo F., Dutouquet Ch. Laser fluence, repetition rate and pulse duration effects on paint ablation // Applied Surface Science. – 2006. – V. 252. – № 6. – P. 2131–2138.
17. A comparison of ns and ps steam laser cleaning of Si surfaces / M. Mosbacher, N. Chaoui, J. Siegel et al. // Applied Physics A. – 1999. – V. 69. – P. 331–334.
18. Optical reflectance and scattering studies of nucléation and growth of bubbles at liquid-solid interface induced by pulsed laser heating / O. Yavas, P. Leiderer, H.K. Park et al. // Physical Review Letters. – 1993. – V. 70. – № 12. – P. 1830–1833.
19. Removal of paint layer by layer using a 20 kHz 140 ns qua-sicontinuous wave laser / Z. Zhanga, J. Zhang, Y. Wang et al. // Optik. – 2018. – V. 174. – P. 46–55.
20. Проскураков В.И., Ширин С.С., Бородин С.А., Лазерная мо-дификация поверхности стали 12Х18Н10Т порошком TiO<sub>2</sub> // Вестник СГТУ. – 2020. – № 1. – С. 81–86.

Поступила 29.06.2022 г.

Прошла рецензирование 22.09.2022 г.

#### Информация об авторах

**Софронов В.Л.**, доктор технических наук, профессор кафедры химии и технологии материалов современной энергетики Северского технологического института – филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

**Карташов Е.Ю.**, кандидат технических наук, заведующий кафедрой машин и аппаратов химических и атом-ных производств Северского технологического института – филиала Национального исследовательского ядер-ного университета «МИФИ».

**Ткачук С.А.**, преподаватель кафедры машин и аппаратов химических и атомных производств Северского тех-нологического института – филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

**Пак А.Д.**, аспирант кафедры химии и технологии материалов современной энергетики Северского технологи-ческого института – филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

**Тинин В.В.**, кандидат технических наук, технический директор АО «Сибирский химический комбинат».

**Галата А.А.**, заместитель генерального директора АО «Сибирский химический комбинат» по выводу из экс-плуатации и приоритетным направлениям деятельности.

UDC 621.039.75

## RESEARCH ON LASER DEACTIVATION CLEANING OF METAL SURFACES CONTAMINATED WITH RADIOACTIVE MATERIALS

Vladimir L. Sofronov<sup>1</sup>,  
vlsofronov@mephi.ru

Evgeniy U. Kartashov<sup>1</sup>,  
kart.62@yandex.ru

Semen A. Tkachuk<sup>1</sup>,  
semenaleksandroviht@gmail.com

Alexander D. Pak<sup>1</sup>,  
AIDPak@rosatom.ru

Vasiliy V. Tinin<sup>2</sup>,  
shk@atomsib.ru

Andrey A. Galata<sup>2</sup>,  
shk@atomsib.ru

<sup>1</sup> Seversk Technological Institute – branch of the National Research Nuclear University «MEPhI»,  
65, Kommunistichesky avenue, Seversk, 636036, Russia.

<sup>2</sup> Seversk Chemical Combine,  
1, Kurchatov street, Seversk, 636039, Russia.

**The relevance** of the study is caused by the need to find a new, more efficient method for decontamination of large volumes of metal waste contaminated with radioactive substances. The accumulation of this type of waste is associated with the production and subsequent reduction of nuclear warheads, the dismantling of nuclear industry facilities and the non-nuclear sector that have exhausted their resources. **Purpose:** to conduct research on the deactivation cleaning of metal surfaces contaminated with radioactive materials using a mobile laser unit of a modular type.

**Objects:** systems consisting of samples of various metals and related layers of coatings of various morphologies (corrosion layer, paint coating, lubricants) contaminated with radioactive substances, as well as laser radiation.

**Methods:** laser deactivation (installation «HTF Clean 500»), radiometric analysis (MKS-01A «MULTIRAD» and MKS-AT-1117M), optical microscopy (Micromed Polar Nikon SMZ745T), photofixation (Sony α-6000), scanning electron microscopy (Carl Zeiss Sigma), grinding and cutting tools, electronic scales (SPV-60), linear measuring tool.

**Results.** The authors developed the techniques for conducting research of laser deactivation of metal surfaces contaminated with radioactive substances and dosimetric studies of metal surface samples before and after their laser treatment. The optimal parameters of laser decontamination of surfaces of various morphology and composition were determined; graphs of dependences of the degree of removed contamination of various morphology and composition on the number of laser decontamination passes are plotted; conclusions are made about the expediency of applying the laser cleaning method for processing metals containing radioactive substances on the surface, and recommendations are given on laser deactivation for various metal waste contaminated with radioactive substances.

### Key words:

radiation, decontamination, surface, laser decontamination installation, degree of purification, radioactive contamination, contaminated surfaces.

### REFERENCES

- Mutin T.Yu. *Lazernaya dezaktivatsia metalicheskikh poverkhnostey*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Laser decontamination of metal surfaces. Cand. Diss. Abstract]. St. Petersburg, 2012. 101 p.
- Ospennikova O.G., Kozlova A.A., Kozlov I.A. Laser technologies for the removal of paint and varnish coatings in the process of repair and maintenance of aviation equipment. *Proceedings of VIAM*, 2021, no. 4, pp. 110–123. In Rus.
- Kulagina T.A., Shelenkova V.V. Methods for the neutralization of surface contamination. *Journal of Siberian Federal University*, 2017, vol. 10, no. 3, pp. 352–366. In Rus.
- Grigoryants A.G., Shiganov I.N., Misyurov A.I. *Tekhnologicheskie protsessy lazernoy obrabotki* [Technological processes of laser processing]. Moscow, MSTU im. N.E. Bauman Publ. house, 2006. 664 p.
- Veiko V.P., Smirnov V.N., Chirkov A.M., Shakhno E.A. *Lazernaya ochistka v mashinostroenii i priborostroenii* [Laser cleaning in mechanical engineering and instrument making]. St. Petersburg, NRU ITMO Publ., 2013. 103 p.
- Kulchin Yu.N., Anisimov N.Yu., Ionov A.A., Pivovarov D.S., Sharova E.A., Nikitin A.I. Robotic laser wet cleaning of thin-walled structures. *Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2021, no. 4, pp. 30–39. In Rus.
- Kulchin Yu.N., Nikitin A.I., Subbotin E.P. Laser underwater cleaning of marine hulls. *Applied Photonics*, 2020, no. 4, pp. 90–104. In Rus.
- Veiko V.P., Volkov S.A., Mutin T.Yu., Smirnov V.N. On the possibility of spectroscopic control of the laser cleaning process. *Bulletin of the University. Instrumentation, thematic issue «Laser technologies in instrumentation»*, 2001, vol. 54, no. 2, pp. 65–68. In Rus.
- Lu Y.F., Song W.D., T.C. Low. Laser cleaning of micro-particles from a solid surface – theory and applications. *Materials Chemistry and Physics*, 1998, vol. 54, no. 2, pp. 181–185.
- Veiko V.P., Shakhno E.A. Laser-induced local deposition of thin films. *Optical journal*, 1998, vol. 65, no. 10, pp. 107–110. In Rus.

11. Pasquet P., DelCoso R., Boneberg J. Laser cleaning of oxide iron layer: efficiency enhancement due to electrochemical induced absorptivity change. *Applied Physics A*, 1999, vol. 69, no. 6, pp. 727–730.
12. Meja P., Autric M., Delaporte P., Alloncle P. Dry laser cleaning of anodised aluminium. *Applied Physics A*, 1999, vol. 69, no. 6, pp. 121–128.
13. Veiko V.P., Shakhno E.A. Physical mechanisms of laser surface cleaning. *Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2001, vol. 65, no. 4, pp. 584–587. In Rus.
14. Veiko V.P., Mutin T.Yu., Smimov V.N., Nikishin G.D., Shakhno E.A. Laser cleaning and decontamination of metal surfaces: physical processes and applications. *Journal of Laser-Inform*, 2008, no. 1, pp. 8–16. In Rus.
15. Delaporte Ph., Gastaud M., Marine W. Dry excimer laser cleaning applied to nuclear decontamination. *Applied Surface Science*, 2003, vol. 208, pp. 298–305.
16. Brygo F., Dutouquet Ch. Laser fluence, repetition rate and pulse duration effects on paint ablation. *Applied Surface Science*, 2006, vol. 252, no. 6, pp. 2131–2138.
17. Mosbacher M., Chaoui N., Siegel J. A comparison of ns and ps steam laser cleaning of Si surfaces. *Applied Physics A*, 1999, vol. 69, pp. 331–334.
18. Yavas O., Leiderer P., Park H.K. Optical reflectance and scattering studies of nucléation and growth of bubbles at liquid-solid interface induced by pulsed laser heating. *Physical Review Letters*, 1993, vol. 70, no. 12, pp. 1830–1833.
19. Zhanga Z., Zhang J., Wang Y. Removal of paint layer by layer using a 20 kHz 140 ns qua-sicontinuous wave laser. *Optik*, 2018, vol. 174, pp. 46–55.
20. Proskuryakov V.I., Shirin S.S., Borodina S.A., Laser modification of the surface of 12X18H10T steel with TiO<sub>2</sub> powder. *Bulletin of the SGTU*, 2020, no. 1, pp. 81–86.

Received: 29 June 2022.

Reviewed: 22 September 2022.

#### Information about the authors

**Vladimir L. Sofronov**, Dr. Sc., professor, Seversk Technological Institute – branch of the National Research Nuclear University «MEPhI».

**Evgeniy U. Kartashov**, Cand Sc., head of the Department of Machines and Apparatuses for Chemical and Nuclear Production, Seversk Technological Institute – branch of the National Research Nuclear University «MEPhI».

**Semen A. Tkachuk**, lecturer, Seversk Technological Institute – branch of the National Research Nuclear University «MEPhI».

**Alexander D. Pak**, postgraduate student, Seversk Technological Institute – branch of the National Research Nuclear University «MEPhI».

**Vasilij V. Tinin**, Cand Sc., technical director, JSC «Siberian Chemical Combine».

**Andrey A. Galata**, deputy general director for decommissioning and priority areas of activity, JSC «Siberian Chemical Combine».

УДК 622.831:537.531

## РАСЧЕТНАЯ И АППАРАТУРНАЯ БАЗА ГЕОМОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ МАССИВА МЕТОДОМ РЕГИСТРАЦИИ ЕСТЕСТВЕННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

**Простов Сергей Михайлович<sup>1</sup>,**  
psm.kem@mail.ru

**Разумов Егор Евгеньевич<sup>2</sup>,**  
razumov@vnimi.ru

**Мулев Сергей Николаевич<sup>2</sup>,**  
smuleva@yandex.ru

**Шабанов Евгений Анатольевич<sup>1</sup>,**  
evgenshab@mail.ru

<sup>1</sup> Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева,  
Россия, 650002, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28.

<sup>2</sup> Акционерное Общество «Научно-исследовательский институт горной геомеханики маркшейдерского дела –  
межотраслевой научный центр ВНИМИ»,  
Россия, 650002, г. Кемерово, ул. Сосновый бор, 1.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью разработки перспективного метода прогноза удароопасности массива по параметрам естественного электромагнитного излучения, возникающего при трещинообразовании в горных породах. Существующие методики интерпретации данных геофизического мониторинга не учитывают связи параметров электромагнитного излучения с основными геомеханическими критериями, определяющими вероятность проявления горного удара: концентрацией напряжений в массиве и расположением их максимума.

**Цель:** установление рациональных параметров для дальнейшего экспериментального обоснования критериев локального прогноза удароопасности методом регистрации электромагнитного излучения на базе экспериментальной аппаратуры «Ангел-М», разработанной в МНЦ ВНИМИ.

**Объекты:** массивы горных пород, склонных к динамическим проявлениям горного давления на горнодобывающих предприятиях Кузбасса (шахта «Таштагольская», глубина 700 м; шахта «Зиминка», глубина 300 м; шахта № 12, глубина 340 м).

**Методы:** анализ физических механизмов электризации пород в поле механических напряжений на основе фундаментальных закономерностей физики твердого тела и электродинамики, экспериментально-теоретические основы метода регистрации электромагнитного излучения в лабораторных и природных условиях.

**Результаты.** Рассмотрены физические предпосылки возникновения электромагнитного излучения при разрушении твердых тел и горных пород, основные теоретические и экспериментальные результаты, полученные в данной области ведущими научными коллективами. Изложена методика расчета амплитудно-частотной характеристики электромагнитного излучения при трещинообразовании в горных породах, включающая решение волнового уравнения, прямое и обратное преобразование Фурье, эффекты суперпозиции систем трещин и затухания электромагнитного излучения в проводящей среде. Обоснован перспективный метод прогноза удароопасности массива методом регистрации электромагнитного излучения на основе комплексных критериев, косвенно взаимосвязанных с фундаментальными геомеханическими параметрами массива (концентрация напряжений в точке их максимума и расстоянием от контура до этой точки): средняя амплитуда импульсов за интервал регистрации и крутизна графика скорости нарастания импульсов.

### **Ключевые слова:**

Геофизический прогноз, электромагнитное излучение, разрушение горных пород, возмущение естественных электрических полей, волновое уравнение, преобразования Фурье, амплитудно-частотная характеристика, аппаратный комплекс, прогноз удароопасности, комплексный критерий.

### **Введение**

Возникновение импульсного электромагнитного излучения (ЭМИ) при трещинообразовании в горных породах связано с электродинамическими процессами в очаге разрушения. Принципиально различают две гипотезы механизма радиоизлучения: непосредственное преобразование механической энергии разрушения пород с кристаллической структурой в энергию электромагнитного поля [1–5]; возмущение постоянно действующих электрических полей при скачкообразных изменениях электрофизических свойств разрушающегося материала [6–8].

Рассмотрим более подробно данные концепции.

Причиной заряжения берегов трещин раскалывающегося кристалла является то, что заряженные дислокации, перемещаясь в несимметричном поле напряжений близи вершины трещины, выводят на ее берега противоположные заряды. При образовании микротрещин и развитии магистральной трещины происходит формирование электрического поля с напряженностью, достаточной для электрического разряда в ее устье, и появление токов компенсации, огибающих вершину трещины. Единичный электромагнитный импульс представляет собой продукт суперпозиции массы распределенных в разрушающемся



объеме и перемещающихся точечных импульсных источников волн [1, 2]. В горных породах из-за обилия неоднородностей рассмотренный эффект выражен слабее, чем в монокристаллах [3].

В работах [4, 5] приведен расчет параметров радиоизлучения горных пород. Задав частотный спектр импульсного сигнала, авторы с учетом ослабления поля в ближней и дальней зонах, среднего числа излучающих пор в единичном объеме породы получили зависимость напряженности электрической составляющей сигнала от пористости, максимальной напряженности поля заряженной трещины, частоты, размера очага. Численная проверка формулы дает следующие результаты: максимальный уровень сигнала может составить  $10^3$  В/м, что наблюдается при сильных сейсмических явлениях, минимальный уровень  $10^{-9}$  В/м соответствует фоновому излучению, средний уровень составляет  $10^{-3}$  В/м.

Вторая концепция теории ЭМИ предполагает существование в массиве постоянно действующих электрических полей, источниками которых могут быть: электризация пород под воздействием естественной радиации, наличие градиентов температур и давлений в земных недрах, естественные стационарные электрические поля химического происхождения и теллурические токи.

В работе [6] рассмотрено изменение напряженности магнитного поля за счет изменения плотности естественного электрического тока при линейных и нелинейных деформациях участка земной коры, сопровождающих прохождение сейсмической волны. Изменение напряжений может составлять десятки процентов, откуда амплитуда магнитных колебаний будет иметь порядок  $10^{-3}$ – $10^{-2}$  А/м. Напряженность поля фильтрации может резко изменяться при разрушении горных пород и скачкообразном падении давления [7]. Напряженность электрического поля импульсного сигнала при этом может составить не менее  $10^{-3}$ – $10^{-5}$  В/м.

На основании анализа физических механизмов электризации пород в поле механических напряжений сделан вывод о том, что в горных породах поля, близкие по интенсивности к регистрируемым, могут быть связаны только с формированием линий скольжения дислокаций и скачкообразным распространением трещин. Анализ спектра электромагнитного излучения показал, что основная доля частот находится в диапазоне  $10^1$ – $10^7$  Гц, причем верхняя граница определяется временем релаксации зарядов на берегах трещин [8].

Проведен ряд экспериментальных исследований в зарубежных лабораториях, направленных на выявление электромагнитных предвестников землетрясений [9–11].

Экспериментально-теоретические основы метода регистрации ЭМИ для контроля геомеханического состояния массива горных пород и прогноза опасных геодинамических явлений развивались несколькими научными школами. Наиболее существенные научно-практические результаты получены в КузГТУ (КузПИ) и ИГД СО РАН.

В КузГТУ разработана статистическая теория эмиссионных процессов в напряженных твердых телах и горных породах, в основу которой положены фундаментальные положения кинетической концепции прочности и закономерности терморазрушающих флуктуаций в твердом теле. В результате рассмотрения образования микротрещины как случайного и независимого события сделано предположение, что процесс трещинообразования подчиняется пуассоновскому закону распределения вероятностей. На этой основе получены зависимости средней скорости генерации импульсов от приложенных напряжений для стадий делокализованного и самоускоряющегося развития микротрещин. Из системы уравнений электродинамики получены уравнения для векторного и скалярного потенциалов электромагнитного поля из произвольного объема тела. Для движущейся трещины получена теоретическая форма импульса ЭМИ, которая подтверждена экспериментально на лабораторной установке. Разработаны статистические модели процессов разрушения образцов горных пород, включающие генерацию псевдослучайных чисел и позволяющие прогнозировать момент перехода к стадии разрушения и ресурс долговечности [12, 13].

В работе [14] экспериментально при нагружении образцов скальных горных пород установлены линейные статистически значимые зависимости между регистрируемым числом электромагнитных и световых импульсов, а также между средними значениями числа импульсов обоих типов и стандартными отклонениями. Для образцов песчаника экспериментально подтверждена возможность прогноза усталостной прочности (количества циклов нагружения до разрушения) с погрешностью 1–1,5 %, при этом кинетические константы, входящие в расчетные уравнения, предложено определять методом наименьших квадратов [15]. Для искусственных образцов неоднородной структуры установлено увеличение скорости микротрещинообразования с увеличением размера зерна [16], при этом скорость развития микротрещины оценивалась по длительности фронта нарастания импульса ЭМИ [17]. Цикл лабораторных исследований был направлен на установление наиболее информативных характеристик ЭМИ. Так, в работе [18] получено, что у скальных пород (гранодиорит) при разрешении 20 нс регистрируется 30–35 тыс. импульсов малой амплитуды практически равномерно в процессе деформирования, а при разрешении 10 мкс – не более 1 тыс. импульсов большой амплитуды при нагрузке, составляющей 0,6–0,7 от разрушающей. У осадочных пород (мраморизованный доломит) импульсы ЭМИ регистрируются во всем диапазоне нагружения, причем по их числу достаточно четко выделяются 4 стадии образования микротрещин [19].

В работах [20, 21] предложено использовать автокорреляционную функцию числа импульсов от времени (циклов нагружения), переход которой к отрицательным значениям соответствует началу интенсификации процесса образования микротрещин, и показатель нормированного размаха Херста, изменение угла наклона графика которого соответствует перехо-

ду к стадии, непосредственно предшествующей разрушению.

В Институте горного дела СО РАН исследования ЭМИ твердых тел и горных пород проводятся более 20 лет. Предложена статистическая модель возникновения сигналов ЭМИ с использованием методов максимальных инвариантов для групп преобразований, описывающих априорную неопределенность в задачах обнаружения сигналов. Для регистрации и анализа сигналов ЭМИ в лабораторных условиях разработана специализированная автоматизированная система измерений (АСИ), включающая устройство нагружения, датчики ЭМИ, систему записи и анализа полученной информации. Ядром системы является четырехканальный АЦП с частотой дискретизации 1 МГц, на выходе которого в реальном масштабе времени информация выдается в виде осциллограмм с последующим их представлением в виде спектрально-временных матриц, анализ которых позволяет для каждого типа испытываемых горных пород и других материалов строить специальные S-диаграммы, описывающие разрушение как процесс, включающий ряд стадий. Проведен комплекс натурных исследований ЭМИ в условиях рудников и угольных шахт. Разработаны методики проведения исследований с использованием приборов РЭМИ 1 и РЭМИ 2, выполнены работы по их опробованию в натурных условиях. Выполнен сравнительный анализ импульсного излучения ЭМИ в условиях шахт и рудников и ЭМИ-излучения, регистрируемого при нагружении образцов в лабораторных условиях. Установлено, что результаты этих измерений коррелируют между собой. Выполнены исследования параметров ЭМИ в натурных условиях при статических полях напряжений в массиве горных пород (шахта «Таштагольская», глубина 700 м; шахта «Зиминка», глубина 300 м и шахта № 12, глубина 340 м). Результаты подтвердили ранее установленные экспериментальные результаты об эффекте постоянства интенсивности потока ЭМИ в условиях статических полей напряжений в массиве горных пород [22, 23].

Одним из наиболее существенных научно-практических результатов проведенных исследований является введение коэффициента механо-электромагнитных преобразований  $M$ , представляющего собой отношение энергии ЭМИ к потенциальной механической энергии нагружения образца. На специальном стенде с помощью магнитной и токовой антенн в диапазоне частот 70 Гц – 20 кГц получены экспериментальные значения коэффициента  $M$ , которые составили от  $0,00209 \cdot 10^{-16}$  для мелкообломочных туфов до  $129,2 \cdot 10^{-16}$  для мелкозернистых кварцитов. Предложено использовать  $M$  для оценки склонности пород к хрупкому разрушению [24].

Для комплексных лабораторных исследований разработана и реализована модернизированная система АСИ-2, отличительные особенности которой состоят в следующем [25]: повышено быстродействие регистрации ЭМИ и нагрузки, что способствует уменьшению потерь измерительной информации; для измерения продольных деформаций применены од-

нонаправленные тензорезисторы, наклеиваемые на образец с последующей термообработкой, специальная мостовая схема измерений, экранировка датчика и термостабилизация; усовершенствованно программное обеспечение, позволяющее вести первичную обработку и визуализацию сигнала.

Наиболее технически совершенной является система синхронной регистрации механических и электромагнитных параметров образцов, оснащенная оптическими датчиками перемещений, действие которых основано на модуляции переменного светового потока, датчиков ЭМИ электрического и магнитного типов в виде стержневых магнитных антенн. Цикл исследований на данной установке позволил установить в качестве диагностических критериев разрушения образцов следующие параметры характеристик сигналов ЭМИ [26–28]: максимальное значение длительности импульса; минимальное значение длительности интервала между импульсами.

Изменение характеристик сигнала ЭМИ в процессе добычи продемонстрированы в работах [29, 30]. В работах [31, 32] показано, что интенсивность ЕЭМИ увеличивается при увеличении скорости распространения трещин.

Целью исследования является установление рациональных параметров для дальнейшего экспериментального обоснования критериев локального прогноза удароопасности методом регистрации ЭМИ.

#### Методика исследования

Основой разработки измерительной аппаратуры для регистрации ЭМИ является спектр сигнала ЭМИ. Для теоретической оценки этого спектра при разрушении горных пород целесообразно использовать методику, изложенную в работе [33].

Основные этапы расчета состоят в следующем.

1. Физическая постановка задачи.

Поперечное сечение трещины имеет форму эллипса с полуосями  $2a$  и  $2b$ . Из теории электричества [34] следует, что функция напряженности электрического поля вдоль оси трещины  $x$  при  $a \gg b$  имеет вид (рис. 1):

$$E = \bar{E}_{\infty} \left( \cos \alpha + \frac{x \sin \alpha}{\sqrt{a^2 + x^2}} \right), \quad (1)$$

где  $\bar{E}_{\infty}$  – вектор напряженности внешнего естественного электрического поля (постоянного или стационарного), которое существует практически на любом месторождении;  $\alpha$  – угол между  $\bar{E}_{\infty}$  и осью  $x$ .

При развитии трещины с постоянной скоростью  $U$

$$a = Ut, \quad (2)$$

где  $t$  – время.

Из (1) и (2) следует что  $E = E(x, t)$ , т. е. электрическое поле изменяется в пространстве и во времени, что является физической причиной генерирования электромагнитных колебаний, причем источником этих колебаний можно считать малую область с наибольшим уровнем  $E$ , прилегающую к вершине трещины:

$$x = a - r, \quad (3)$$

где  $r = 10^{-10}$  м имеет порядок радиуса вершины трещины [35].

Из решения волнового уравнения функция модуля вектора электромагнитного потенциала  $\Pi$  точечного источника для дальней (волновой) зоны имеет вид [36]:

$$\Pi(R, t) = \frac{\mu j}{4\pi R} \left( t - \frac{R}{V} \right), \quad (4)$$

где  $\mu$  – абсолютная магнитная проницаемость;  $j$  – плотность тока,  $j = E\lambda$ ;  $\lambda$  – электропроводимость;  $R$  – расстояние от источника излучения;  $V = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$  – скорость электромагнитной волны в среде.

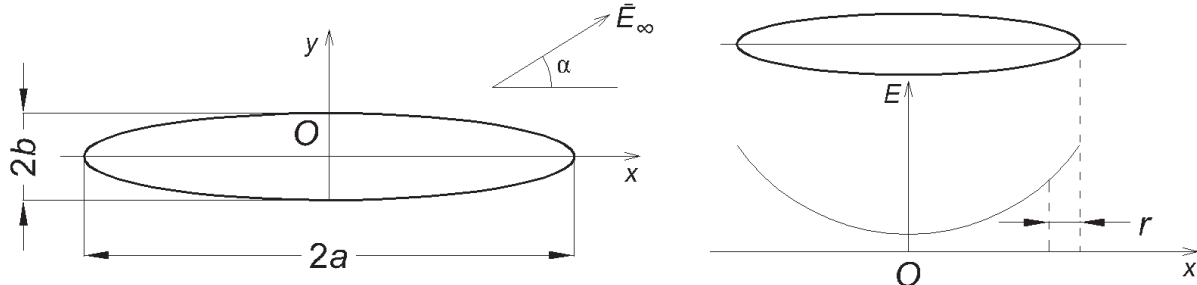


Рис. 1. Расчетные схемы ЭМИ

Fig. 1. Calculation schemes of electromagnetic radiation

С учетом (2) и (3), а также при  $\sin \alpha = 1$ , уравнение (4) примет вид:

$$\Pi(R, t) = \frac{\mu E_{\infty} \lambda}{4\pi R} \sqrt{\frac{U}{2r}} \left( t - \frac{R}{V} \right). \quad (5)$$

Напряженность электрической составляющей электромагнитного поля определяется из уравнения (5) с учетом эффекта суперпозиции, который состоит в том, что при  $n$  одномерно развивающихся в массиве трещинах величина  $E$  возрастает в  $\sqrt{n}$  раз:

$$E' = \frac{\partial \Pi}{\partial t} = \frac{\mu E_{\infty} \lambda}{8\pi R} \sqrt{n} \sqrt{\frac{U}{2r}} \frac{1}{\sqrt{\left(t - \frac{R}{V}\right)}} = \frac{\Phi}{\sqrt{\left(t - \frac{R}{V}\right)}}, \quad (6)$$

где  $\Phi$  – постоянная, зависящая от механических и электрических свойств массива.

По данным [4] величина  $n$  для массива горных пород объемом  $1 \text{ м}^3$  составляет  $10^6$ .

2. Комплексный спектр сигнала может быть получен путем преобразования Фурье при применении метода гармонического анализа:

- в комплексном виде

$$E'(i\omega) = \Phi \left[ e^{-i\omega t} \sqrt{\frac{\pi}{2\omega}} (1 - i) \right]; \quad (7)$$

- для модуля комплексного числа

$$|E'(i\omega)| = \Phi \sqrt{\frac{\pi}{\omega}}, \quad (7')$$

где  $\omega$  – частота гармонической составляющей.

Для получения из уравнений (7), (7') амплитудного спектра сигнала применяется обратное преобразование Фурье:

$$E'(\omega) = \int_{\omega}^{\omega+\Delta\omega} E'(i\omega) e^{i\omega t} d\omega = 2\Phi(\sqrt{\omega + \Delta\omega} - \sqrt{\omega}), \quad (8)$$

где  $\Delta\omega$  – полоса пропускания приемного устройства.

Учитывая, что  $\omega \gg \Delta\omega$  из уравнения (8) следует

$$E'(\omega) \approx 2\Phi \frac{\Delta\omega}{\sqrt{\omega}} \quad (9)$$

Принимая во внимание, что электромагнитный сигнал в проводящей среде затухает за счет скин-

эффекта, окончательно из (9) получается следующее уравнение:

$$\begin{aligned} E''(\omega) &= E'(\omega) \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{\mu\lambda\omega}{2}} R\right) = \\ &= \frac{E_{\infty} \sqrt{n} \cdot \mu\lambda}{8\pi R} \sqrt{\frac{U}{2r}} \frac{\Delta\omega}{\sqrt{\omega}} \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{\mu\lambda\omega}{2}} R\right). \end{aligned} \quad (10)$$

### Результаты

Анализ уравнения (10) позволяет сделать следующие выводы.

Амплитудный спектр сигнала, без учета затухания поля, неравномерный, величина сигнала монотонно снижается с увеличением  $\omega$ . Величина  $E'_0$  при  $\Delta\omega = 10^3$  Гц,  $E_{\infty} = 0,1$  В/м,  $U = 10^3$  м/с,  $\mu = 4\pi \cdot 10^7$  Гн/м вблизи очага разрушения при  $R \rightarrow 0$  может составлять  $E'_0 > 10^2$  В/м (рис. 2).

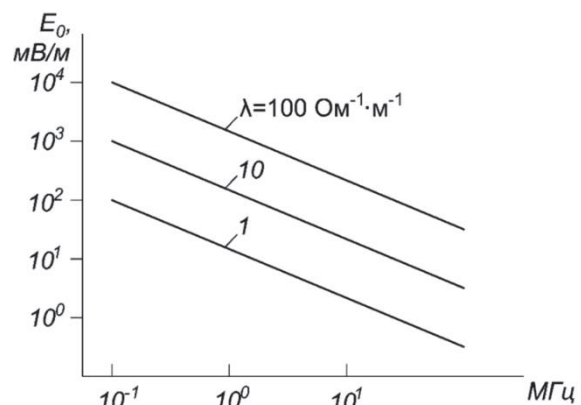
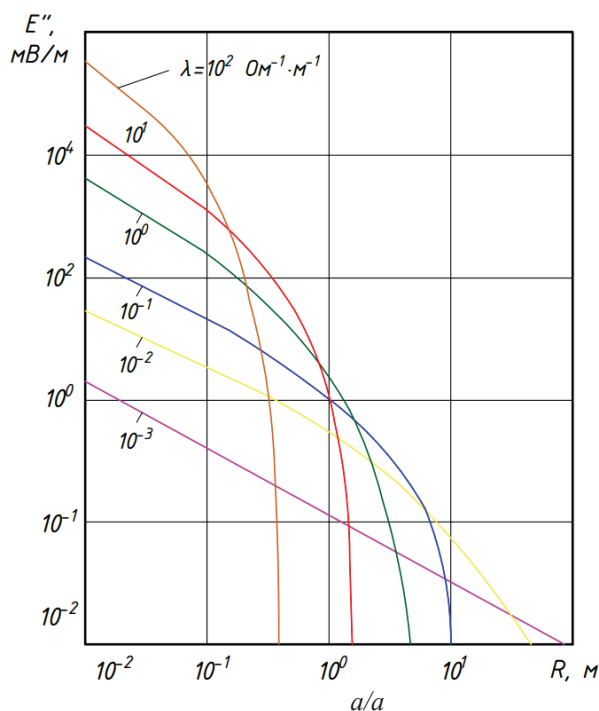


Рис. 2 Амплитудно-частотная характеристика сигнала ЭМИ без учета затухания при  $E_{\infty} = 0,1$  В/м;  $n = 10^6 \text{ м}^{-3}$ ;  $\mu = 4\pi \cdot 10^7$  Гн/м;  $R = 0,1$  м;  $U = 10^3$  м/с;  $\Delta\omega = 10^3$  Гц

Fig. 2. Amplitude-frequency response of the EMR signal without considering attenuation at  $E_{\infty} = 0,1$  V/m;  $n = 10^6 \text{ м}^{-3}$ ;  $\mu = 4\pi \cdot 10^7$  H/m;  $R = 0,1$  m;  $U = 10^3$  m/s;  $\Delta\omega = 10^3$  Hz

В проводящей среде сигнал интенсивно затухает, особенно на высоких частотах (рис. 3).



Для  $R > 1$  м при  $\omega = 0,1$  МГц минимальный уровень сигнала ЭМИ составит  $E''_{\min} < 1$  мВ/м, при  $\omega = 100$  МГц –  $E''_{\min} < 10^{-2}$  мВ/м.

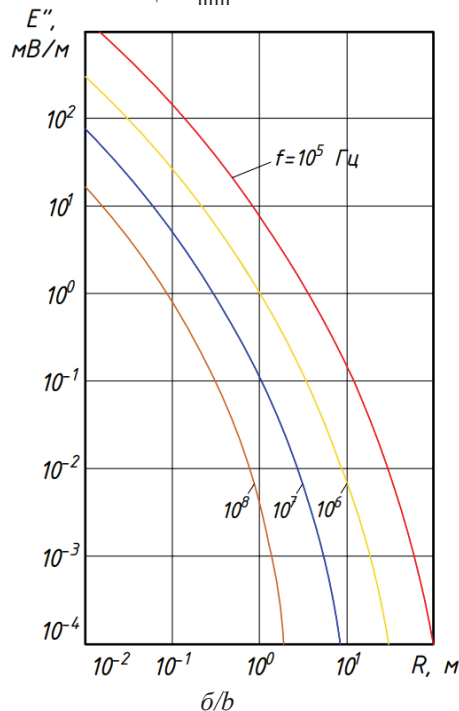


Рис. 3. Зависимости  $E''(R, \lambda)$  при  $f = 1$  МГц (а),  $E''(R, f)$  при  $\lambda = 0,1$  Ом<sup>-1</sup>·м<sup>-1</sup> (б)  
 Fig. 3 Dependencies  $E''(R, \lambda)$  at  $f = 1$  MHz (a),  $E''(R, f)$   $\lambda = 0,1$  Ом<sup>-1</sup>·м<sup>-1</sup> (b)

Основные результаты расчета позволили обосновать конструктивные параметры аппаратуры для регистрации ЭМИ в массиве горных пород: максимальная регистрируемая частота  $f_{\max} = 100$  МГц; чувствительность по напряженности электрической составляющей поля  $E_{\min} = 5$  В/м. Нижнюю границу частотного диапазона принимают из условия максимальной отстройки принимаемого сигнала от помех промышленной частоты.

Одной из первых аппаратных разработок для шахтных исследований является регистратор ЭМИ, функциональная схема которого включает следующие элементы: штыревую антенну, блок высокой частоты; усилитель промежуточной частоты; регулятор уровня чувствительности; аналого-цифровой преобразователь; частотомер; нормализатор амплитуды импульсов; нормализатор длительности импульсов; индикатор [37].

Реализация данной схемы обеспечила следующие основные диапазоны регистрации параметров ЭМИ:  $E_{\min} = 0,1$  мВ/м;  $f = 0,15\text{--}75$  МГц; частота следования импульсов  $N = 0\text{--}10$  кГц.

На первых этапах методика прогноза интенсивности разрушения пород и удароопасности участков выработок на рудных месторождениях была основана на определении критических значений  $N_{\text{кр}}$ ,  $E_{\text{кр}}$ , которые устанавливались по результатам специальных исследований.

Критерии опасности имели следующий вид:

$$\begin{aligned} N > N_{\text{кр}} & - \text{опасно}; & E > E_{\text{кр}} & - \text{опасно}; \\ N < N_{\text{кр}} & - \text{неопасно}; & E < E_{\text{кр}} & - \text{неопасно}. \end{aligned}$$

Исследования, проведенные в ИГД СО РАН, направлены на развитие способов прогноза разрушения горных пород и устройств для их осуществления. Разработанные способы предусматривают не только регистрацию ЭМИ, но и обработку цифровой информации для получения количественных показателей опасности динамических явлений.

Например, в способе [38] момент начала разрушения массива предложено определять по отношению среднеквадратических отклонений от средних значений амплитуд сигнала ЭМИ на интервалах измерений, соответствующих нагруженному состоянию массива и ненагруженному, при котором сигнал считают помехой.

Способ [39] предусматривает регистрацию спектрально-временных характеристик сигналов ЭМИ. О начале процессов нарушения сплошности пород судят по началу смещения верхней частоты спектра в высокочастотную часть, а критическое состояние массива диагностируют по превышению верхней частоты спектра начального минимального значения в 2–2,45 раза.

Результатом научно-исследовательских разработок ИГД СО РАН является создание регистрационно-диагностического комплекса аппаратуры серии РЭМИ. Проведены шахтные испытания прибора РЭМИ-3 в горных выработках Таштагольского рудника. Экспериментально зафиксировано, что на участках заколообразования и стрельяния амплитуда сигналов ЭМИ более чем в 5 раз превышала электромагнитный фон, а на участке формирующегося мик-

роудара сначала существенно увеличивается фоновая составляющая сигнала ЭМИ, а затем происходит его увеличение в 10 более раз [40].

Существенные результаты в рассматриваемой области исследований достигнуты во ВНИМИ. Здесь разработана измерительная аппаратура ЕГ-6, работающая на фиксированной частоте  $f = 40$  кГц. Более 20 лет назад создан измерительный комплекс «Ангел», обеспечивающий оперативный экспресс-прогноз удароопасности участков массива. Комплекс нашел широкое распространение на рудниках и угольных шахтах, поскольку показал достаточно высокую эффективность при испытаниях.

Работа аппаратуры «Ангел» основана на автоматической реализации способа определения удароопасности массива по параметрам ЭМИ, включающего измерение в выработке максимальных значений амплитуды и активности ЭМИ, превышающих фоновый уровень. Удароопасными признают участки, на которых выполняются четыре условия в виде неравенств.

Два из условий являются основными [41]:

$$A(x_i) > A_{кр};$$

$$B(x_i) > B_{кр},$$

где  $A$ ,  $B$  – комплексные параметры ЭМИ, определенные в точке замера с координатой  $x_i$ ;  $A_{кр}$ ,  $B_{кр}$  – критические значения параметров  $A$ ,  $B$ , определяемые на стадии предварительных исследований.

$$A = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n E_k;$$

$$B = \arctg \left( \frac{\log_2 N_{\max}}{\log_2 E_{\max}} \right),$$

где  $n$  – число зарегистрированных импульсов ЭМИ за интервал времени замера с амплитудой, превышающей амплитуду фонового излучения  $E_k > E_0$ ;  $E_{\max}$  – максимальная амплитуда, В/м;  $N_{\max}$  – максимальное количество зафиксированных импульсов с амплитудой, превышающей  $E_0$ .

Два дополнительных условия представляют собой превышение критических значений скоростей изменения параметров  $A$  и  $B$  в соседних с расчетной точках наблюдения.

Рассмотрим физический смысл параметров  $A$  и  $B$  с позиций приведенной выше модели ЭМИ. Из уравнения (6) следует, что средневзвешенное значение амплитуд импульсов ЭМИ увеличивается с ростом концентрации трещин  $n$  и скорости их развития  $U$ :

$$A \sim \sqrt{nU}.$$

Таким образом, параметр  $A$  однозначно связан с уровнем механических напряжений в зоне их концентрации (очаге возможного динамического проявления).

Из уравнения (10) можно получить, что расстояние до очага излучения  $R$  взаимосвязано с отношением амплитуд сигналов  $E_1$  и  $E_2$  на частотах соответственно  $\omega_1$  и  $\omega_2$  выражением

$$R = \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu\lambda}{2}} (\sqrt{\omega_1} - \sqrt{\omega_2})} \ln \left( \frac{E_1}{E_2} \sqrt{\frac{\omega_1}{\omega_2}} \right).$$

Отсюда следует, что при увеличении крутизны амплитудного спектра вследствие скин-эффекта величина  $R$  возрастает, что снижает опасность динамического проявления, при снижении крутизны спектра очаг разрушения расположен ближе к обнажению, что повышает удароопасность массива, т. е. величина  $B$  взаимосвязана с расстоянием до зоны концентрации напряжений.

Таким образом, комплексные параметры ЭМИ  $A$  и  $B$  отражают фундаментальные положения прогноза категории удароопасности участков массива по двум классическим геомеханическим параметрам: коэффициенту концентрации сжимающих напряжений в точке их максимума и расстоянию от контура выработки до этой точки.

Усовершенствованная аппаратура «Ангел-М» имеет полосу регистрируемых частот 5–150 кГц. Испытания этой аппаратуры проведены в различных горнодобывающих регионах. Так, в шахте № 1–5 рудника Баренцбург диагностирована локальная зона повышенного трещинообразования, в пределах которой зафиксировано резкое увеличение параметра  $A$  до уровня 320 мкВ при одновременном снижении параметра  $B$  до уровня  $< 0,05$ . Аналогичные результаты получены на шахте «Им. 7 Ноября» ОАО «СУЭК-Кузбасс» при происшедшем обрушении со смещением блоков кровли лавы № 1380. Масштабные испытания на Таштагольском руднике, включающие измерения на участке происшедшего динамического явления в форме толчка, позволили установить критические значения комплексных параметров [42]:

- для выработок, проведенных в рудном теле,  $A_{кр}=35$  мкВ,  $B_{кр}=0,1$ ;
- для массивов вмещающих пород  $A_{кр}=697$  мкВ,  $B_{кр}=0,149$ .

#### Выводы

1. Экспериментально-теоретическая база применения метода ЭМИ для исследования геомеханического состояния массива горных пород и прогноза геодинамических явлений включает расчет регистрируемых параметров на основе законов электродинамики и статистических моделей, а также экспериментальных лабораторных данных о взаимосвязи характеристик электромагнитных, акустических и световых импульсов, геометрических свойств сигнала импульсного излучения при различных режимах нагружения, включая применение автоматизированных и компьютеризированных систем для регистрации процессов в реальном масштабе времени.
2. Математическая модель ЭМИ включает функцию напряженности электрического поля одиночной трещины, решение волнового уравнения с учетом эффекта суперпозиции для системы трещин, прямое и обратное преобразование Фурье, учет зату-

хания электромагнитного сигнала в проводящей среде за счет скин-эффекта. Основным результатом расчетной модели является амплитудный спектр ЭМИ.

3. Основными элементами аппаратных комплексов являются: приемное устройство (антенна); усилитель; аналого-цифровой преобразователь; устройства первичной обработки импульсов, визуализации; программное обеспечение для окончательной обработки информации. Прогноз вероятности динамических проявлений горного давления на основе одиночных критических параметров (амплитуды или частоты импульсов ЭМИ) показал недостаточную достоверность. Наиболее пер-

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dependent scattering criterion modification of disordered dispersed particulate medium with the consideration of particle random distribution and high complex refractive index effects / Z. Aoyu, W. Fuqiang, D. Yan, Y. Dongling, X. Weixin // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2022. – V. 197. – 123331.
2. Yang C.-K., Van Der Drift E.W.J.M., French P.J. Review of scaling effects on physical properties and practicalities of cantilever sensors // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. – 2022. – V. 2 (10). – 103002.
3. Килькеев Р.Ш., Юн Р. Электрические явления при деформировании горных пород // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 1979. – № 2. – С. 102–105.
4. Subsurface waste heat recovery from the abandoned steam assisted gravity drainage (SAGD) operations / C. Wei, A. Nawaz, D. Nath, M. Zirrahi, H. Hassanzadeh // *Energy*. – 2022. – V. 256. – 124615.
5. Hwang J.-D., Liu W.-Y. Hybrid visible-blind ultraviolet photodetector based on NiO thin-film phototransistor and p-NiO/n-Si heterojunction diode // *Materials Science in Semiconductor Processing*. – 2022. – V. 149. – 106858.
6. Воробьев А.А. Равновесие и преобразование видов энергии в недрах. – Томск: Изд-во Томского университета, 1980. – 212 с.
7. Progress and trends in non-destructive testing for thermal barrier coatings based on infrared thermography: a review / J. Zhu, Z. Mao, D. Wu, (...), W. Zhu, Z. Liu // *Journal of Nondestructive Evaluation*. – 2022. – V. 41 (3). – 49.
8. Pawel D. The azimuths difference method as an effective method of determining the value of horizontal stress acting on mining excavations in underground mines // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018. Conference proceedings. – Albena, Bulgaria, 2018. – P. 913–924.
9. Glen A.R., Bredy B.T. Laboratory investigation of the electrodynamic of rock fracture // *Nature*. – 1986. – V. 321. – № 6069.
10. Ogawa T. Analysis of measurement techniques of electric fields and currents in the atmosphere // *Kyoto University*. – 1973. – № 13. – P. 111–137.
11. Chi-Yu King. Electromagnetic emission before earthquakes // *Nature*. – 1983. – V. 301. – № 3. – P. 377.
12. Simulation of a fire occurred upon the ventilation network of praid salt mine / D. Cioclea, I. Gherghe, C. Lupu, M.C. Suvar, C. Boanta, F. Radoi, C. Tomescu, V.M. Pasculescu // 14th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2014. Conference Proceedings. – Bulgaria, STEF92 Technology Ltd, 2014. – P. 537–544.
13. Pimonov A.G., Ivanov V.V. Simulation model for the process of crack formation at fracture centers in rocks // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 1990. – № 3. – С. 34–40.
14. Hydrogeological investigations in predicting UCG process influence on groundwater environment in Poland / P. Bukowski, B. Tomaszewska, M. Bukowska, L. Pajak, K. Niedbalska // 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2015. – Sofia, 2015. – P. 375–382.
15. Kovin O.N. Assessment of the prospective water inflow hazards using georadar: case study of upper Kama potash deposit // *Mine Water: Technological and Environmental Challenges. Proceedings of International Mine Water Association Conference*. – Perm: Perm State University, Perm Federal Research Center of the Ural Branch of RAS, 2019. – P. 23–27.
16. The counting and triggers signals formation system for gamma-telescope GAMMA-400 / I.V. Arkhangel'skaja, A.I. Arkhangel'skiy, E.N. Chasovikov, A.M. Galper, M.D. Kheymits, A.E. Murchenko, Y.T. Yurkin // *Physics Procedia. Fundamental Research in Particle Physics and Cosmophysics*. – 2015. – V. 74. – P. 212–219.
17. Design of conception on lightning monitoring system for strikes to structures / V. Shostak, R. Prylepa, O. Kozlov, V. Brzhezitsky // *Technology audit and production reserves*. – 2017. – V. 6. – № 1 (38). – P. 47–59.
18. Integration of robotics design into the learning process at school / A. Kozhagul, Y. Bidaibekov, B. Bostanov, N. Pak, Z. Kozhagulova // *Periodico Tche Quimica*. – 2020. – V. 17. – № 35. – С. 404–424.
19. Мальшин А.А., Дочкин А.С. Определение стадий деформационного разрушения горных пород по данным электромагнитного излучения // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. – 2015. – № 4 (110). – С. 15–21.
20. Kazunina G.A., Malshin A.A. Study of the kinetics of damage accumulation in loaded materials based on impulse electromagnetic and photon emission // *Russian Physics Journal*. – 2009. – № 52 (6). – P. 598–601.
21. Kazunina G.A., Alekseev D.V. Kinetics and distribution clusters of damage in loaded materials: simulation with probabilistic cellular automaton // *Advanced materials research*. – 2013. – V. 705. – P. 191–196.
22. Регистрация и обработка сигналов электромагнитного излучения / М.В. Курленя, А.Г. Вострецов, Г.И. Кулаков, Г.Е. Яковицкая. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. – 232 с.
23. A bolt loosening detection method based on patch antenna with overlapping sub-patch / S. Xue, X. Li, L. Xie, Z. Yi, G. Wan // *Structural Health Monitoring*. – 2022. – V. 21 (5). – P. 2231–2243.
24. О коэффициенте механо-электромагнитных преобразований при разрушении образцов горных пород / В.Н. Опарин, Г.Е. Яковицкая, А.Г. Вострецов, В.М. Серяков, А.В. Кривецкий // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2013. – № 3. – С. 3–20.
25. Модернизированная система АСИ-2 для контроля электромагнитной эмиссии образцов горных пород при их одноосном нагружении / В.Н. Опарин, А.В. Кривецкий, Г.Е. Яковицкая, А.В. Вострецов, А.А. Бизяев // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2010. – № 4. – С. 104–115.
26. Sharopova G., Bizyaev A., Jakovitskaya O. Analysis of electromagnetic emission signals accompanying the process of rock destruction // *Progress through Innovations Proceedings 2018 VIII International Academic and Research Conference of Graduate and Post graduate Students*. – Novosibirsk, 2018. – P. 159–160.
27. Вострецов А.Г., Бизяев А.А., Яковицкая Г.Е. Экспериментальные исследования по синхронной регистрации механических и электромагнитных параметров сигналов ЭМИ при нагружении образцов горных пород // *Доклады Академии наук высшей школы РФ*. – 2018. – № 3 (40). – С. 38–46.
28. Измерительная система синхронной регистрации сигналов ЭМИ и механических параметров деформирования образцов горных пород в лабораторных экспериментах / А.Г. Вострецов,

- Г.И. Кулаков, А.А. Бизяев, Г.Е. Яковицкая // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 6. – С. 204–210.
29. Characteristics and precursor information of electromagnetic signals of mining induced coal and gas outburst / L. Qiu, Z. Li, E. Wang, Z. Liu, J. Ou, X. Li, M. Ali, Y. Zhang, S. Xia // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2018. – V. 54. – P. 206–215
30. Measurement of the stress field of a tunnel through its rock EMR / L. Qiu, E. Wang, D. Song, Z. Liu, R. Shen, G. Lv, Z. Xu // Journal Geophys. – 2017. – V. 14. – P. 949–959.
31. Changes in frequency of electromagnetic radiation from loaded coal rock / D. Song, E. Wang, X. Song, P. Jin, L. Qiu // Rock Mech Rock. – 2016. – V. 49. – P. 291–302.
32. Use of electromagnetic radiation from fractures for mining-induced stress field assessment / D. Song, E. Wang, X. He, H. Jia, L. Qiu, P. Chen, S. Wang // Journal Geophys. – 2018. – V. 15. – P. 1093–1103.
33. Иванов В.В., Простов С.М. Параметры импульсного электромагнитного излучения при хрупком разрушении горных пород // Изв. вузов. Горный журнал. – 1981. – № 2. – С. 1–4.
34. A novel method for suppressing phase retrieval error caused by scanning based on amplitude correlative in-situ matching / X. Liu, Y. Liu, H. Jiang, (...), W. Zheng, Q. Tan // Optics and Lasers in Engineering. – 2022. – V. 152. – 106978.
35. Multi-sensor approach combined with Pedological investigations to understand site-specific variability of soil properties and Potentially Toxic Elements (PTEs) content of an industrial contaminated area / S. Vingiani, A. Agrillo, R. De Mascellis, (...), F.A. Mileti, F. Terribile // Applied Sciences (Switzerland). – 2022. – V. 12 (8). – 3993.
36. Multi-sensor measurement and data fusion technology for manufacturing process monitoring: a literature review / L. Kong, X. Peng, Y. Chen, P. Wang, M. Xu // International Journal of Extreme Manufacturing. – 2020. – V. 2 (2). – 022001.
37. Простов С.М., Дырдин В.В., Хмяляйнен В.А. Электромагнитный бесконтактный геоконтроль. – Кемерово: КузГТУ, 2002. – 132 с.
38. Способ прогноза разрушения горных пород и устройство для его осуществления: пат. Рос. Федерация, № 2137920, заявл. 01.08.1997; опубл. 20.09.1999.
39. Способ прогноза разрушения массива горных пород и устройство для его осуществления: пат. Рос. Федерация, № 2289693, заявл. 08.07.2005; опубл. 20.12.2006.
40. Бизяев А.А., Вострцов А.Г., Яковицкая Г.Е. Регистрационно-диагностический комплекс РДК РЭМИ-3 и экспериментальные исследования разрушения горных пород в условиях подземных горных выработок Таштагольского месторождения // Доклады Академии наук высшей школы РФ. – 2015. – № 3 (28). – С. 29–38.
41. Способ определения удароопасности массива горных пород по электромагнитной эмиссии и устройство для его: пат. Рос. Федерация, № 2535329, заявл. 16.10.2013; опубл. 10.12.2014.
42. Яковлев Д.В., Мулев С.Н. Опыт применения многофункциональной геофизической аппаратуры АНГЕЛ-М в угольной и рудной промышленности // Уголь. – 2014. – № 10 (1063). – С. 14–19.

Поступила 14.09.2022 г.

Прошла рецензирование 16.11.2022 г.

#### Информация об авторах

**Простов С.М.**, доктор технических наук, профессор кафедры строительного производства и экспертизы недвижимости, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева.

**Разумов Е.Е.**, ассистент, научный сотрудник лаборатории геофизических исследований Акционерного Общества «Научно-исследовательский институт горной геомеханики маркшейдерского дела – межотраслевой научный центр ВНИМИ».

**Мулев С.Н.**, директор по науке Акционерного Общества «Научно-исследовательский институт горной геомеханики маркшейдерского дела – межотраслевой научный центр ВНИМИ».

**Шабанов Е.А.**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой строительного производства и экспертизы, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева.

UDC 622.831:537.531

## CALCULATION AND HARDWARE BASE FOR GEOMONITORING THE STATE OF THE ARRAY BY REGISTERING NATURAL ELECTROMAGNETIC RADIATION

**Sergey M. Prostov<sup>1</sup>,**  
psm.kem@mail.ru

**Egor E. Razumov<sup>2</sup>,**  
razumov@vnimi.ru

**Sergey N. Mulev<sup>2</sup>,**  
smuleva@yandex.ru

**Evgeny A. Shabanov<sup>1</sup>,**  
evgenshab@mail.ru

<sup>1</sup> T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,  
28, Vesennyaya street, Kemerovo, 650002, Russia.

<sup>2</sup> Joint-Stock Company «Scientific Research Institute of Mining Geomechanics of Surveying – Intersectoral Research Center VNIMI»,  
1, Sosnovy Bor street, Kemerovo, 650002, Russia.

**The relevance** of the study is caused by the need to develop a promising method for predicting the impact hazard of the array according to the parameters of natural electromagnetic radiation that occurs during cracking in rocks. The existing methods of interpretation of geophysical monitoring data do not take into account the relationship of electromagnetic radiation parameters with the main geomechanical criteria determining the probability of a mountain impact: the concentration of stresses in the array and the location of their maximum.

**The main aim** is to establish rational parameters for further experimental substantiation of the criteria for local prediction of impact hazard by the electromagnetic radiation registration method based on the experimental equipment «Angel-M» developed at the MNC.

**Objects:** massifs of rocks prone to dynamic manifestations of mountain pressure at Kuzbass mining enterprises (Tashtagolskaya mine, depth 700 m; Ziminka mine, depth 300 m; mine no. 12, depth 340 m).

**Methods:** analysis of the physical mechanisms of electrification of rocks in the field of mechanical stresses based on the fundamental laws of solid state physics and electrostatics, experimental and theoretical foundations of the method of recording electromagnetic radiation in laboratory and field conditions.

**Results.** The paper considers the physical prerequisites for electromagnetic radiation occurrence during the destruction of solids and rocks, the main theoretical and experimental results obtained in this field by leading scientific teams. A method for calculating the amplitude-frequency response of electromagnetic radiation during fracturing in rocks is described, including the solution of the wave equation, the forward and inverse Fourier transform, the effects of superposition of crack systems and electromagnetic radiation attenuation in a conductive medium. A promising method for predicting the impact hazard of an array by the electromagnetic radiation registration method is substantiated on the basis of complex criteria indirectly interrelated with the fundamental geomechanical parameters of the array (stress concentrations at their maximum point and the distance from the contour to this point): the average amplitude of pulses during the registration interval and the steepness of the pulse rate graph.

### Key words:

Geophysical forecast, electromagnetic radiation, rock destruction, disturbance of natural electric fields, wave equation, Fourier transforms, amplitude-frequency response, hardware complex, shock hazard forecast, complex criterion.

### REFERENCES

1. Aoyu Z., Fuqiang W., Yan D., Dongling Y., Weixin X. Dependent scattering criterion modification of disordered dispersed particulate medium with the consideration of particle random distribution and high complex refractive index effects. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, vol. 197, 123331.
2. Yang C.-K., Van Der Drift E.W.J.M., French P.J. Review of scaling effects on physical properties and practicalities of cantilever sensors. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2022, vol. 2(10), 103002.
3. Kilkeyev R.S., Yun R. Electrical phenomena during deformation of rocks. *Soviet Mining Science*, 1979, no. 2, pp. 102–105. In Rus.
4. Wei C., Nawaz A., Nath D., Zirrahi M., Hassanzadeh H. Subsurface waste heat recovery from the abandoned steam assisted gravity drainage (SAGD) operations. *Energy*, 2022, vol. 256, 124615.
5. Hwang J.-D., Liu W.-Y. Hybrid visible-blind ultraviolet photodetector based on NiO thin-film phototransistor and p-NiO/n-Si heterojunction diode. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2022, vol. 149, 106858.
6. Vorobyev A.A. *Ravnovesie i preobrazovanie vidov energii v nedrakh* [Equilibrium and transformation of types of energy in the subsurface]. Tomsk, Tomsk University Publ. House, 1980. 212 p.
7. Zhu J., Mao Z., Wu D., Zhu W., Liu Z. Progress and trends in non-destructive testing for thermal barrier coatings based on infrared thermography: a review. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2022, vol. 41 (3), 49.
8. Pawelus D. The azimuths difference method as an effective method of determining the value of horizontal stress acting on mining excavations in underground mines. *18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018. Conference proceedings*. Albena, Bulgaria, 2018. pp. 913–924.
9. Bredy B.T., Rowell G.F. Laboratory investigation of the electro-dynamics of rock fracture. *Nature*, 1986, vol. 321, no. 6069.
10. Ogawa T. Analysis of measurement techniques of electric fields and currents in the atmosphere. *Kyoto University*, 1973, no. 13, pp. 111–137.



11. Chi-Yu King. Electromagnetic emission before earthquakes. *Nature*, 1983, vol. 301, no. 3, pp. 377.
12. Cioclea D., Gherghel I., Lupu C., Suvar M.C., Boanta C., Radoi F., Tomescu C., Pasculescu V.M. Simulation of a fire occurred upon the ventilation network of praid salt mine. *14th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2014. Conference Proceedings*. Bulgaria, STEF92 Technology Ltd, 2014. pp. 537–544.
13. Pimonov A.G., Ivanov V.V. Simulation model for the process of crack formation at fracture centers in rocks. *Physico-technical problems of mineral development*, 1990, no. 3, pp. 34–40. In Rus.
14. Bukowski P., Tomaszewska B., Bukowska M., Pajak L., Niedbalska K. Hydrogeological investigations in predicting UCG process influence on groundwater environment in Poland. *15th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2015*. Sofia, 2015. pp. 375–382.
15. Kovin O.N. Assessment of the prospective water inflow hazards using georadar: case study of upper Kama potash deposit. *Mine Water: Technological and Environmental Challenges. Proceedings of International Mine Water Association Conference*. Perm, Perm State University, Perm Federal Research Center of the Ural Branch of RAS, 2019. pp. 23–27.
16. Arkhangel'skaja I.V., Arkhangel'skiy A.I., Chasovikov E.N., Galper A.M., Kheymits M.D., Murchenko A.E., Yurkin Y.T. The counting and triggers signals formation system for gamma-telescope GAMMA-400. *Physics Procedia. Fundamental Research in Particle Physics and Cosmophysics*, 2015, vol. 74, pp. 212–219.
17. Shostak V., Prylepa R., Kozlov O., Brzhezitskiy V. Design of conception on lightning monitoring system for strikes to structures. *Technology audit and production reserves*, 2017, vol. 6, no. 1 (38), pp. 47–59.
18. Kozhagul A., Bidaibekov Y., Bostanov B., Pak N., Kozhagulova Z. Integration of robotics design into the learning process at school. *Periodico Tchê Química*, 2020, vol. 17, no. 35, pp. 404–424.
19. Malshin A.A., Dochkin A. S. Determination of the stages of deformation destruction of rocks according to electromagnetic radiation data. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2015, no. 4 (110), pp. 15–21. In Rus.
20. Kazunina G.A., Malshin A.A. Study of the kinetics of damage accumulation in loaded materials based on im-pulse electro-magnetic and photon emission. *Russian Physics Journal*, 2009, no. 52 (6), pp. 598–601.
21. Kazunina G.A., Alekseev D.V. Kinetics and distribution clusters of damage in loaded materials: simulation with probabilistic cellular automaton. *Advanced materials research*, 2013, no. 705, pp. 191–196.
22. Kurlenya M.V., Vostretsov A.G., Kulakov G.I., Yakovitskaya G.E. *Registratsiya i obrabotka signalov elektromagnitnogo izlucheniya* [Registration and processing of electromagnetic radiation signals]. Novosibirsk, SB RAS Publ. house, 2000. 232 p.
23. Xue S., Li X., Xie L., Yi Z., Wan G. A bolt loosening detection method based on patch antenna with overlapping sub-patch. *Structural Health Monitoring*, 2022, vol. 21(5), pp. 2231–2243.
24. Oparin V.N., Yakovitskaya G.E., Vostretsov A.G., Seryakov V.M., Krivetskiy A.V. Mechanical-electromagnetic transformations in rocks on failure. *Journal of Mining Science*, 2013, no. 3, pp. 3–20. In Rus.
25. Oparin V.N., Krivetskiy A.V., Yakovitskaya G.E., Vostretsov A.G., Bizyaev A.A. Modernized electromagnetic emission control system for uniaxial testing of rocks. *Journal of Mining Science*, 2010, vol. 46, no. 4, pp. 458–467.
26. Shaporeva G., Bizyaev A., Jakovitskaya O. Analysis of electromagnetic emission signals accompanying the process of rock destruction. *Progress through Innovations Proceedings 2018 VIIth International Academic and Research Conference of Graduate and Post graduate Students*. Novosibirsk, 2018. pp. 159–160.
27. Vostretsov A.G., Bizyaev A.A., Yakovitskaya G.E. Eksperimentalnye issledovaniya po sinkhronnoy registratsii mekhanicheskikh i elektromagnitnykh parametrov signalov EMI pri nagruzhenii obraztsov gornykh porod [Experimental investigations on synchronous recording of mechanical and electromagnetic parameters of EMP signals under loading of mineral rocks]. *Doklady Akademii nauk vysshey shkoly Rossiiskoi Federatsii*, 2018, no. 3 (40), pp. 38–46.
28. Vostretsov A.O., Kulakov O.I., Bizyaev A.A., Yakovitskaya O.E. Instrumentation system for synchronous recording of EME and mechanical deformation parameters in lab-scale tests of rock specimens. *Journal of Mining Science*, 2017, vol. 53, no. 6, pp. 1152–1158.
29. Qiu L., Li Z., Wang E., Liu Z., Ou J., Li X., Ali M., Zhang Y., Xia S. Characteristics and precursor information of electromagnetic signals of mining induced coal and gas outburst. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2018, vol. 54, pp. 206–215.
30. Qiu L., Wang E., Song D., Liu Z., Shen R., Lv G., Xu Z. Measurement of the stress field of a tunnel through its rock EMR. *Journal Geophys.*, 2017, vol. 14, pp. 949–959.
31. Song D., Wang E., Song X., Jin P., Qiu L. Changes in frequency of electromagnetic radiation from loaded coal rock. *Rock Mech Rock*, 2016, vol. 49, pp. 291–302.
32. Song D., Wang E., He X., Jia H., Qiu L., Chen P., Wang S. Use of electromagnetic radiation from fractures for mining-induced stress field assessment. *Journal Geophys.*, 2018, vol. 15, pp. 1093–1103.
33. Ivanov V.V., Prostov S.M. Parametry impulsnogo elektromagnitnogo izlucheniya pri khrupkom razrushenii gornykh porod [Parameters of pulsed electromagnetic radiation in brittle destruction of rocks]. *Mining journal*, 1981, no. 2, pp. 1–4.
34. Liu X., Liu Y., Jiang H., Zheng W., Tan Q. A novel method for suppressing phase retrieval error caused by scanning based on amplitude correlative in-situ matching. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, vol. 152, 106978.
35. Vingiani S., Agrillo A., De Mascellis R., Mileti F.A., Terribile F. Multi-sensor approach combined with Pedological investigations to understand site-specific variability of soil properties and Potentially Toxic Elements (PTEs) content of an industrial contaminated area. *Applied Sciences (Switzerland)*, 2022, vol. 12 (8), 3993.
36. Kong L., Peng X., Chen Y., Wang P., Xu M. Multi-sensor measurement and data fusion technology for manufacturing process monitoring: a literature review. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2020, vol. 2 (2), 022001.
37. Prostov S.M., Dyrdin V.V., Khyamyalyaynen V.A. *Elektromagnitnyy beskontaktny geokontrol* [Electromagnetic contactless geokontrol]. Kemerovo, KuzSTU Publ., 2002. 132 p.
38. Kurlenya M.V., Kulakov G.I., Vostretsov A.G., Kushnir V.I., Yakovitskaya G.Y. *Sposob prognoza razrusheniya gornykh porod i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [A method for predicting the destruction of rocks and a device for its implementation]. Patent RF, no. 2137920, 1999.
39. Oparin V.N., Vostretsov A.G., Yakovitskaya G.E. *Sposob prognoza razlozheniya gornykh porod i ustroystvo dlyayego osushchestvleniya* [Method of forecasting the destruction of a rock mass and a device for its implementation]. Patent RF, no. 2289693, 2006.
40. Bizyaev A.A., Vostretsov A.G., Yakovitskaya G.E. Registratsionno-diagnosticheskiy kompleks RDK REMI-3 i eksperimentalnye issledovaniya razrusheniya gornykh porod v usloviyakh podzemnykh gornykh vyrabotok Tashtagolskogo mestorozhdeniya [The recording-diagnostic equipment RDK REMI-3 and experimental investigation of rock fracturing under conditions of underground working in the Tashtagolsky field]. *Doklady Akademii nauk vysshey shkoly RF*, 2015, no. 3 (28), pp. 29–38.
41. Yakovlev D.V., Mulov S.N., Tsirel S.V., Maksimov A.S., Mazyra M.D., Bondarev A.V., Badanin A.I. *Sposob opredeleniya udaropasnosti massiva gornykh porod po elektromagnitnoy emissii i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [A method for determining the impact hazard of a rock mass by electromagnetic emission and a device for it]. Patent RF, no. 2535329, 2013.
42. Yakovlev D.V., Mulev S.N. Experience of Angel-M multipurpose geophysical equipment use in coal industry and ore mining. *Coal*, 2014, no. 10 (1063), pp. 14–19. In Rus.

Received: 14 September 2022.

Reviewed: 16 November 2022.

**Information about the authors**

**Sergey M. Prostov**, Dr. Sc., professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University.

**Egor E. Razumov**, assistant, researcher, Laboratory of Geophysical Research, Joint-Stock Company «Scientific Research Institute of Mining Geomechanics of Surveying – Intersectoral Research Center VNIMI».

**Sergey N. Mulev**, Director of Science, Joint-Stock Company «Scientific Research Institute of Mining Geomechanics of Surveying – Intersectoral Research Center VNIMI».

**Evgeny A. Shabanov**, Cand. Sc., associate professor, Head of the Department of Construction Production and Expertise, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University.

УДК 544.015.22

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВЫДЕЛЕНИЯ ГАЗООБРАЗНОГО CO<sub>2</sub> В ПЕРЕГРЕТОМ ПРИСТЕННОМ СЛОЕ РАСТВОРА C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O-CO<sub>2</sub>

Дехтярь Руслан Анатольевич<sup>1</sup>,  
dekhtyar@itp.nsc.ru

Овчинников Валерий Викторович<sup>1</sup>,  
avks@itp.nsc.ru

<sup>1</sup> Институт теплофизики СО РАН,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 1.

**Актуальность** работы обусловлена тем, что для увеличения коэффициента нефтеотдачи используется технология с применением в качестве вытесняющего вещества углекислого газа. Выделение и поглощение углекислого газа является одним из основных факторов, влияющих на скорость изменения климата на Земле.

**Цель работы:** изучение особенностей процесса выделения углекислого газа в сильно перегретом (метастабильном) слое раствора C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O-CO<sub>2</sub>.

**Объект:** раствор диоксида углерода CO<sub>2</sub> в диметилкетоне C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O.

**Методы исследования:** метод визуализации газовой выделенности в жидкости. Для создания слоя метастабильной жидкости проводился импульсный разогрев тонкой проволоочки. По результатам цифровой обработки фото-видео материалов определялись размеры и форма образующихся пузырьков углекислого газа и скорость движения границы зоны газовой выделенности вдоль проволоочки. На кадрах трудно отличить пузырьки газообразного CO<sub>2</sub> от паровых пузырьков C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O, поэтому для разделения данных по кипению и газовой выделенности определялась массовая доля паров C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O в парогазовой полости по изменению объема пузырька и с использованием уравнения состояния CO<sub>2</sub> и C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O.

**Результаты.** В зависимости от степени метастабильности пристенного слоя раствора C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O-CO<sub>2</sub> при давлении в рабочем объеме от 40 до 260 кПа получены экспериментальные данные, которые позволили выделить несколько режимов газовой выделенности. Показано, что при невысокой степени метастабильности пристенного слоя жидкости выделение газообразного CO<sub>2</sub> происходит в режиме последовательной цепной активации центров газовой выделенности, а при высокой степени метастабильности и давлении в объеме больше 140 кПа выделение газообразного CO<sub>2</sub> происходит в режиме «плёночного газовой выделенности». Для всех режимов газовой выделенности скорость движения границы газовой выделенности практически постоянна во времени, но для различных режимов газовой выделенности значения скорости отличаются на порядок.

### Ключевые слова:

Гетерогенное газовой выделенности, кипение, метастабильность, раствор, фазовый переход.

### Введение

Актуальность усовершенствования технологий и методов увеличения нефтеотдачи в настоящее время не вызывает сомнения. Это связано с уменьшением запасов легко извлекаемой нефти [1], разработкой морских месторождений [2] и необходимостью использования новых технологий на разрабатываемых месторождениях с целью сохранения максимально возможного уровня нефтедобычи [3]. Важным элементом современных технологий является интеллектуальная система управления производственными процессами на объектах нефтегазового месторождения. Для обеспечения оптимальных условий и режимов работы оборудования на месторождении требуется, чтобы математические модели адекватно описывали статику и динамику изменения во времени как можно большего числа режимных параметров [4]. Для проверки адекватности математической модели требуются экспериментальные данные, в том числе, полученные для условий, соответствующих аварийным режимам работы оборудования.

Одним из вариантов повышения уровня нефтеотдачи является метод, когда в качестве вытесняющего агента используется углекислый газ (CO<sub>2</sub>) [5, 6]. При использовании углекислого газа в лабораторных условиях, при неограниченной смесимости, коэффициент

вытеснения нефти может достигать 100 % [7]. Однако коэффициент растворимости углекислого газа в нефти сильно зависит от давления и температуры [5]. Вследствие этого очень важно правильно рассчитывать скорость и интенсивность выделения газообразного CO<sub>2</sub> при движении газонасыщенной нефти по скважине и в установках подготовки нефти к транспортировке по нефтепроводу [8, 4]. При выделении газообразного CO<sub>2</sub> в водонефтяных эмульсиях также возможно образование газогидратов [9], которое необходимо учитывать в алгоритмах быстрого анализа проблемных зон гидратообразования [10].

Ещё очень важно отметить, что процессы поглощения и эмиссии углекислого газа во многом определяют скорость изменения климата на Земле. Очистка газовых выбросов на предприятиях нефтегазовой промышленности заметно снижает поступление диоксида углерода в атмосферу [11]. Величину эмиссии углекислого газа можно оценить по данным о составе газов в пузырьках, заключённых в различных слоях ледников и мерзлых отложений [12]. Однако из-за недостатка теоретических и экспериментальных данных при расчёте глобального баланса CO<sub>2</sub> неопределённость может достигать 40 % [13]. В частности, многие модели, используемые для расчёта баланса CO<sub>2</sub>, не учитывают особенностей термодинамической

устойчивости системы жидкость – углекислый газ в метастабильном состоянии.

При моделировании роста газового пузырька в газонасыщенной жидкости обычно принимаются следующие допущения: на поверхности пузырька образуется диффузионный слой, в котором происходит основное изменение концентрации растворенного газа, зависимость концентрации газа от давления удовлетворяет закону Генри и выделение растворенного газа происходит в равновесном режиме [14, 15]. Такие же допущения принимаются и при моделировании роста паровых пузырьков, когда вместо закона Генри используют уравнение Клапейрона–Клаузиуса. Соответственно имеет место существенная аналогия между кипением и газовой выделением [16]. В работе [17] было показано, что в зависимости от степени метастабильности переходный процесс от конвекции к кипению может протекать в двух режимах – медленной и быстрой волны, отличающихся масштабом скорости и структурой фронта вскипания. В общем случае структура зоны вскипания определяется суперпозицией одновременно протекающих быстрых и медленных автоволновых процессов в зависимости от величины перегрева поверхности нагревателя относительно температуры насыщения. Таким образом, увеличение размера области вскипания на твёрдой поверхности происходит не случайным образом, а в режиме цепной активации центров вскипания. Для жидких металлов достигаются высокие уровни метастабильности. В этом случае фазовый переход происходит взрывообразно, на нагревателе образуется паровая плёнка, минуя режим пузырькового кипения [18].

Целью настоящей работы является исследование физических процессов при выделении углекислого газа в метастабильном слое жидкости около протяженного цилиндрического нагревателя.

#### Экспериментальная установка, методы измерений

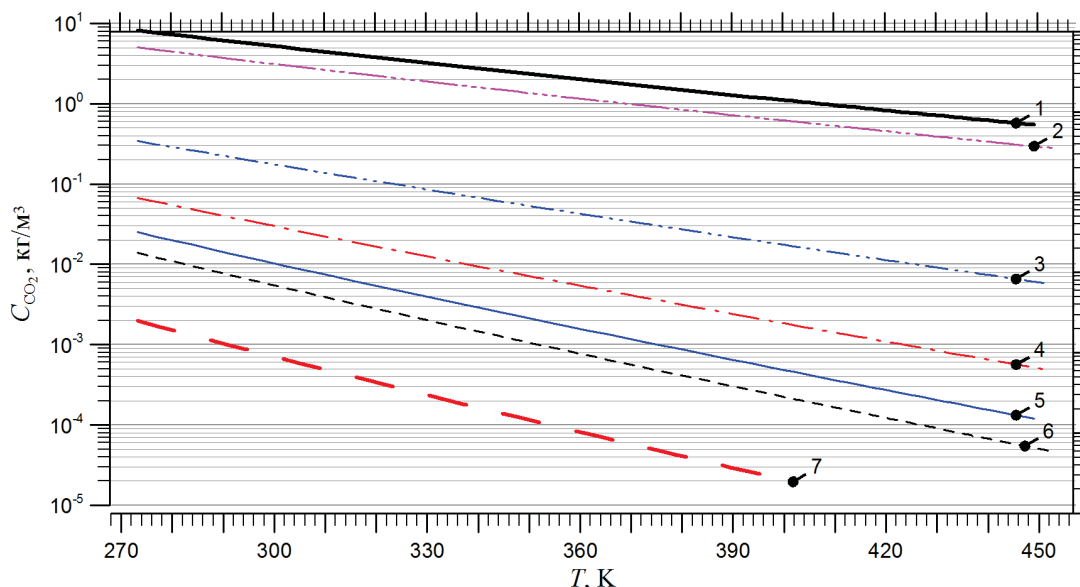
Для опытов был выбран раствор C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O-CO<sub>2</sub> (диметилкетон-диоксид углерода), так как в этой системе можно было достигнуть высоких уровней метастабильности для растворенного диоксида углерода. На рис. 1 показано, как зависит значение равновесной концентрации углекислого газа C<sub>CO<sub>2</sub></sub>(P,T) в растворе C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O-CO<sub>2</sub> от температуры жидкости T для различных давлений P. Видно, что равновесная концентрация уменьшается на порядок при нагреве жидкости на 80 градусов. Для вычисления значений равновесной концентрации углекислого газа C<sub>CO<sub>2</sub></sub>(P,T) в растворе C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O-CO<sub>2</sub> использовалась эмпирическая зависимость:

$$C_{CO_2}(P, T) = C_E(P) \cdot \exp\left\{-\left[\frac{T - 170}{\eta(P)}\right]^{0,8}\right\}, \quad (1)$$

где значения коэффициентов C<sub>E</sub>(P) и η(P) для давлений P от 40 кПа до 1,0 МПа и температур T от 283 до 450 К подбирались из соответствующих литературных источников [19–22] с точностью 7%:

$$C_E(P) = 5,6 \cdot 10^{-11} P^2 + 2,01 \cdot 10^{-5} P - 0,579,$$

$$\eta(P) = 11,77 - 1,97 \cdot 10^{-11} \cdot P^2 + 4,59 \cdot 10^{-5} P.$$



**Рис. 1.** Значения равновесной концентрации диоксида углерода C<sub>CO<sub>2</sub></sub>(P,T) в растворе C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O-CO<sub>2</sub> в зависимости от температуры T. Расчёт по зависимости (1) для различных давлений P: 1 – 1,0 МПа, 2 – 0,8 МПа, 3 – 280 кПа, 4 – 150 кПа, 5 – 100 кПа, 6 – 80 кПа, 7 – 40 кПа

**Fig. 1.** Values of the equilibrium concentration of carbon dioxide C<sub>CO<sub>2</sub></sub>(P,T) in C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O-CO<sub>2</sub> solution depending on the temperature T. Calculation according to equation (1) for various pressures P: 1 – 1,0 MPa, 2 – 0,8 MPa, 3 – 280 kPa, 4 – 150 kPa, 5 – 100 kPa, 6 – 80 kPa, 7 – 40 kPa

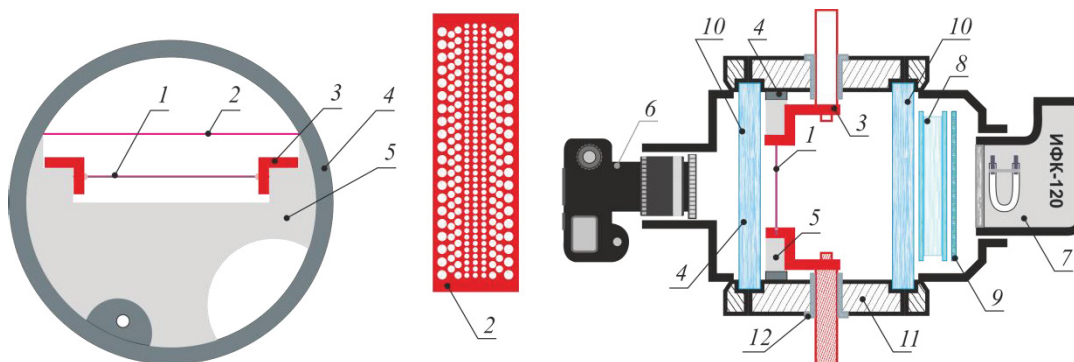
Для проведения экспериментальных исследований использовалась установка, схема которой показана на рис. 2. Рабочий участок располагался в герметичной

рабочей камере со смотровыми окнами. На рис. 3 показана фотография рабочей камеры. Проволочка – I нагревалась при пропускании через неё постоянного

электрического тока. Как нагревательный элемент рабочего участка использовалась хромелевая проволока диаметром  $0,28 \pm 0,01$  мм, длиной  $L=40 \pm 0,05$  мм. Проволочка припаивалась серебряным припоем к медным токоподводам – 3 толщиной 2 мм и шириной 5 мм. Оба токоподвода жёстко закреплялись на электроизолирующей пластине из фторопласта – 5 толщиной 14 мм. Пластина – 5 крепилась к монтажному кольцу – 4 из нержавеющей стали шириной 14 мм. С помощью монтажного кольца – 4 рабочий участок – 1 устанавливался горизонтально в корпусе рабочей камеры – 11 длиной 90 мм. Конструкция рабочего участка позволила выполнить тарировку рабочего участка как датчика температуры и провести отбор проволочек для опытов. Для дальнейших экспериментов была выбрана проволочка с минимальным количеством «дефектов» на её поверхности, которые обычно являются активными центрами вскипания (газообразования). Дальнейшие опыты проводились с проволочкой, для которой вскипание в перегретом пристенном слое жидкости чистого C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O не начиналось в течение 80 с при перегреве на 40 К выше температуры насыщения и в течение 20 с при перегреве на 120 К.

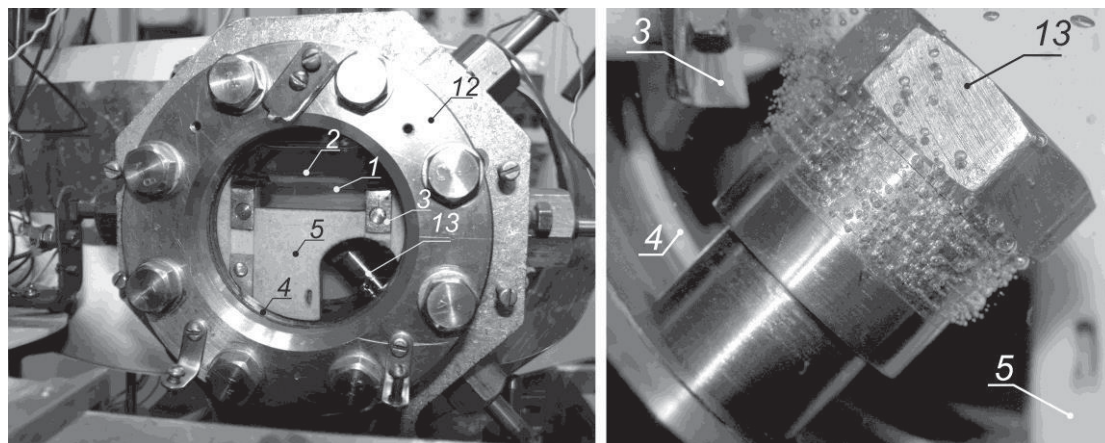
В рабочей камере – 11 были установлены два смотровых окна – 10 диаметром 90 мм, которые использовались для визуализации исследуемых процессов. Для создания равномерного освещения рабочего участка были применены: источник света – 7, оптическое стекло с равномерным затемнением – 9 и рассеиватель света – 8. Фото-видеосъёмка производилась с помощью цифровой фотокамеры Casio EX-F1 – 6. Значение скорости видеосъёмки с точностью до 0,1 кадр/с определялось при съёмке экрана электронного секундомера. По результатам обработки видеоматериалов определялись положение и скорость движения отдельных пузырьков, которые визуальнo можно выделить на проволочке рабочего участка. Вертикальная координата  $y$  отсчитывалась от середины проволочки, а горизонтальная координата  $x$  отсчитывалась от края правого токоподвода – 3. При обработке кадров предполагалось, что пузырёк имеет форму эллипсоида вращения с продольным (вдоль оси вращения) размером  $h_1$  и поперечным размером  $h_2$ , соответственно, объём пузырька  $V_b$  вычислялся по формуле:

$$V_b = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \frac{h_1 \cdot h_2^2}{8}$$



**Рис. 2.** Схема установки и рабочего участка: 1 – проволочный нагреватель; 2 – перфорированная пластина; 3 – токоподводы; 4 – монтажное кольцо; 5 – электроизолирующая пластина; 6 – фотоаппарат; 7 – импульсный источник света; 8 – рассеиватель света; 9 – оптическое стекло с равномерным затемнением; 10 – смотровые окна; 11 – корпус рабочей камеры; 12 – герметичные электроизоляторы

**Fig. 2.** Scheme of installation and working area: 1 – wire heater; 2 – perforated plate; 3 – current leads; 4 – mounting ring; 5 – electrical insulating plate; 6 – camera; 7 – flash light source; 8 – light diffuser; 9 – evenly shaded optical glass; 10 – viewing windows; 11 – working chamber body; 12 – sealed electrical insulators



**Рис. 3.** Фотография рабочей камеры. Обозначения – на рис. 2, 13 – барботёр

**Fig. 3.** Photo of the working chamber. See designations in Fig. 2, 13 – bubbler

На расстоянии 6 мм выше проволоочки размещалась перфорированная пластина –2 из медной фольги толщиной 50 мкм. Перфорированная пластина с отверстиями разного диаметра использовалась в опытах для определения массовой концентрации  $\theta_{C_3H_6O}$  паров C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O в пузырьках. Перед насыщением углекислым газом жидкость дегазировалась для удаления растворённого в жидкости воздуха. Для создания насыщенного раствора C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O-CO<sub>2</sub> и поддержания состояния насыщения использовался барботёр – 13 с высоким значением гидравлического сопротивления. Барботёр располагался на 20 мм ниже уровня рабочего участка, обеспечивая условия насыщения жидкости углекислым газом (рис. 3).

Изменяя величину тепловой нагрузки и время разогрева проволоочки, были получены требуемые значения температуры пристенного слоя жидкости. Измерение напряжения на рабочем участке и тока через него проводилось с помощью подключённого к компьютеру 14-ти разрядного АЦП. На рис. 4 показаны результаты тарировки для установленной в рабочий участок хромелевой проволоочки. Для температур до 310 К тарировка проводилась в жидком этаноле, а для температур до 420 К – в глицерине. Данные для зависимости температуры  $T$  от измеренного значения

удельной электропроводности  $\rho_{эл}$  материала проволоочки с точностью  $\pm 1,5$  К можно аппроксимировать полиномом второй степени в диапазоне температур от 280 до 420 К:

$$T = 3,632 \cdot 10^{15} \rho_{эл}^2 + 1,434 \cdot 10^9 \rho_{эл} - 322,161. \quad (2)$$

Для более узких диапазонов температур точность измерений удельной электропроводности составляет  $\pm 0,5$  К. Давление в жидкости  $P_ж$  рассчитывалось с учётом высоты столба жидкости  $h$ , температуры  $T_ж$  и давления в рабочей камере  $P_к$ :

$$P_ж = P_к + \rho_{C_3H_6O}(T_ж) \cdot g \cdot h,$$

где  $\rho_{C_3H_6O}$ , [кг/м<sup>3</sup>] – плотность жидкого C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O,  $g=9,8154$ , [м/с<sup>2</sup>] (значение для города Новосибирска). Давление в пузырьке  $P_b$  вычислялась по формуле с учётом кривизны пузырька и поверхностного натяжения:

$$P_b(T_ж) = P_ж + \sigma_{C_3H_6O}(T_ж) \cdot \left( \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} \right),$$

где  $\sigma_{C_3H_6O}$ , [Н/м] – коэффициент поверхностного натяжения C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O.

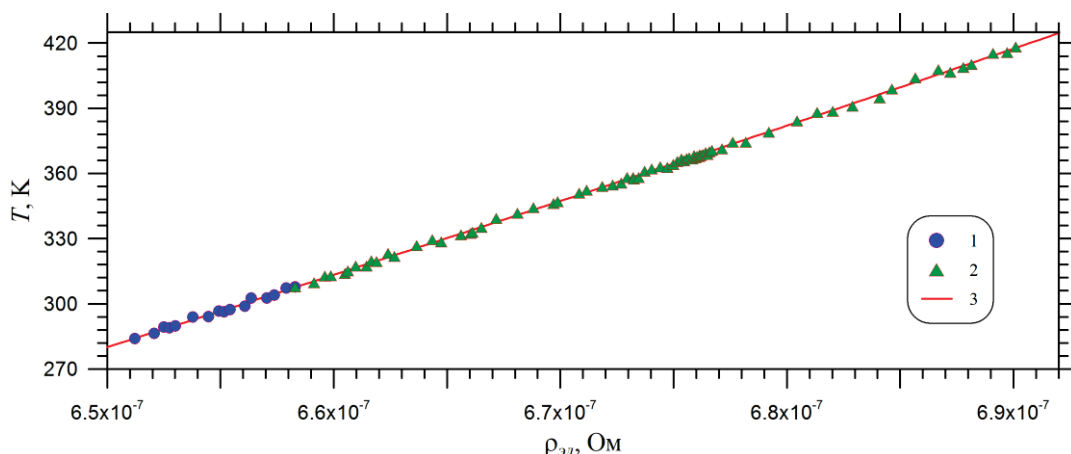


Рис. 4. Данные тарировочных измерений для определения зависимости температуры рабочего участка  $T$  от величины удельного электрического сопротивления  $\rho_{эл}$  проволоочки: 1 – тарировка в этаноле, 2 – тарировка в глицерине, 3 – зависимость (2)

Fig. 4. Data of calibration measurements to determine the dependence of the temperature of the working section  $T$  on the value of electrical resistivity  $\rho_{el}$  of the wire: 1 – calibration in ethanol, 2 – calibration in glycerol, 3 – dependence (2)

В экспериментах измерялись температура жидкости в объёме рабочей камеры  $T_0$ , температура проволоочки перед отключением электрообогрева  $T_w$ , температура проволоочки перед началом газовой выделению  $T_g$ , давление в жидкости на уровне рабочего участка  $P_w$  и на уровне перфорированной пластины  $P_p$ , количество тепла, выделившегося на проволоочке  $Q$  до момента отключения тока, время от момента включения до момента отключения электрообогрева проволоочки  $t_Q$ , время от момента отключения тока до момента начала газовой выделению  $t_{hg}$ , время от момента начала газовой выделению  $t_g$ . Численные значения теплофизических свойств для C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O, CO<sub>2</sub> в жидком и газообразном состоянии в зависимости от  $T$  и  $P$  вычислялись на основе справочных данных из работ [23, 24].

Для оценки степени метастабильности раствора при давлении  $P_w$  использовался безразмерный параметр  $\Psi$ :

$$\Psi = \frac{C_{CO_2}(P_w, T_0) - C_{CO_2}(P_w, T_g)}{C_{CO_2}(P_w, T_g)},$$

который показывает, во сколько раз избыточная концентрация  $[C_{CO_2}(P_w, T_0) - C_{CO_2}(P_w, T_g)]$  в перегретом слое при температуре  $T_g$  больше значения равновесной концентрации  $C_{CO_2}(P_w, T_g)$ .

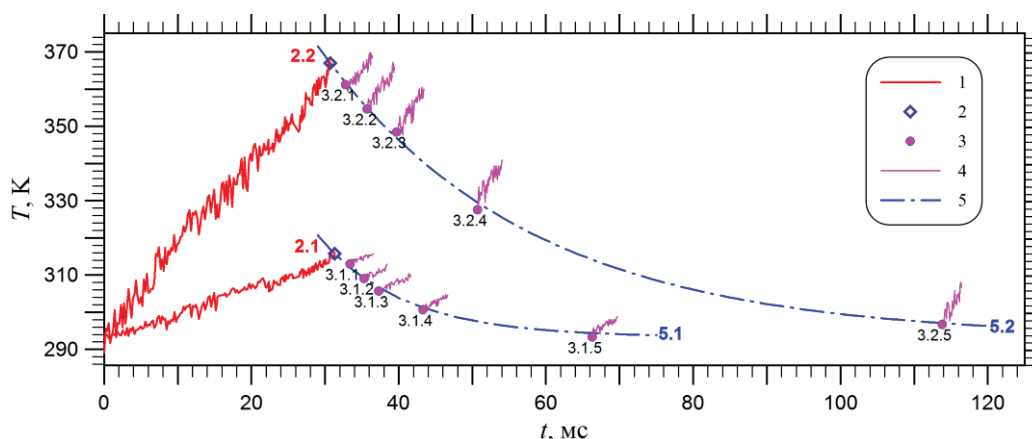
Для уменьшения влияния конвективных течений на степень насыщения в различных частях объёма жидкости эксперименты проводились при условии равенства температур жидкости, стенок рабочей ка-

меры и окружающего воздуха. При визуализации трудно отличить пузырьки газообразного CO<sub>2</sub> от паровых пузырьков C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O, поэтому исследование процесса газовыделения CO<sub>2</sub> проводилось в режиме охлаждения пристенного слоя жидкости после отключения тепловой нагрузки, когда вероятность вскипания жидкости снижается. Температура T<sub>g</sub>, при которой начинается газовыделение, в наших опытах непосредственно не измерялась, так как газовыделение начиналось после отключения электронагрева проволоочки рабочего участка. Поэтому для определения T<sub>g</sub> использовалась эмпирическая формула, полученная на основании результатов измерений температуры проволоочки при повторном включении электро-

нагрева проволоочки через различные моменты времени t<sub>g</sub> после первого отключения:

$$T_g = T_0 + \Delta T \cdot \exp \left[ -\frac{t_g}{7,8 \cdot \exp(\Delta T / 57,5)} \right], \quad (3)$$

где ΔT=(T<sub>w</sub>-T<sub>0</sub>) – перегрев проволоочки перед отключением электронагрева. На рис. 5 приведено сравнение результатов измерения температуры проволоочки в различные моменты времени t<sub>g</sub> после отключения электронагрева с расчётами по (3) для перегревов 22 и 74 К.



**Рис. 5.** Сравнение экспериментальных данных с зависимостью (3): 1 – режим разогрева проволоочки, 2 – момент отключения электронагрева проволоочки, 3 – момент повторного включения электронагрева проволоочки, 4 – режим повторного разогрева проволоочки, 5 – зависимость (3). 2.1 и 2.2 – перегрев рабочего участка на 22 и 74 К после отключения электронагрева; 3.1.1–3.1.5 – времена t<sub>g</sub> после отключения 2, 4, 6, 12, 35 мс; 3.2.1–3.2.5 – времена t<sub>g</sub> после отключения 2, 5, 9, 20, 83 мс; 5.1 и 5.2 – расчёты по (3) для перегревов 22 и 74 К

**Fig. 5.** Comparison of experimental data with dependence (3): 1 – wire heating mode, 2 – moment of switching off the electrical heating of the wire, 3 – moment of re-enabling the electric heating of the wire, 4 – mode of repeated heating of the wire, 5 – dependence (3). 2.1 and 2.2 – overheating of the working area by 22 and 74 K after switching off the electric heating; 3.1.1–3.1.5 – times t<sub>g</sub> after tripping 2, 4, 6, 12, 35 ms; 3.2.1–3.2.5 – times t<sub>g</sub> after tripping 2, 5, 9, 20, 83 ms; 5.1 and 5.2 – calculations according to (3) for overheatings of 22 and 74 K

Для разделения результатов с газовыделением CO<sub>2</sub> от результатов с кипением методика проведения экспериментов была адаптирована для определения массовой доли паров C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O в образующихся пузырьках

$$\theta_{C_3H_6O} = \frac{M_{C_3H_6O}}{M_{CO_2} + M_{C_3H_6O}} \quad (\text{где } M, [\text{кг}] - \text{масса})$$

по результатам обработки кадров видеосъёмки. Если температура жидкости в рабочей камере ниже температуры насыщения C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O, то величину θ<sub>C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O</sub> можно оценить, используя данные по изменению объёма пузырьков V<sub>b</sub> в различные моменты времени t<sub>g</sub> после начала газовыделения. При больших временах t<sub>g</sub> температура газа в пузырьке равна температуре жидкости в рабочей камере T<sub>0</sub>, а давление паров C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O равно давлению насыщения при температуре T<sub>0</sub>. Зная объём V<sub>b</sub>(T<sub>0</sub>) и давление в пузырьке около перфорированной пластины P<sub>b</sub>(T<sub>0</sub>, P<sub>v</sub>) = P<sub>CO<sub>2</sub></sub>(T<sub>0</sub>) + P<sub>C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O</sub><sup>насыщения</sup>(T<sub>0</sub>), используя уравнение состояния ρ<sub>CO<sub>2</sub></sub>[P<sub>CO<sub>2</sub></sub>(T<sub>0</sub>), T<sub>0</sub>], можно вычислить массу углекислого газа в пузырьке M<sub>CO<sub>2</sub></sub>:

$$M_{CO_2} = V_b(T_0) \cdot \rho_{CO_2}(P_{CO_2}(T_0), T_0).$$

Предполагая, что масса углекислого газа в пузырьке M<sub>CO<sub>2</sub></sub> постоянна, можно рассчитать вес паров C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O M<sub>C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O</sub> в пузырьке объёмом V<sub>b</sub>(T<sub>g</sub>) при температуре T<sub>g</sub> из системы уравнений (4)–(8):

$$P_b(T_g) = P_{CO_2}(T_g) + P_{C_3H_6O}(T_g) = P_w + \sigma_{C_3H_6O}(T_g) \cdot \left( \frac{1}{h_{b1}} + \frac{1}{h_{b2}} \right), \quad (4)$$

$$P_{CO_2}(T_g, V_b(T_g)) = \rho_{CO_2}(P_{CO_2}, T_g) \cdot R_{CO_2} \cdot T_g, \quad (5)$$

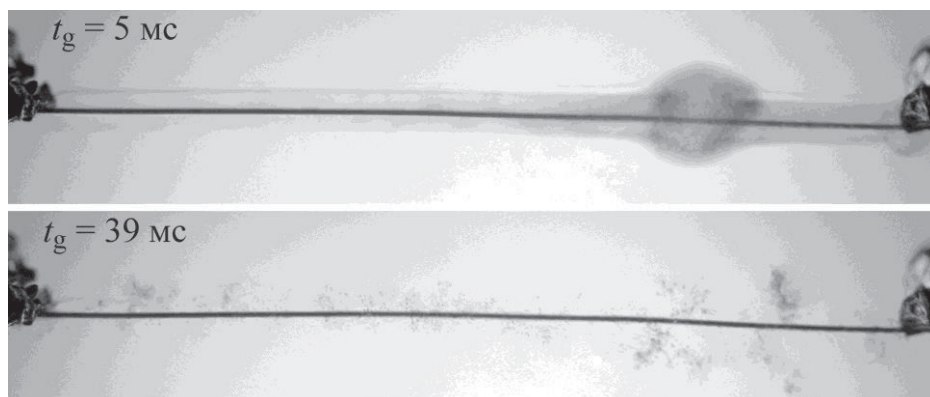
$$M_{CO_2} = V_b(T_g) \cdot \rho_{CO_2}(P_{CO_2}, T_g), \quad (6)$$

$$P_{C_3H_6O}(T_g, V_b(T_g)) = P_b(T_g) - P_{CO_2}(T_g) = \rho_{C_3H_6O}(P_{C_3H_6O}, T_g) \cdot R_{C_3H_6O} \cdot T_g, \quad (7)$$

$$M_{C_3H_6O} = V_b(T_g) \cdot \rho_{C_3H_6O}(P_{C_3H_6O}, T_g). \quad (8)$$

Здесь  $\rho''$ , [кг/м<sup>3</sup>] – плотность газа в пузырьке;  $P_w$ , [Па] – давление на уровне проволоочки;  $M_{CO_2}$ ,  $M_{C_3H_6O}$ , [кг] – масса газа CO<sub>2</sub> и паров C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O в пузырьке;  $R_{CO_2}$  и  $R_{C_3H_6O}$ , [Дж/К] – газовые постоянные для CO<sub>2</sub> и паров C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O. Сопоставляя экспериментальные данные с результатами расчётов для различных значений  $V_b(T_g)$  (4)–(8), можно определить значение концентрации  $\theta_{C_3H_6O}$  в пузырьке. При давлениях в рабочей камере  $P$  больше 80 кПа равновесное значение  $\theta_{C_3H_6O}$ , соответствующее температуре жидкости, устанавливается за время порядка 50 мс. Для этого была проведена серия экспериментов по газовыделению в растворе

C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O-N<sub>2</sub> (диметилкетон-азот). Так как растворимость N<sub>2</sub> в C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O в 50–80 раз меньше, чем растворимость CO<sub>2</sub>, то после вскипания в парогазовой полости весовая концентрация  $\theta_{N_2} \leq 1\%$ ,  $\theta_{C_3H_6O} \geq 99\%$ , тогда как равновесная концентрация паров C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O в пузырьке при температуре 295 К  $\theta_{C_3H_6O} \sim 20\%$ . На рис. 6 приведены фотографии парогазовой полости через 5 и 34 мс после вскипания. Видно, что уже через 30 мс в объёме жидкости остались только мелкие пузырьки размером порядка 60–200 мкм, для которых расчётные значения  $\theta_{C_3H_6O} \sim 20\text{--}30\%$ , что соответствует равновесным значениям.

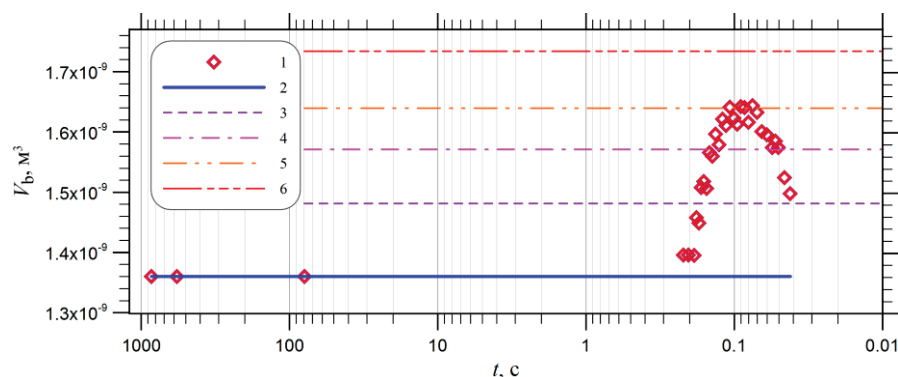


**Рис. 6.** Образование и конденсация парогазовой плёнки в растворе C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O-N<sub>2</sub> (весовая концентрация паров в плёнке:  $\theta_{C_3H_6O} \geq 99$ ,  $\theta_{N_2} \leq 0,01$ ). Фотографии рабочего участка для двух моментов времени  $t_g=5$  и 35 мс,  $t_{hg} = -89$  мс. Раствор C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O-N<sub>2</sub>,  $T_0=295,1$  К,  $T_g=387,0$  К,  $P_w=99,1$  кПа,  $Q=2140$  Дж,  $t_Q=182$  мс

**Fig. 6.** Formation and condensation of a gas-vapor film in C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O-N<sub>2</sub> solution (weight concentration of vapors in the film:  $\theta_{C_3H_6O} \geq 99$ ,  $\theta_{N_2} \leq 0,01$ ). Photographs of the working area for two time points  $t_g=5$  and 35 ms,  $t_{hg} = -89$  ms. C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O-N<sub>2</sub> solution,  $T_0=295,1$  K,  $T_g=387,0$  K,  $P_w=99,1$  kPa,  $Q=2140$  J,  $t_Q=182$  ms

На рис. 7 для примера показано, как изменяется объём пузырька углекислого газа  $V_b$ , растущего в перегретом слое раствора C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O-CO<sub>2</sub>, когда максимальная концентрация паров C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O в пузырьке порядка 11 %. Из набора всплывающих пузырьков выбирались те пузырьки, которые задерживались около перфорированной

пластины. Поэтому на графике используется обратный отсчёт времени. После отрыва пузырька от проволоочки концентрация паров C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O в пузырьке достигает равновесного значения  $\theta_{C_3H_6O} \sim 6\%$ , соответствующего температуре жидкости на уровне перфорированной



**Рис. 7.** Изменение объёма пузырька в зависимости от времени: 1) экспериментальные данные для раствора C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O-CO<sub>2</sub>,  $T_0=298,1$  К,  $T_g=324,8$  К,  $P_w=258,9$  кПа,  $Q=1067$  Дж,  $t_Q=56$  мс,  $\Psi=1,15$ ,  $V_b=1,36 \cdot 10^{-9}$  м<sup>3</sup> при  $t_g > 590$  с. Линии – расчёт объёма пузырька  $V_b$  из системы уравнений (4)–(8); 2)  $\theta_{C_3H_6O}=6\%$ ,  $T=298$  К; 3)  $\theta_{C_3H_6O}=6\%$ ,  $T=325$  К; 4)  $\theta_{C_3H_6O}=9\%$ ,  $T=325$  К; 5)  $\theta_{C_3H_6O}=11\%$ ,  $T=325$  К; 6)  $\theta_{C_3H_6O}=14\%$ ,  $T=325$  К

**Fig. 7.** Change in bubble volume depending on time: 1) experimental data for C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O-CO<sub>2</sub> solution,  $T_0=298,1$  K,  $T_g=324,8$  K,  $P_w=258,9$  kPa,  $Q=1067$  J,  $t_Q=56$  ms,  $\Psi=1,15$ ,  $V_b=1,36 \cdot 10^{-9}$  m<sup>3</sup> at  $t_g > 590$  s. The lines are the calculation of the bubble volume  $V_b$  from the system of equations (4)–(8); 2)  $\theta_{C_3H_6O}=6\%$ ,  $T=298$  K; 3)  $\theta_{C_3H_6O}=6\%$ ,  $T=325$  K; 4)  $\theta_{C_3H_6O}=9\%$ ,  $T=325$  K; 5)  $\theta_{C_3H_6O}=11\%$ ,  $T=325$  K; 6)  $\theta_{C_3H_6O}=14\%$ ,  $T=325$  K

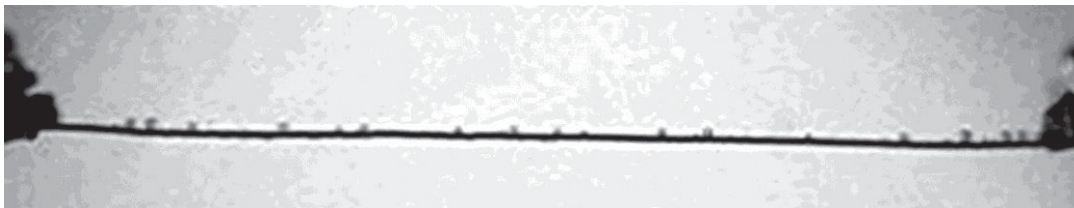


### Результаты и их обсуждение

Проведены эксперименты по изучению процессов выделения газообразного CO<sub>2</sub> из раствора C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O-CO<sub>2</sub> в метастабильном слое жидкости около проволоочки диаметром 0,28 мм. Опыты проводились в условиях естественной конвекции при давлении в рабочем объёме от 40 до 260 кПа.

На основе полученных экспериментальных результатов обнаружено, что даже при высоких уровнях перенасыщения жидкости газом режим независимого появления газовых пузырьков в различных точках на

проволочке при малом количестве активных центров газообразования маловероятен. В наших экспериментах такой режим наблюдался только при искусственном создании центров газообразования. На рис. 8 показана фотография рабочего участка со «случайным» распределением газовых пузырьков на поверхности проволоочки при значении безразмерного параметра  $\Psi=1,05$ . В этом случае газовыделение начиналось на микропузырьках, которые остались на поверхности проволоочки после отрыва газовых пузырьков в предыдущем опыте, проведённом 25 минут назад.

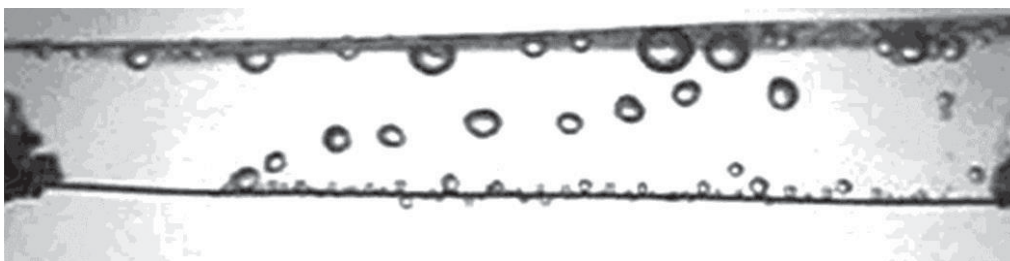


**Рис. 8.** Режим «случайного (независимого) появления газовых пузырьков на поверхности проволоочки». Фотография рабочего участка для момента времени  $t_g=40$  мс,  $t_{hg}=18$  мс. Раствор C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O-CO<sub>2</sub>,  $T_0=292,2$  К,  $T_g=297,6$  К,  $P_w=154,9$  кПа,  $Q=1225$  Дж,  $t_Q=42$  мс,  $\Psi=1,05$

**Fig. 8.** Mode of «random (independent) appearance of gas bubbles on the wire surface». Photograph of the working area for the time  $t_g=40$  ms,  $t_{hg}=18$  ms. C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O-CO<sub>2</sub> solution,  $T_0=292,2$  K,  $T_g=297,6$  K,  $P_w=154,9$  kPa,  $Q=1225$  J,  $t_Q=42$  ms,  $\Psi=1,05$

При значении безразмерного параметра метастабильности  $\Psi>1$  выделение газообразного CO<sub>2</sub> из раствора C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O-CO<sub>2</sub> происходит в режиме последовательного появления нового пузырька в зоне «чистой жидкости» около растущего пузыря «инициатора». Таким образом, увеличение размера области газовой выделительной на проволоочке происходит в режиме цепной

активации центров газовой выделительной. На рис. 9 приведена фотография рабочего участка, где показана зона газовой выделительной на проволоочке для режима цепной активации центров газовой выделительной через 507 мс после начала процесса выделения газообразного CO<sub>2</sub> при значении безразмерного параметра  $\Psi=1,63$ .

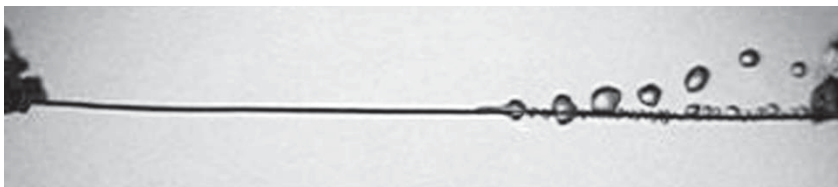


**Рис. 9.** Режим «цепной активации центров газовой выделительной на поверхности проволоочки». Фотография рабочего участка для момента времени  $t_g=507$  мс,  $t_{hg}=8$  мс. Раствор C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O-CO<sub>2</sub>,  $T_0=292,6$  К,  $T_g=311,5$  К,  $P_w=157,3$  кПа,  $Q=1108$  Дж,  $t_Q=38$  мс,  $\Psi=1,63$

**Fig. 9.** Mode of «chain activation of gas evolution centers on the wire surface». Photograph of the working area for the time  $t_g=507$  ms,  $t_{hg}=8$  ms. C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O-CO<sub>2</sub> solution,  $T_0=292,6$  K,  $T_g=311,5$  K,  $P_w=157,3$  kPa,  $Q=1108$  J,  $t_Q=38$  ms,  $\Psi=1,63$

Скорость распространения границы зоны газовой выделительной зависит от времени задержки появления нового пузырька от момента появления пузырька-«инициатора». Качественно можно выделить два режима газовой выделительной. Первый режим – это «медленная инициализация», когда новый пузырёк появляется после того, как пузырёк-«инициатор» успевает вырасти до размеров порядка диаметра проволоочки (большое время задержки и пузырёк «нанисан» на проволоочку или успевает перейти в режим отрыва от проволоочки). Пример положения зоны газовой выделительной для первого режима показан на рис. 9. Второй режим – это «быстрая инициализация», когда

новый пузырёк появляется на начальной стадии роста пузырька-«инициатора» и его размеры заметно меньше диаметра проволоочки (короткое время задержки и пузырёк «сидит» на проволоочке). На рис. 10 приведена фотография рабочего участка, где показана зона газовой выделительной на проволоочке для режима цепной активации центров газовой выделительной – «быстрая инициализация» – через 37 мс после начала процесса выделения газообразного CO<sub>2</sub> при значении безразмерного параметра  $\Psi=2,63$ . В этом случае скорость распространения границы зоны газовой выделительной более чем в два раза выше, чем для случая  $\Psi=1,63$ .

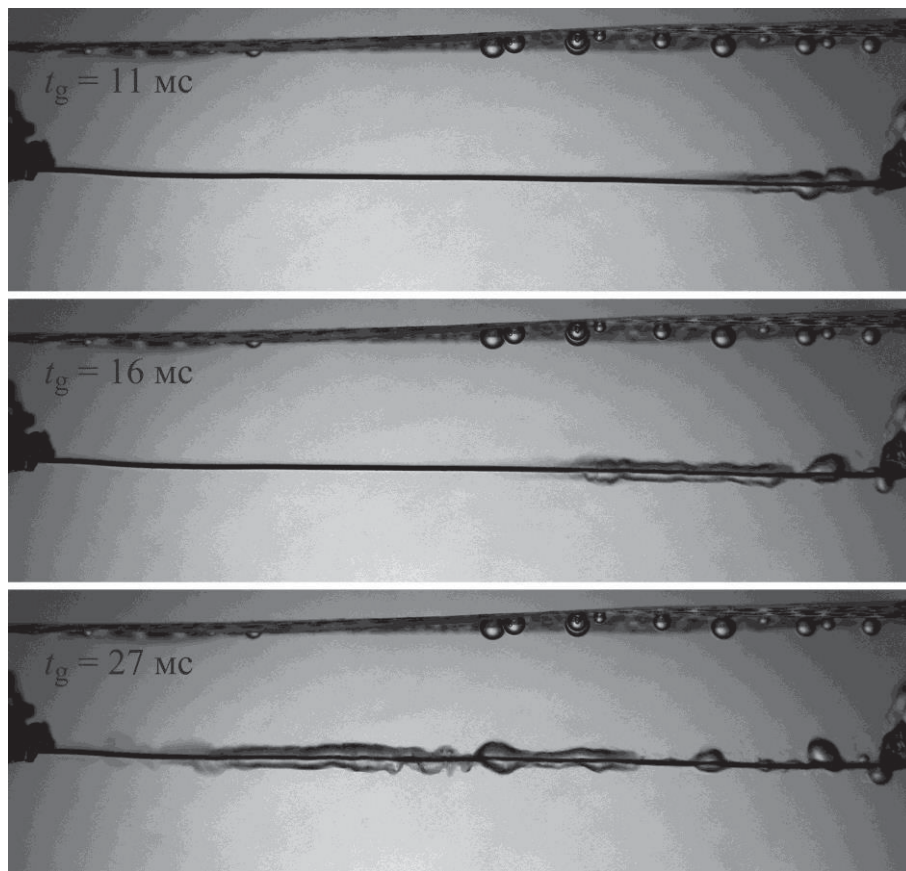


**Рис. 10.** Режим «цепной активации центров газовыделения на поверхности проволоочки», подрежим «быстрой инициализации». Фотография рабочего участка для момента времени  $t_g=37$  мс,  $t_{hg}=3$  мс. Раствор C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O-CO<sub>2</sub>,  $T_0=291,9$  К,  $T_g=334,3$  К,  $P_w=151,6$  кПа,  $Q=1603$  Дж,  $t_Q=159$  мс,  $\Psi=2,43$

**Fig. 10.** Mode of «chain activation of gas evolution centers on the surface of the wire», «quick initialization» submode. Photograph of the working area for the time  $t_g=37$  ms,  $t_{hg}=3$  ms. C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O-CO<sub>2</sub> solution,  $T_0=291,9$  K,  $T_g=334,3$  K,  $P_w=151,6$  kPa,  $Q=1603$  J,  $t_Q=159$  ms,  $\Psi=2,43$

При давлении в рабочей камере  $P$  больше 140 кПа и при значении безразмерного параметра  $\Psi > 3$  процесс выделения газообразного CO<sub>2</sub> из раствора C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O-CO<sub>2</sub> качественно изменяется. Увеличение размеров области газовыделения происходит не за счёт появления новых центров газовыделения, а в результате увеличения объёма газовой полости. При этом скорость роста газовой полости вдоль проволоочки на порядок больше скорости роста в поперечном направлении, в результате чего на рабочем участке формируется газовая плёнка. Концентрация паров C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O в такой плёнке  $\theta_{C_3H_6O} \leq 13$  %. Поэтому можно предположить, что при  $\Psi > 3$  выделение газообразного CO<sub>2</sub> из раствора C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O-CO<sub>2</sub> может происходить в ре-

жиме «плёночного газовыделения». В этом режиме, по всей видимости, в жидкости около межфазной границы формируется ступенчатый профиль распределения концентрации CO<sub>2</sub>, а не экспоненциальный, как для случая диффузионного роста газового пузырька в перенасыщенном растворе. На рис. 11 приведены три фотографии рабочего участка в различные моменты времени, демонстрирующие процесс выделения CO<sub>2</sub> в режиме «плёночного газовыделения» при значении безразмерного параметра  $\Psi=7,64$ . Следует отметить, что в этом режиме продольная скорость роста газовой плёнки больше скорости распространения границы зоны газовыделения для режима «быстрая инициализация», представленного на рис. 10.

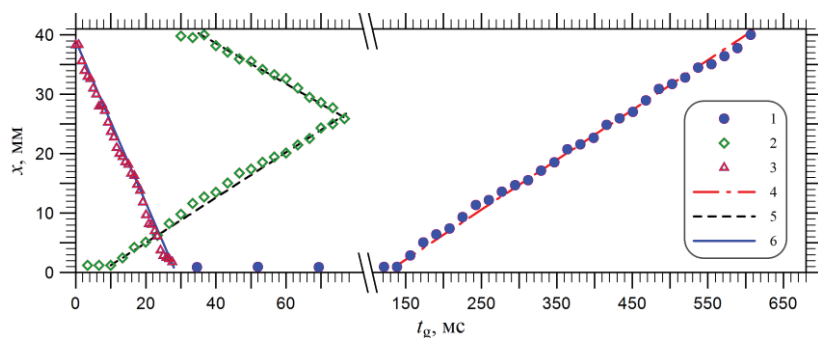


**Рис. 11.** Режим «плёночного газовыделения». Фотографии рабочего участка для трёх моментов времени  $t_g=11$ , 16 и 27 мс,  $t_{hg}=7$  мс. Раствор C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O-CO<sub>2</sub>,  $T_0=294,3$  К,  $T_g=369,0$  К,  $P_w=161,2$  кПа,  $Q=1194$  Дж,  $t_Q=90$  мс,  $\Psi=7,64$

**Fig. 11.** Mode of «film gas evolution». Photographs of the working area for three time points  $t_g=11$ , 16 and 27 ms,  $t_{hg}=7$  ms. C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O-CO<sub>2</sub> solution,  $T_0=294,3$  K,  $T_g=369,0$  K,  $P_w=161,2$  kPa,  $Q=1194$  J,  $t_Q=90$  ms,  $\Psi=7,64$

Сопоставляя данные по изменению размеров зоны газовой выделению для режима цепной активации центров газовой выделению с изменением длины газовой плёнки было замечено, что скорости движения области, занятой газовой выделением  $\text{CO}_2$ , отличаются на порядок для различных режимов. На рис. 12 показано, как со временем изменяются границы зоны газовой выделению  $x$  на рабочем участке для трёх режимов выделения газообразного  $\text{CO}_2$  из раствора  $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}-\text{CO}_2$ . Видно, что скорость движения границы

для всех режимов практически постоянна во времени (на графике проведены линии, описывающие движение с постоянной скоростью 0,08, 0,34 и 1,3 м/с). Наибольшая скорость 1,3 м/с соответствует данным для режима «плёночного газовой выделению», а наименьшая 0,08 м/с – данным для режима «медленной инициализации». Для режимов «медленной инициализации» и «быстрой инициализации» скорость движения границы зоны газовой выделению различается в три раза: 0,08 и 0,34 м/с.

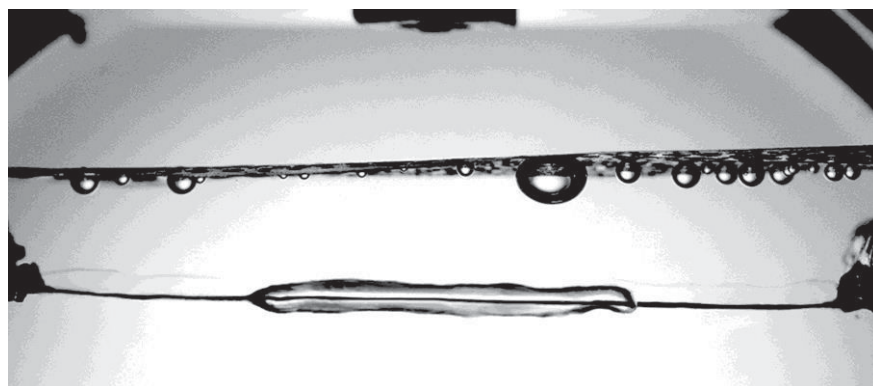


**Рис. 12.** Изменение границы зоны газовой выделению на рабочем участке для различных режимов выделения газа. Раствор  $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}-\text{CO}_2$ , 1) режим «медленной инициализации»  $T_0=292,6 \text{ K}$ ,  $T_g=326,1 \text{ K}$ ,  $\Psi=1,63$ ; 2) режим «быстрой инициализации»  $T_0=291,9 \text{ K}$ ,  $T_g=334,3 \text{ K}$ ,  $\Psi=2,43$ ; 3) режим «плёночного газовой выделению»  $T_0=297,5 \text{ K}$ ,  $T_g=361,1 \text{ K}$ ,  $\Psi=3,72$ ; 4–6) скорость движения границы газовой выделению: 0,08; 0,34; 1,3 м/с, соответственно

**Fig. 12.** Changing the boundary of the gas release zone in the working area for different modes of gas release.  $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}-\text{CO}_2$  solution, 1) «slow initialization» mode  $T_0=292,6 \text{ K}$ ,  $T_g=326,1 \text{ K}$ ,  $\Psi=1,63$ ; 2) «fast initialization» mode  $T_0=291,9 \text{ K}$ ,  $T_g=334,3 \text{ K}$ ,  $\Psi=2,43$ ; 3) film outgassing mode  $T_0=297,5 \text{ K}$ ,  $T_g=361,1 \text{ K}$ ,  $\Psi=3,72$ ; 4–6) speed of movement of gas evolution border: 0,08; 0,34; 1,3 m/s, respectively

Газовые плёнки – это неустойчивая структура, и со временем на поверхности газовой плёнки развиваются волны большой амплитуды, что приводит к разрыву плёнки и формированию на проволочке отдельных пузырей. Ранее упоминалось, что газовой выделению трудно отличить от кипения, при определенных условиях эти процессы могут сосуществовать вместе. В экспериментах при давлении в рабочей камере порядка 100–200 кПа наблюдались плёнки, в которых концентрация паров  $\theta_{\text{C}_3\text{H}_6\text{O}}$  и газа  $\theta_{\text{CO}_2}$  были соизмеримы между собой (рис. 13). Наблюдаемые парогазовые плёнки отличались большей устойчивостью поверх-

ности, чем газовые, где  $\theta_{\text{C}_3\text{H}_6\text{O}} \leq 15 \%$ . По-видимому, это связано с тем, что неустойчивость поверхности газовой плёнки возникает вследствие охлаждения газа из-за контакта с более холодными слоями жидкости при расширении плёнки в поперечном направлении. Присутствие в плёнке паров жидкости поддерживает температуру границы на уровне температуры насыщения, а наличие неконденсирующегося газа замедляет процесс конденсации паров, что в итоге и приводит к более высокой степени устойчивости поверхности парогазовых плёнок.



**Рис. 13.** Парогазовая плёнка в растворе  $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}-\text{CO}_2$  ( $\theta_{\text{C}_3\text{H}_6\text{O}} \approx 65 \%$ , ( $\theta_{\text{CO}_2} \approx 35 \%$ ). Фотография рабочего участка для момента времени  $t_g=12 \text{ ms}$ ,  $t_{hg}=-3 \text{ ms}$ . Раствор  $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}-\text{CO}_2$ ,  $T_0=291,1 \text{ K}$ ,  $T_g=321,4 \text{ K}$ ,  $P_w=98,9 \text{ kPa}$ ,  $Q=2608 \text{ Дж}$ ,  $t_Q=216 \text{ ms}$ ,  $\Psi=1,67$

**Fig. 13.** Vapor-gas film in  $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}-\text{CO}_2$  solution ( $\theta_{\text{C}_3\text{H}_6\text{O}} \approx 65 \%$ , ( $\theta_{\text{CO}_2} \approx 35 \%$ ). Photograph of the working area for the time  $t_g=12 \text{ ms}$ ,  $t_{hg}=-3 \text{ ms}$ .  $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}-\text{CO}_2$  solution,  $T_0=291,1 \text{ K}$ ,  $T_g=321,4 \text{ K}$ ,  $P_w=98,9 \text{ kPa}$ ,  $Q=2608 \text{ J}$ ,  $t_Q=216 \text{ ms}$ ,  $\Psi=1,67$

Таким образом, полученные экспериментальные данные указывают на то, что особенности процесса выделения газообразного CO<sub>2</sub> зависят от степени метастабильности раствора C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O-CO<sub>2</sub>, когда переход в метастабильное состояние происходит при быстром увеличении температуры раствора.

#### Заключение

Показано, что при малом количестве активных центров газообразования даже при высоких уровнях метастабильности раствора C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O-CO<sub>2</sub> режим независимо появления газовых пузырьков CO<sub>2</sub> в различных точках на проволочке маловероятен. Показано, что при значении безразмерного параметра метастабильности  $1 < \Psi < 3$  выделение газообразного CO<sub>2</sub> из раствора C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O-CO<sub>2</sub> происходит в режиме последовательного появления нового пузырька в зоне «чистой жидкости» около растущего пузырька-«инициатора»; размер области газовыделения на проволочке увеличивается в режиме цепной активации центров газовыделения; изменяется скорость движения границы зоны газовыделе-

ния вдоль нагревателя в зависимости от задержки по времени появления нового пузырька от момента появления пузырька-«инициатора». Показано, что при значении безразмерного параметра метастабильности  $\Psi > 3$  и давлении в объёме больше 140 кПа выделение газообразного CO<sub>2</sub> из раствора C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O-CO<sub>2</sub> происходит в режиме «плёночного газовыделения», при котором увеличение размеров области газовыделения происходит не за счёт появления новых центров газовыделения, а в результате увеличения объёма газовой полости. При этом скорость роста газовой полости вдоль проволочки на порядок больше скорости роста в поперечном направлении, в результате чего на рабочем участке формируется газовая плёнка. Показано, что скорости движения области, занятой газообразным CO<sub>2</sub>, различаются на порядок для различных режимов при том, что скорость движения границы газовыделения для всех режимов практически постоянна во времени.

*Работа выполнена в рамках государственного контракта Института теплофизики СО РАН.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методы увеличения нефтеотдачи на месторождениях Югры / С.Г. Кузьменков, Р.Ш. Аюпов, М.В. Новиков, В.И. Исаев, Г.А. Лобова, П.А. Стулов, В.С. Бутин, Е.О. Астапенко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 4. – С. 96–106. DOI: 10.18799/24131830/2020/4/2597.
2. Исследование фильтрационных характеристик и эффективности вытеснения нефти при заводнении морского месторождения с тяжелой нефтью / Се Кун, Мэй Цзе, Нажису, В.И. Ерофеев, Су Ченг, Цзян Вэйдун, Лу Сянго // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 10. – С. 105–114. DOI: 10.18799/24131830/2020/10/2855.
3. Наговицына Н.П., Дерендяев Р.А. Формирование методологического подхода исследования поверхностно-активных веществ для увеличения нефтеотдачи пластов (на примере месторождения Удмуртской республики) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 7. – С. 202–211. DOI: 10.18799/24131830/2020/7/2730.
4. Фарунцев С.Д. Опыт применения методов математического моделирования для построения комплексных моделей управления объектами промышленной подготовки нефти // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 12. – С. 7–21. DOI: 10.18799/24131830/2021/12/3344.
5. Применение углекислого газа в добыче нефти / В. Балинт, А. Бан, Ш. Долешал, П.И. Забродин, Я. Терек. – М.: Недра, 1977. – 240 с.
6. Трухина О.С., Синцов И.А. Опыт применения углекислого газа для повышения нефтеотдачи пластов // Успехи современного естествознания. – 2016. – № 3. – С. 205–209.
7. Сургучев М.Л. Вторичные и третичные методы увеличения нефтеотдачи пластов. – М.: Недра, 1985. – 308 с.
8. Тимошенко В.И., Кнышенко Ю.В. Влияние газонасыщенности жидкости на неустановившиеся процессы течения в трубопроводных системах // Техническая механика. – 2010. – № 4. – С. 34–43.
9. Ширшова А.В., Данько М.Ю. Рост и диссоциация газогидратов в водонефтяных эмульсиях // Известия вузов. Нефть и газ. – 2011. – № 5. – С. 95–101.
10. Волков П.В., Большунов А.В., Мостокалов К.А. Методическое и алгоритмическое обеспечение автоматизированной экспериментальной установки удаления гидратов в газоконденсатной смеси в трубопроводе // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 4. – С. 132–139. DOI: 10.18799/24131830/2021/04/3156.
11. Иванова М.С., Вишнецкая М.В., Томский К.О. Очистка газовых выбросов от CO<sub>2</sub> в среде трифторуксусной кислоты при добыче нефти и газа // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 5. – С. 57–63. DOI: 10.18799/24131830/2020/5/2636.
12. Бутаков В.И., Слагода Е.А., Тихонравова Я.В. Содержание и состав атмосферных и парниковых газов в подземных льдах разного генезиса // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 11. – С. 22–36. DOI: 10.18799/24131830/2021/11/3082.
13. Reducing uncertainties in decadal variability of the global carbon budget with multiple datasets / W. Lia, P. Ciaisa, Y. Wang, S. Penga, G. Broqueta, A.P. Ballantyneb, J.G. Canadellc, L. Cooperb, P. Friedlingsteind, C.L. Quéreé, R.B. Myrenif, G.P. Petersg, S. Piao, J. Pongratzi // PNAS Early Edition. – 2016. – № 1603956113. – P. 1–11. DOI: 10.1073/pnas.1603956113.
14. Шагапов В.Ш., Галева Г.Я. Взрывное истечение газонасыщенной жидкости из каналов и емкостей // Прикладная механика и техническая физика. – 1999. – Т. 40. – № 1. – С. 64–73.
15. Бахмат Г.В., Корнеева Н.С., Пахаруков Ю.В. Расчеты интенсивности газовыделения при выходе системы «жидкость-газ» из области неустойчивости // Вестник Тюменского государственного университета. Серия Физико-математические науки. Информатика. – 2011. – № 7. – С. 59–63.
16. Vogt H., Aras O., Balzer R.J. The limits of the analogy between boiling and gas evolution at electrodes // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2004. – V. 47. – P. 787–795. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2003.07.023.
17. Zhukov S.A., Barelko V.V. Dynamic and structural aspects of the processes of single-phase convective heat transfer metastable regime decay and bubble boiling formation // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1992. – V. 35. – № 4. – P. 759–775. DOI: 10.1016/0017-9310(92)90244-M
18. Some peculiarities of heat transfer crisis in alkali metals boiling under free convection / S.S. Kutateladze, V.N. Moskvicheva, G.I. Bobrovich, N.N. Mamontova, B.P. Avksentyuk // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1973. – V. 16. – P. 705–713. DOI: 10.1016/0017-9310(73)90084-7
19. Vapor-liquid equilibrium, liquid density and excess enthalpy of the carbon dioxide + acetone mixture: Experimental measurements and correlations / G.E. Ramirez-Ramos, Y. Zgar, D. Salavera, Y. Coulier, K. Ballerat-Busserolles, A. Coronas // Fluid Phase Equilibria. – 2021. – V. 532. – P. 112915.1–112915.13.
20. High-pressure vapor-liquid equilibria of some carbon dioxide + organic binary systems / M.J. Lazzaroni, D. Bush, J.S. Brown,

- C.A. Eckert // Journal Chemical Engineering Data. – 2005. – V. 50. – P. 60–65.
21. Vapor-liquid equilibria of the carbon dioxide + acetone system at pressures from (2.36 to 11.77) MPa and temperatures from (333.15 to 393.15) K / F. Han, Y. Xue, Y. Tian, X. Zhao, L. Chen // Journal Chemical Engineering Data. – 2005. – V. 50. – P. 36–39.
22. Adrian T., Maurer G. Solubility of carbon dioxide in acetone and propionic acid at temperatures between 298 K and 333 K // Journal Chemical Engineering Data. – 1997. – V. 42. – P. 668–672.
23. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, 1972. – 721 с.
24. Edwards D.K. Heat exchanger design handbook. V. 5: Physical Properties. – New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1983. – 725 p.

*Поступила 18.04.2022 г.*

*Прошла рецензирование 09.11.2022 г.*

#### **Информация об авторах**

**Дехтярь Р.А.**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт теплофизики СО РАН.

**Овчинников В.В.**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт теплофизики СО РАН.

UDC 544.015.22

## STUDY OF THE DYNAMICS OF GASEOUS CO<sub>2</sub> RELEASE IN A SUPERHEATED WALL LAYER OF C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O-CO<sub>2</sub> SOLUTION

Ruslan A. Dekhtyar<sup>1</sup>,  
dekhtyar@itp.nsc.ru

Valeriy V. Ovchinnikov<sup>1</sup>,  
avks@itp.nsc.ru

<sup>1</sup> S.S. Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS,  
1, Acad. Lavrentiev avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

**The relevance** of the work is caused by the fact that one of the ways to increase the oil recovery factor is using technologies with carbon dioxide as a displacing agent. Emission and absorption of carbon dioxide are the main factors affecting the rate of climate change on Earth. **The purpose** of the work is to study the features of carbon dioxide evolution in a highly superheated (metastable) layer of a C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O-CO<sub>2</sub> solution.

**Object:** solution of carbon dioxide CO<sub>2</sub> in dimethyl ketone C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O.

**The methods:** the method of visualization of gas release in a liquid. To create a layer of a metastable liquid, pulsed heating of a thin wire was carried out. Based on the results of digital processing of photo and video materials, the sizes and shape of the resulting carbon dioxide bubbles and the speed of movement of the boundary of the gas release zone along the wire were determined. It is difficult to distinguish bubbles of gaseous CO<sub>2</sub> from vapor bubbles of C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O on the frames. Therefore, to separate the data on boiling and gas release, the mass fraction of C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O vapors in the vapor-gas cavity was determined from the change in the bubble volume and using the equation of state for CO<sub>2</sub> and C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O.

**The results.** Depending on the degree of metastability of the near-wall layer of the C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O-CO<sub>2</sub> solution at pressure in the working volume from 40 to 260 kPa, experimental data were obtained, which made it possible to identify several modes of gas evolution. It is shown that at a low degree of metastability of the near-wall liquid layer, the evolution of gaseous CO<sub>2</sub> occurs in the mode of successive chain activation of gas evolution centers. At a high degree of metastability and pressure in the volume of more than 140 kPa, the evolution of gaseous CO<sub>2</sub> occurs in the mode of «film gas evolution». For all gas release modes, the rate of movement of the gas release boundary is practically constant in time, but for different gas release modes, the velocity values differ by an order of magnitude.

### Key words:

Heterogeneous gas release, boiling, metastability, solution, phase transition.

The research was carried out within the State contract of Institute of Thermophysics SB RAS.

### REFERENCES

- Kuzmenkov S.G. Enhanced oil recovery methods at fields of Yugra. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 4, pp. 96–106. In Rus.
- Xie K. Study on seepage characteristics and displacement efficiency of water flooding in offshore heavy oil reservoir. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 10, pp. 105–114. In Rus.
- Nagovitsyna N.P., Derendyaev R.A. Formation of a methodological approach for research of surface-active substances to enhanced oil recovery (on the example of deposit of the Udmurt republic). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 7, pp. 202–211. In Rus.
- Faruntsev S.D. Experience in application of mathematical modeling methods for elaboration of integrated control models of field treatment facilities. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 12, pp. 7–21. In Rus.
- Balint V., Ban A., Doleshal Sh., Zabrodin P.I., Terek Ya. *Primenenie uglekislogo gaza v dobyche nefii* [Application of carbon dioxide in oil production]. Moscow, Nedra Publ., 1977. 240 p.
- Trukhina O.S., Sintsov I.A. Opyt primeneniya uglekislogo gaza dlya povysheniya nefteotdachi plastov [Experience of carbon dioxide usage for enhanced oil recovery]. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya*, 2016, no. 3, pp. 205–209.
- Surguchev M.L. *Vtorichnye i tretichnye metody uvelicheniya nefteotdachi plastov* [Secondary and tertiary methods for enhanced oil recovery]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 308 p.
- Timoshenko V.I., Knyshenko Yu.V. Vliyaniye gazonasyschennosti zhidkosti na neustanovivshiesya protsessy techeniya v truboprovodnykh sistemakh [Influence of liquid gas saturation on unsteady flow processes in pipeline systems]. *Tekhnicheskaya mekhanika*, 2010, no. 4, pp. 34–43.
- Shirshova A.V., Danko M.Yu. Rost i dissotsiatsiya gazogidratov v vodoneftyanykh emulsiyakh [Growth and dissociation of gas hydrates in water-oil emulsions]. *Izvestiya vuzov. Neft i gaz*, 2011, no. 5, pp. 95–101.
- Volkov P.V., Bolshunov A.V., Mostokalov K.A. Methodological and algorithmic support of an automated experimental installation for removing hydrates in a gas-condensate fluid in a pipeline. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 4, pp. 132–139. In Rus.
- Ivanova M.S., Vishnetskaya M.V., Tomsky K.O. Cleaning gas emissions from CO<sub>2</sub> in the environment of trifluoroacetic acid during oil and gas production. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 5, pp. 57–63. In Rus.
- Butakov V.I., Slagoda E.A., Tikhonravova Ya.V. Content and composition of atmospheric and greenhouse gases in underground ice of different genesis. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 11, pp. 22–36. In Rus.
- Lia W., Ciaisa P., Wanga Y., Penga S., Broqueta G., Ballantyne A.P., Canadelle J.G., Cooper L., Friedlingsteind P., Quéré C.L., Mylenif R.B., Peters G.P., Piao S., Pongratzi J. Reducing uncertainties in decadal variability of the global carbon budget with multiple datasets. *PNAS Early Edition*, 2016, no. 1603956113, pp. 1–11.
- Shagapov V.Sh., Galeeva G.Ya. Vzryvnoe istecheniye gazonasyschennoy zhidkosti iz kanalov i emkostey [Explosive outflow of gas-saturated liquid from channels and containers]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*, 1999, vol. 40, no. 1, pp. 64–73.

15. Bakhmat G.V., Korneeva N.S., Pakharukov Yu.V. Raschety intensivnosti gazovydeleniya pri vykhode sistemy «zhidkost–gaz» iz oblasti neustoychivosti [Calculations of the intensity of gas release at the exit of the "liquid-gas" system from the region of instability]. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvenogo universiteta. Seriya Fiziko-matematicheskiye nauki. Informatika*, 2011, no. 7, pp. 59–63.
16. Vogt H., Aras O., Balzer R.J. The limits of the analogy between boiling and gas evolution at electrodes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, vol. 47, pp. 787–795.
17. Zhukov S.A., Barelko V.V. Dynamic and structural aspects of the processes of single-phase convective heat transfer metastable regime decay and bubble boiling formation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1992, vol. 35, no. 4, pp. 759–775.
18. Kutateladze S.S., Moskevicheva V.N., Bobrovich G.I., Mamontova N.N., Avksentyuk B.P. Some peculiarities of heat transfer crisis in alkali metals boiling under free convection. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1973, vol. 16, pp. 705–713.
19. Ramirez-Ramos G.E., Zgar Y., Salavera D., Coulier Y., Ballerat-Busserolles K., Coronas A. Vapor-liquid equilibrium, liquid density and excess enthalpy of the carbon dioxide + acetone mixture: experimental measurements and correlations. *Fluid Phase Equilibria*, 2021, vol. 532, pp. 112915.1–112915.13.
20. Lazzaroni M.J., Bush D., Brown J.S., Eckert C.A. High-pressure vapor-liquid equilibria of some carbon dioxide + organic binary systems. *Journal Chemical Engineering Data*, 2005, vol. 50, pp. 60–65.
21. Han F., Xue Y., Tian Y., Zhao X., Chen L. Vapor-liquid equilibria of the carbon dioxide + acetone system at pressures from (2.36 to 11.77) MPa and temperatures from (333.15 to 393.15) K. *Journal Chemical Engineering Data*, 2005, vol. 50, pp. 36–39.
22. Adrian T., Maurer G. Solubility of carbon dioxide in acetone and propionic acid at temperatures between 298 K and 333 K. *Journal Chemical Engineering Data*, 1997, vol. 42, pp. 668–672.
23. Vargaftik N.B. *Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey* [Handbook on thermophysical properties of gases and liquids]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 721 p.
24. Edwards D.K. *Heat exchanger design handbook. Vol. 5: Physical Properties*. New York, Hemisphere Publ. Corporation, 1983. 725 p.

*Received: 18 April 2022.  
Reviewed: 9 November 2022.*

#### Information about the authors

**Ruslan A. Dekhtyar**, Cand. Sc., senior researcher, S.S. Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS.

**Valeriy V. Ovchinnikov**, Cand. Sc., senior researcher, S.S. Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS.

УДК 622.692.4:532.542.4

## СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОТИВОТУРБУЛЕНТНЫХ ПРИСАДОК

Банерджи Таноя<sup>1</sup>,  
tanoyabaner@mail.ru

Шестаков Роман Алексеевич<sup>1</sup>,  
shestakov.r@gubkin.ru

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

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью повышения экономической эффективности перекачки нефти и нефтепродуктов путем снижения гидравлических потерь и выноса образовавшихся водных скоплений с использованием противотурбулентных присадок. Этот способ применения присадок является энергосберегающим, минимизирующим эксплуатационные затраты на транспортировку нефти и нефтепродуктов.

**Цель:** определить и предложить применение противотурбулентных присадок в качестве способа увеличения скорости потока перекачиваемой среды для выноса образовавшихся локальных неподвижных водных скоплений на локальных низинах профиля трубопровода, приводящих к уменьшению его эффективного диаметра и повышению гидравлических потерь.

**Объекты:** скопившиеся водные образования на низменном участке линейной части магистрального нефтепродуктопровода.

**Методы:** математический анализ влияния противотурбулентной присадки для оценки перспективы ее энергоэффективного использования в качестве способа увеличения скорости потока транспортируемой среды, технико-экономический расчет, отражающей стоимость противотурбулентной присадки и электроэнергии при перекачке.

**Результаты.** Выполнен анализ способов вычисления выносной скорости потока транспортируемой среды. Предложена методика вычисления концентрации противотурбулентной присадки, необходимой для достижения потоком жидкости выносной скорости, при невозможности повышения допустимого рабочего напора из-за ограниченной несущей способности трубопровода. Рассмотрено влияние возрастания эффективного диаметра трубопровода, что является побочным следствием влияния противотурбулентной присадки, которое, с одной стороны, повышает гидравлическую эффективность присадки, а с другой стороны, снижает потребляемую мощность электроэнергии после прекращения ввода присадки. Приведены результаты вычисления экономической целесообразности применения противотурбулентной присадки и сравнительный анализ стоимости перекачки с противотурбулентной присадкой и без нее. Рассмотрены соответствующие аналитические зависимости для оценки эффективности.

### Ключевые слова:

Присадки, гидравлическая эффективность, рельефный трубопровод, водные скопления, очистка трубопровода, скорость выноса, технико-экономический расчет.

### Введение

Нефтепродукты, перекачиваемые по трубопроводам, проходят контроль качества, при котором регламентируется содержание воды, которое зависит от многих факторов: температуры топлива, атмосферного давления, влажности, условий хранения и т. д. При определенных процессах, например, может происходить взаимодействие микрокапель воды, содержащихся в топливе, происходит их укрупнение и накопление на наклонных участках трубопровода в виде условно неподвижных скоплений, что приводит к возрастанию гидравлического сопротивления. В качестве иллюстрации на рис. 1 с учетом профиля трубопровода синим цветом показано объемное содержание воды, которая скапливается на подъемных участках трубопровода.



Рис. 1. Схематический профиль трубопровода со скоплениями воды

Fig. 1. Schematic pipeline profile with water accumulations

Для выноса скоплений воды необходимым условием является достижение потоком выносной скорости, которая зависит от объема скопления. В целях повышения полноты удаления малых водных образований, для которых скорость выноса превышает максимальную скорость, развиваемую транспортируемой средой (лимитирующим фактором в повышении скорости путем увеличения напора является несущая способность трубопровода), в настоящей статье предлагается применить известный способ повышения скорости потока без повышения напора – применение противотурбулентных присадок (ПТП). Причем при увеличении скорости транспортируемой среды увеличивается растворимость макромолекул ПТП, что повышает эффект Томса [1] и приводит к тому, что несущая способность трубопровода меньше ограничивает максимальную скорость потока в трубопроводе. Более того, ПТП активнее всего работают в пристенной области, т. е. там, где скапливается вода. Это вызвано тем, что при турбулентном режиме течения жидкости поток условно можно разделить на пристенную зону и зону турбулентного ядра [2]. А в работе [3] установлено, что из-за действия силы вязкого



трения снижение турбулентного сопротивления фактически происходит в пристенной области трубы.

Для транспортировки заданного объема нефтепродукта с применением ПТП представляется целесообразной организация двухстадийной перекачки. На первой стадии производится частичная очистка трубопровода (вынос водных образований). На второй стадии перекачки снижаются затраты электроэнергии как за счет прямого эффекта от ПТП, так и за счет очистки на первом этапе. ПТП позволяет уменьшить гидравлическое сопротивление более чем на 20 % [4]. При этом эффект очистки будет сохраняться и некоторое время после прекращения ввода присадки.

#### Материалы и методы

Первая попытка по созданию общей теории образования паровых и «водяных» мешков в рельефных трубопроводах была предпринята И.А. Чарным [5]. Получена формула (1) для расчета критической скорости, при которой происходит вынос водного скопления:

$$v_{\text{вын}} = k' \sqrt{\frac{2gd}{\lambda} \frac{\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{н}}}{\rho_{\text{н}}} \sin \alpha}, \quad (1)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $d$  – внутренний диаметр трубопровода;  $\rho_{\text{в}}, \rho_{\text{н}}$  – плотность воды и нефти соответственно;  $\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления на границе «нефть – стенка трубы»;  $\alpha$  – угол наклона восходящего участка трубопровода к горизонту;  $k'$  – поправочный коэффициент в теоретических решениях И.А. Чарного ( $k'=1$  по результатам экспериментов В.К. Касперовича и В.И. Черникина [6] и  $k' \approx 1/3$  по более поздним работам В.К. Касперовича [7]).

Профессор А.К. Галлямов на основе результатов экспериментальных исследований [8] предложил формулу поправочного коэффициента, зависящего от угла  $\alpha$  наклона восходящего участка трубопровода и отношения кинематических вязкостей транспортируемой жидкости и воды. В итоге формула (1) приобрела вид формулы (2):

$$v_{\text{вын}} = 0,1 \mathcal{G}_0^{0,36} \sqrt{\frac{2gd}{\lambda} \frac{\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{н}}}{\rho_{\text{н}}} \sin^{0,34} \alpha}, \quad (2)$$

где  $\mathcal{G}_0$  – отношение вязкостей нефти (нефтепродукта) и воды.

Позже в [9] предложена уточненная формула (3) для расчета поправочного коэффициента:

$$k^* = (2,437 \sin^{0,272} \alpha - 1)(0,06 \ln(\mathcal{G}_0) - 0,278) + 0,564 - 0,133 \ln(\mathcal{G}_0). \quad (3)$$

В работе [10] дается еще одна формула поправочного коэффициента, предложенная на основе результатов исследований по удалению скоплений воды из низин профиля трубопровода, выполненных на бензине и на дизельном топливе. В основе работы А.С. Дидковской лежат предположения, что на вынос скопления воды существенно влияет различие коэффициентов трения на границах раздела «нефть – стенка трубы», «нефть–вода» и что вода, скопленная

перед выносом, находится в состоянии покоя, т. е. ее вязкость не важна, а вязкостное трение нефти (нефтепродукта) пренебрежимо мало по сравнению с вихревой вязкостью на поверхности раздела, поэтому формула (4) не содержит отношения  $\mathcal{G}_0$  кинематических вязкостей жидкостей:

$$v_{\text{вын}} = 0,157 \sqrt{\frac{gd}{C_{f0}} \frac{\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{н}}}{\rho_{\text{н}}} \sin^{0,344} \alpha}, \quad (4)$$

где  $C_{f0}$  – коэффициент трения на границе раздела «нефть – стенка трубы»;  $\rho_{\text{в}}, \rho_{\text{н}}$  – плотность воды и нефти соответственно.

М.В. Лурье в работе [11] выдвигает предположение о «гейзерном» механизме выноса водного скопления и, по мнению авторов данной статьи, получает наиболее содержательную зависимость для минимальной скорости выноса по формуле (5):

$$v_{\text{вын}} = 0,367 \sqrt{\frac{2gd}{\lambda} \frac{\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{н}}}{\rho_{\text{н}}} \sin \alpha}, \quad (5)$$

При этом автор [11] дает различные варианты формулы в зависимости от режима течения и, кроме того, в явном виде определяет максимальный объем воды, который может находиться в равновесии с обтекающей его нефтью или нефтепродуктом по формуле (6):

$$(\Lambda_{\text{в}})_{\text{max}} = 0,129 \frac{d^3}{\lambda}. \quad (6)$$

В настоящей статье применяются формулы, соответствующие турбулентному режиму течения жидкости, так как далее для достижения выносной скорости предполагается применение ПТП.

Согласно формуле (6) для выноса скоплений воды меньшего объема  $V_{\text{в}} < (V_{\text{в}})_{\text{max}}$  (т. е. меньше максимально возможного) требуется скорость выноса  $v_{\text{вын}} < v$  [11] (т. е. скорость потока должна быть больше минимальной скорости выноса, вычисляемой по формуле (5)). Зависимость выносной скорости от объема жидкости приведена на рис. 2.

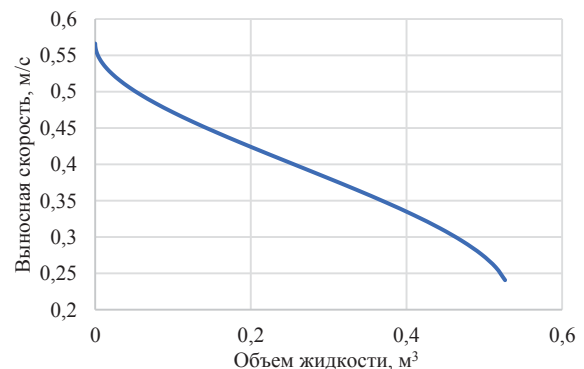


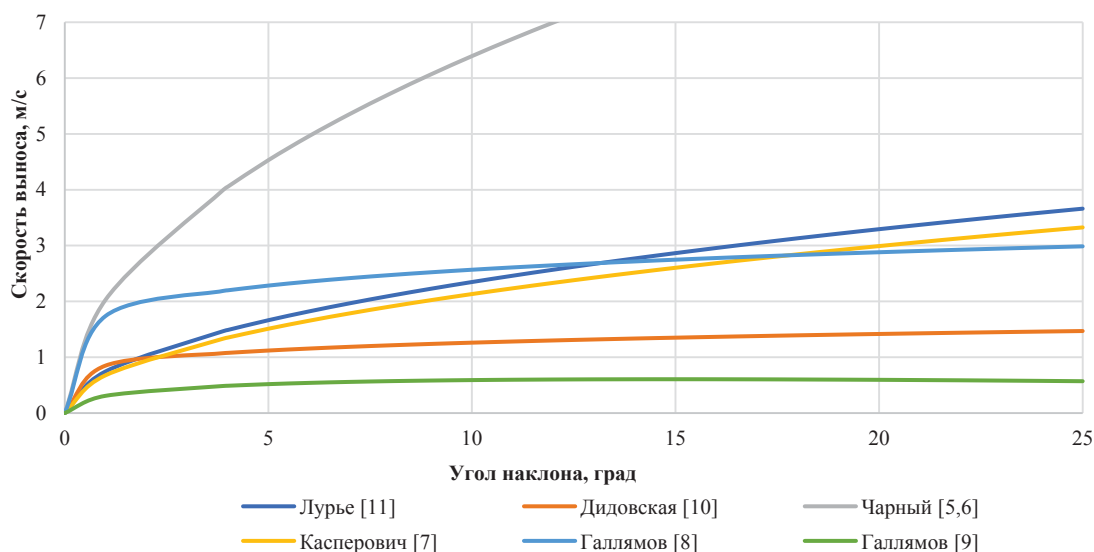
Рис. 2. Зависимость выносной скорости от объема жидкости

Fig. 2. Dependence of the fluid removal velocity on liquid volume

На рис. 3 приведена зависимость выносной скорости от угла наклона восходящего участка нефтепро-

дуктопровода (с диаметром 700 мм, перекачивающего бензин с плотностью 700 кг/м<sup>3</sup> и коэффициентом гид-

равлического сопротивления  $\lambda=0,025$ ). График построен по формулам (1)–(5).



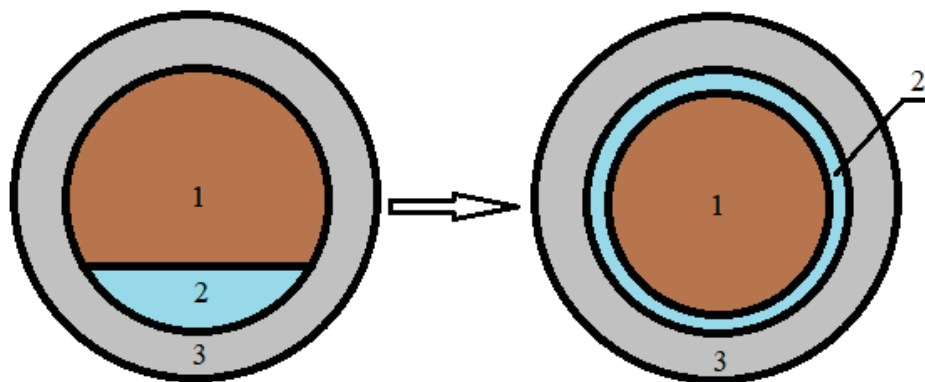
**Рис. 3.** Зависимость выносной скорости от угла наклона восходящего участка трубопровода  
**Fig. 3.** Fluid removal velocity against the inclination angle of the pipeline ascending section

Скорость выноса возрастает с увеличением угла наклона трубопровода к горизонту и уменьшением объема водного образования.

Если максимальная скорость потока, соответствующая пропускной способности при заданной несущей способности трубопровода, меньше скорости выноса водных скоплений, то дальнейшего увеличения скорости перекачки (с целью получения выносной скорости) можно добиться путем применения ПТП. Да-

лее рассмотрена возможная методика по определению необходимого экономически целесообразного количества ПТП для проведения частичной очистки (выносу водных образований).

Если весь объем выделившейся во внутренней полости трубопровода воды равномерно распределить по поверхности стенки трубы (рис. 4), то фактический (начальный) эффективный диаметр трубопровода будет меньше номинального на толщину распределенного слоя воды.



**Рис. 4.** Схема условного распределения воды при определении эффективного диаметра: 1) перекачиваемый продукт; 2) слой воды; 3) стенка трубопровода

**Fig. 4.** Scheme of water conditional distribution in determining the effective diameter: 1) transported product; 2) water layer; 3) pipeline wall

Изменение начального эффективного диаметра трубопровода из-за выноса воды может быть представлено в виде (7):

$$(\Lambda_n)_{\max} = \frac{\pi L}{4} (d_{2\phi}^2 - d_{1\phi}^2), \quad (7)$$

где  $L$  – длина участка трубопровода, м;  $d_{2\phi}$  – эффективный диаметр трубопровода после удаления водного

скопления, м;  $d_{1\phi}$  – начальный эффективный диаметр трубопровода (до удаления водного скопления), м.

Так как объем воды по формуле (6) зависит от номинального диаметра и в то же время равен вычисленному по формуле (7), то, приравнявая эти значения, получим:

$$0,129 \frac{d^3}{\lambda} = \frac{\pi L}{4} (d_{2\phi}^2 - d_{1\phi}^2),$$

В итоге получаем формулу (8) для нахождения  $d_{2\phi}$ :

$$d_{2\phi} = \sqrt{d_{1\phi}^2 + \frac{0,129 \frac{d^3}{\lambda}}{\frac{\pi L}{4}}}. \quad (8)$$

Величина  $d_{1\phi}$  должна быть определена по формуле (9), представляющей собой формулу Дарси–Вейсбаха в форме Лейбензона с учетом начальных данных:

$$d_{1\phi} = \left( \frac{\beta Q_{нач}^{2-m} g^m L}{h_{нач}} \right)^{\frac{1}{5-m}}. \quad (9)$$

При известном начальном расходе по формуле (10) находим начальную скорость транспортируемой среды:

$$v_{нач} = \frac{4Q_{нач}}{\pi d^2}, \quad (10)$$

где  $Q_{нач}$  – начальный (фактический) объемный расход жидкости, м<sup>3</sup>/с;

По формуле (5) вычисляется значение минимальной скорости, необходимой для выноса водных образований  $v_{вын}$ . Затем с учетом допустимого максимального напора (по состоянию линейной части (ЛЧ) и насосов нефтеперекачивающей станции (НПС)) при эффективном диаметре, равном  $d_{1\phi}$ , определим максимально возможный расход и скорость по формуле (11):

$$Q_{max} = Q_{нач} \left( \frac{h_{max}}{h_{нач}} \right)^{\frac{1}{2-m}}, \quad v_{max} = v_{нач} \left( \frac{h_{max}}{h_{нач}} \right)^{\frac{1}{2-m}}, \quad (11)$$

где  $Q_{max}$  – расход нефти/нефтепродукта без ПТП, м<sup>3</sup>/с;  $h_{max}$  – максимальные потери напора, который может быть в трубопроводе, исходя из несущей способности трубопровода, м.

При  $v_{нач} \leq v_{вын}$  по формуле (12) находим гидравлическую эффективность ПТП, обеспечивающую выносную скорость  $v_{вын}$  при сохранении перепада давления  $h_{max}$ , т. е.  $\Delta P=0$  [12]:

$$\psi_p = \left( 1 - \frac{Q_{max}^2}{Q_{p1}^2} \right) \cdot 100 \%, \quad Q_{p1} = Q_{вын}, \quad (12)$$

где  $Q_{p1}$  – требуемый расход нефти/нефтепродукта с ПТП при сохранении величины потерь напора, м<sup>3</sup>/с.

Эффективность ПТП также может быть вычислена исходя из формулы Лейбензона:

$$\psi_Q = \left( 1 - \frac{h_{max} d_{1\phi}^{5-m}}{\beta Q_{вын}^{2-m} g^m L} \right) \cdot 100 \%. \quad (13)$$

Зависимость гидравлической эффективности ПТП от ее концентрации для восходящего участка кривой эффективности ПТП в работе [13] предложено аппроксимировать в виде формулы (14):

$$\psi = \frac{\theta}{b_0 + b_1 \theta} k(Re). \quad (14)$$

В этом уравнении  $b_0$  и  $b_1$  – коэффициенты аппроксимации, способ определения которых описан в работе [14];  $k(Re)$  – поправочный коэффициент на степень

развитости турбулентности потока в трубопроводе [15], дающий резкое снижение эффективности ПТП в зоне малых чисел Рейнольдса (гидравлически гладких труб), и определяющийся по формуле (15):

$$k(Re) = \frac{Re}{Re + 2800}, \quad (15)$$

где  $Re$  – число Рейнольдса.

Для оценочных расчетов примем коэффициенты аппроксимации кривой эффективности ПТП присадки  $b_0=6,87 \cdot 10^{-6}$ ,  $b_1=1,96$ . Аппроксимационная зависимость эффективности ПТП от ее концентрации по формуле (12) приведена на рис. 5.

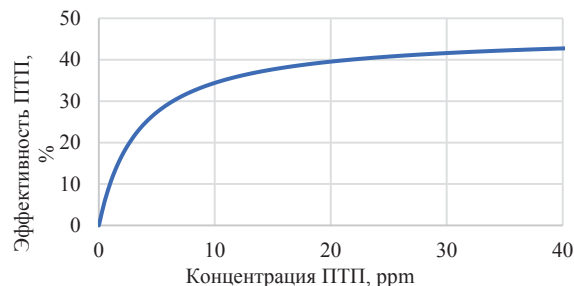


Рис. 5. Зависимость эффективности ПТП от концентрации

Fig. 5. Anti-turbulent additive efficiency against concentration

Для реализации поставленной задачи требуется выбрать экономически приемлемый тип присадки. Рассмотрена присадка марки Liquid Power TMW. Зависимости эффективности от концентрации данной ПТП представлена в табл. 1 [16], а также на рис. 6. Для расчета концентрации ПТП существуют аналитические методы (например, используя формулу (12)), однако их применение требует дополнительного анализа для определения коэффициентов для конкретной марки ПТП, который не проведен в рамках настоящей статьи. Коэффициенты  $b_0$  и  $b_1$  найдены исходя из значений табл. 1 и носят оценочный характер. Аналитически построенная зависимость позволяет определить оптимальную концентрацию ПТП.

Таблица 1. Значения функции эффективности  $\psi$  от концентрации  $\theta$  для ПТП Liquid Power TMW

Table 1. Efficiency function  $\psi$  against concentration  $\theta$  for DRA Liquid Power TMW

$\theta$ , ppm	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\psi_Q(\theta)$ , %	0	31	39	43	46	47	48	49	50	50,5	50,9

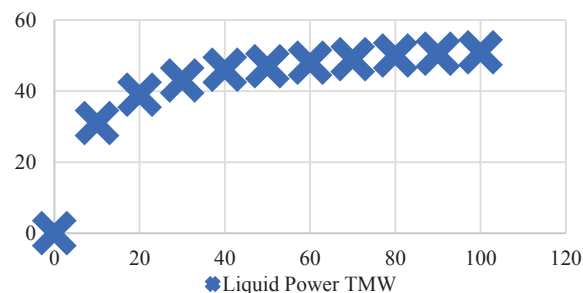


Рис. 6. Зависимость гидравлической эффективности ПТП Liquid Power TMW от концентрации

**Fig. 6.** *Anti-turbulent additive Liquid Power TMW efficiency against concentration*

По формуле (12) получено значение концентраций для эффективности при постоянном перепаде давлений  $\psi_p$ , а в табл. 1 представлены значения концентраций для эффективности при постоянной производительности трубопровода  $\psi_Q$ . Между ними существуют функциональные зависимости [17], которые можно представить в виде формулы (16):

$$(1 - \psi_Q) = (1 - \psi_p)^{\frac{2-m}{2}}, \quad (1 - \psi_p) = (1 - \psi_Q)^{\frac{2}{2-m}}, \quad (16)$$

где  $m$  – коэффициент Лейбензона.

Стоит учесть, что после введения полимера в трубопровод из-за различных факторов (уменьшение молекулярной массы, степени полимеризации, разрыв связей в молекулах и т. д.) снижается гидравлическая эффективность ПТП [18, 19]. Учет путевой деградации ПТП при необходимости может быть проведен на основании [20–22]. В работах А. Дьюпа [23], Б. Оволаби [24], М. Хабибпура [25], М. Эшрати [26] и др. представлены способы улучшения стойкости полимера к деструкции, не рассмотренные в рамках настоящей статьи.

Далее предполагается, что для частичного удаления воды из подъемных участков трубопровода требуется время  $T_1$ , по истечению которого при перекачке оставшегося планового объема в течение времени  $T_2$  ПТП применяется для экономически обоснованного снижения энергетических затрат. Таким образом, встает вопрос о стоимостной оценке применения присадок и целесообразности их использования после проведения очистки.

Возникает задача оценки экономического эффекта от применения ПТП для очистки трубопровода от водных образований. Одними из ключевых показателей деятельности компаний, оказывающих услуги по транспортировке нефти и нефтепродуктов, являются удельное потребление электроэнергии при перекачке нефти и нефтепродуктов и удельная стоимость транспортировки [27]. При этом за критерий оптимизации может быть принят функционал, представляющий собой разницу удельных ценовых затрат при перекачке с применением ПТП и перекачке без полимерной добавки при идентичных гидродинамических условиях, что при  $\Delta z_{12}=0$  приводит к задаче минимизации следующего функционала (целевой функции) согласно формуле (17):

$$S = \frac{\rho g}{T_1 + T_2} \left[ \frac{Q_{p1} h_{p1}}{\eta_{m1}} T_1 + \frac{Q_{p2} h_{p2}}{\eta_{m2}} T_2 \right] \sigma_m + \frac{\rho}{T_1 + T_2} \left[ Q_{p1} \theta_1 T_1 + Q_{p2} \theta_2 T_2 \right] \sigma_n, \quad (17)$$

где  $T_1$  и  $T_2$  – соответственно время работы с вводом ПТП на режиме выноса водных скоплений  $Q_{p1}$  и последующей перекачки с производительностью  $Q_{p2}$ , с;  $T$  – полное время работы трубопровода с ПТП, с, которое может быть найдено по формуле (18);  $Q_{p1}$  – объемный расход перекачиваемого продукта в трубопроводе при движении потока с выносной скоростью,

$m^3/c$ ;  $Q_{p2}$  – объемный расход перекачиваемого продукта в трубопроводе с вводом ПТП после выноса воды,  $m^3/c$ ;  $h_{p1}$  – максимальные потери напора в трубопроводе, соответствующие режиму работы с давлением, равным несущей способности трубопровода, м;  $h_{p2}$  – потери напора на режиме работы с производительностью  $Q_{p2}$ , в очищенном трубопроводе с вводом ПТП, м;  $\sigma_m$ ,  $\sigma_n$  – единичные стоимости механической энергии (на привод насосов) и ПТП, р/Дж и р/кг соответственно;  $\theta_1$  – концентрация ПТП, необходимая для выноса воды, т. е. на режиме перекачки с производительностью  $Q_{p1}$ ;  $\theta_2$  – концентрация ПТП на режиме перекачки с производительностью  $Q_{p2}$ .

$$T_1 + T_2 = T, \quad (18)$$

$T_1$  определим по формуле (19) как время, за которое частица ПТП проходит от места ввода до конца участка трубопровода, плюс время, за которое происходит «поршневой» вынос находящегося в начале трубопровода водного образования:

$$T_1 = \frac{L}{v_{\max}} + \frac{L}{v_{\text{вын}}}. \quad (19)$$

Согласно формуле (20) для выполнения условия сохранения планового объема перекачки необходимо, чтобы расход после выноса воды был равен:

$$Q_{p2} = \frac{QT - Q_{p1}T_1}{T - T_1}. \quad (20)$$

Применение ПТП позволяет снизить затраты на электроэнергию за счет снижения турбулентности потока, изменяя распределение и интенсивность вихрей в турбулентном потоке трубопровода [28], что может оказаться экономически целесообразным и помимо эффекта очистки трубопровода за счет выноса воды. То есть после периода ввода ПТП с концентрацией  $\theta_1$ , обеспечивающей вынос водных скоплений, есть смысл некоторое время применять экономически обоснованную концентрацию  $\theta_2$ .

Концентрация ПТП  $\theta_2$  на режиме перекачки с производительностью  $Q_{p2}$  находится из условия оптимальности путем дифференцирования функции  $S$  (17) по  $\theta_2$  с учетом формул (14) и (21) или же графическим путем.

$$h_{p2} = \beta \frac{Q_{p2}^{2-m} (1 - \psi_2)^{\frac{2-m}{2}} \mathcal{G}^m}{d_{2\phi}^{5-m}} L, \quad (21)$$

где  $\mathcal{G}$  – кинематическая вязкость транспортируемой среды  $m^2/c$ .

В итоге приходим к формуле (22) для оптимального значения  $\theta_2$ :

$$\frac{g \sigma_m}{\eta_{m2}} \beta \frac{Q_{p2}^{2-m} L v^{2-m}}{d_{2\phi}^{5-m}} \frac{2-m}{2} \left( 1 - \frac{\theta_2}{b_0 + b_1 \theta_2} k(Re_2) \right)^{\frac{2-m}{2}-1} \times \times \frac{kb_0}{(b_0 + b_1 \theta_{2\text{опт}})^2} - \sigma_n = 0, \quad (22)$$

где  $\beta$ ,  $m$  – коэффициенты Лейбензона (в зоне смешанного трения  $m=0,1$ ;  $\beta = 0,0166 \left(\frac{\Delta}{d}\right)^{0,15}$ ).

Если значение  $S$ , вычисленное по формуле (17), меньше, чем затраты на транспортировку без применения ПТП (как при очистке, так и при перекачке), экономически выгодно применять ПТП описанным в настоящей статье способом. Современная политика энергетических компаний устанавливает приоритетом компаний поиск решений по снижению потребления энергетических ресурсов и оптимизации расходов [29]. Для сравнения приведем затраты на перекачку без применения ПТП, которые вычисляются по формуле (23):

$$S_0 = \rho g \frac{Q_{\text{нач}} h_0}{\eta_m} \sigma_m, \quad (23)$$

где  $h_0$  – потери напора без использования ПТП.

Если учитывать «последствие ПТП» в течение времени  $T_3$ , то экономия от последствия ПТП (перекачки по очищенному трубопроводу) вычисляется по формуле (24):

$$S_1 = \rho g \frac{Q_{\text{нач}} \Delta h_{\text{ПТП}}}{\eta_m} \sigma_m \frac{T_3}{T}, \quad (24)$$

где  $\Delta h_{\text{ПТП}}$  – разница потерь напора после использования ПТП и без применения ПТП, т. е. с эффективным диаметром до выноса воды –  $d_1$  и эффективным диаметром после выноса воды –  $d_{2\text{ф}}$  (формула (8));  $T_3$  – время работы на очищенном трубопроводе без ПТП (для оценок может быть принято равным половине периода между очистками).

Величина  $\Delta h_{\text{ПТП}}$  может быть вычислена по формуле (25):

$$\Delta h_{\text{ПТП}} = \beta Q_{\text{нач}}^{2-m} v^m L \left( \frac{1}{d_{1\text{ф}}^{5-m}} - \frac{1}{d_{2\text{ф}}^{5-m}} \right). \quad (25)$$

Решение принимается по результату сравнения затрат на очистку и экономию энергоресурсов на очищенном участке магистрального трубопровода (МТ). Опыт применения ПТП на существующих участках МТ представлен в [30].

### Результаты и обсуждения

В статье приведена методика расчета количества ПТП, обеспечивающего скорость перекачки, необходимую для экономически целесообразного выноса воды из трубопровода. Далее приведен пример расчета. Вариант исходных данных представлен в табл. 2.

Так как рассматривается только одно локальное скопление воды, в формуле учитывается лишь частичный вынос жидкости. По формуле Дарси-Вейсбаха находится величина эффективного диаметра трубопровода до удаления воды из трубопровода  $d_1=0,68544309$  м. То есть толщина слоя всей воды составляет  $(0,7-0,68544309)/2=0,00728$  м, или 7,28 мм.

По формуле (8) находится эффективный диаметр трубопровода после удаления воды, учитывая только рассматриваемый низменный участок трубопровода:  $d_2=0,685459528$  м.

В настоящей статье авторами рассмотрен случай, когда в локальном низменном участке трубопровода

содержится максимально возможный объем воды, вычисленный по формуле (6) и равный  $1,77 \text{ м}^3$ .

Таблица 2. Исходные данные

Table 2. Initial data

Наименование параметра Parameter	Значение Value
Расход, м <sup>3</sup> /с/Flow rate, m <sup>3</sup> /s	0,4
Диаметр номинальный, м/Nominal diameter, m	0,7
Плотность, кг/м <sup>3</sup> /Density, kg/m <sup>3</sup>	700
Кинематическая вязкость, сСт/Kinematic viscosity, cSt	25
Угол наклона восходящего участка нефтепродуктопровода, град Inclination angle of the ascending section of the oil product pipeline, deg	5
Несущая способность трубопровода, МПа Bearing capacity of the pipeline, MPa	3,5
Длина участка, км/Section length, km	100
Начальное давление (давление на выходе из НПЦ-1), МПа Initial pressure (pressure at the outlet of the OPS-1), MPa	2
Конечное давление (давление на входе в НПЦ-2), МПа Final pressure (pressure at the inlet to the OPS-2), MPa	0,5
Коэффициент гидравлического сопротивления Hydraulic resistance coefficient	0,025
КПД насосов/Efficiency of pumps, %	60
Время использования ПТП, сут/DRA usage time, day	31
Единичная стоимость энергии на привод насоса, р/Дж Unit cost of energy per pump drive, rub/J	$2 \cdot 10^{-6}$
Единичная стоимость ПТП, р/кг/Unit cost of DRA, rub/kg	400
Период работы с ПТП, сут/Period of work with DRA, day	31

По формуле (10) скорость потока жидкости при номинальном режиме работы:

$$v_{\text{вын}} = \frac{4 \cdot 0,4}{\pi \cdot 0,7^2} = 1,04 \left( \frac{\text{м}}{\text{с}} \right).$$

Число Рейнольдса  $Re \approx 29103$ , т. е. режим смешанного трения.

По формуле (5) выносная скорость равна:

$$v_{\text{вын}} = 0,367 \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot 0,7 \cdot 1000 - 700}{0,025} \frac{1000 - 700}{700} \cdot \sin 5^\circ} = 1,66 \left( \frac{\text{м}}{\text{с}} \right).$$

Для выноса воды потоком бензина требуется увеличить скорость транспортируемой среды на 0,62 м/с. По формуле (11) скорость потока при давлении, равном несущей способности трубопровода,  $v_{\text{max}}=1,41$  м/с при расходе  $Q_{\text{max}}=0,52 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Исходя из необходимой для выноса скорости, полученной по формуле (5), требуемый расход (при выносной скорости) равен  $0,63 \text{ м}^3/\text{с}$ . Находим гидравлическую эффективность ПТП при постоянном перепаде давлений по формуле (10):

$$\psi_p = \left( 1 - \frac{0,63^2}{0,52^2} \right) \cdot 100 \% = 31,46 \%. \quad (10)$$

В формуле (16)  $m=0,1$ , следовательно:

$$\psi_Q = 1 - (1 - 0,3146)^{\frac{2-0,1}{2}} = 30,15 \%. \quad (16)$$

При вычислении  $\psi_Q$  по формуле (13) результат окажется идентичным.

Выбор марки присадки основывается на экономических расчетах и обеспечивает наименьшие затраты. Далее принята ПТП Liquid Power TMW, и по табл. 1

методом интерполяции получено значение концентрации 8,93 ppm (г/т).

Таким образом, для выноса скопления воды путем введения ПТП для трубопровода условным диаметром 700 мм и с углом наклона к горизонту 5°, по которому перекачивается бензин, представляется возможным использовать ПТП марки Liquid Power TMW с концентрацией  $\theta_1 \approx 8,93 \approx 9$  ppm (г/т).

Оценим экономическую целесообразность использования ПТП по формуле (17). Для дальнейшего расчета нецелесообразно считать эффективность от выноса только одного скопления воды. Начальный эффективный диаметр рассмотренного трубопровода отличается от номинального на 14,56 мм. Если принять, что разница вызвана только содержанием воды в трубопроводе, то ее объем составит  $\approx 1583 \text{ м}^3$ . В реальности помимо водных образований имеются асфальтосмолопарафиновые отложения (АСПО) и газовые скопления. Для оценочного расчета примем, что выносимый объем воды составляет менее половины от первоначального объема (то есть  $700 \text{ м}^3$ ).

По формуле (20)  $Q_{p2} = 0,39 \text{ м}^3/\text{с}$ . Графически найдем значение концентрации при режиме работы с расходом  $Q_{p2}$  и получим значение  $\theta_2 = 2$  ppm (г/т). Графическое представление выражения для нахождения  $\theta_2$  представлено на рис. 7.

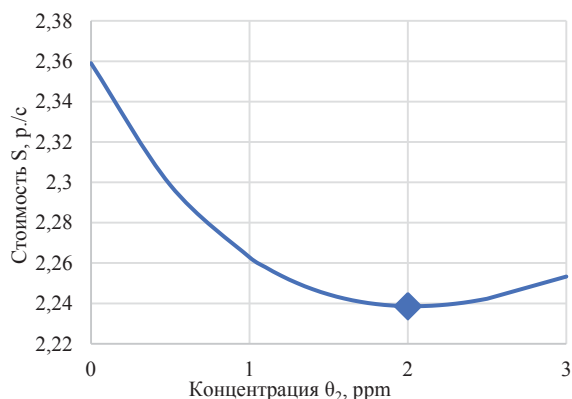


Рис. 7. Зависимость стоимости ПТП от ее концентрации  $\theta_2$

Fig. 7. Dependence of the cost of anti-turbulent additive on its concentration

Тогда по формуле (21) потери напора  $h_{p2}$ :

$$h_{p2} = 0,0069 \frac{0,39^{1,9} \cdot (1 - 0,1688)^{0,95} \cdot 100000}{0,685459528^{4,9}} = 201,64 \text{ м.}$$

Стоимость перекачки с ПТП (имеются в виду затраты на электроэнергию и на саму присадку) по формуле (17):

$$S = \frac{700 \cdot 9,81}{131293 + 2547106} \times \left[ \frac{0,63 \cdot 436,87}{0,6} 131293 + \frac{0,39 \cdot 201,64}{0,6} 2547106 \right] \cdot 2 \cdot 10^{-6} + \frac{700}{131293 + 2547106} \times \left[ 0,63 \cdot 7 \cdot 10^{-6} \cdot 131293 + 0,39 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot 2547106 \right] \cdot 400 = 2,24 \frac{\text{руб}}{\text{с}} \approx 5995951 \frac{\text{руб}}{\text{мес}}$$

Стоимость перекачки без ПТП по формуле (23):

$$S_0 = 700 \cdot 9,81 \cdot \frac{0,4 \cdot 218,44}{0,6} \cdot 2 \cdot 10^{-6} = 2 \frac{\text{руб}}{\text{с}}$$

Учтем последствие ПТП, а именно увеличение эффективного диаметра и, как следствие, снижение гидравлических потерь, в течение последующих трех месяцев. По формуле (24) экономический эффект от последствия ПТП составит:

$$S_1 = 700 \cdot 9,81 \cdot \frac{0,4 \cdot 12,00}{0,6} \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{3}{1} = 0,33 \frac{\text{руб}}{\text{с}}$$

Тогда стоимость перекачки с ПТП с учетом «последствия ПТП» составит  $S - S_1 = 1,91$  руб/с, то есть на  $\approx 243590$  руб/мес выгоднее, чем перекачка без ПТП.

Чем больше время последствия, тем выгоднее перекачка с ПТП. Экономическая целесообразность использования ПТП зависит от стоимости присадки. На рис. 8 показана зависимость выгоды перекачки с ПТП, т.е. разницы затрат на электроэнергию и присадку при перекачке с ПТП (с учетом последствия) и без ПТП от стоимости ПТП для рассмотренного выше случая.

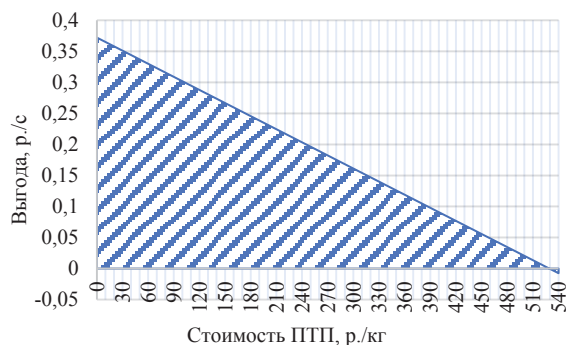


Рис. 8. Зависимость выгоды перекачки с ПТП (с учетом последствия) и без ПТП

Fig. 8. Difference in the cost of pumping with anti-turbulent additive (taking into account the aftereffect) and without anti-turbulent additive

Заштрихованная область показывает, при какой стоимости ПТП ее выгодно применять. Причем при стоимости присадки выше, чем 529 руб/кг, ее применение становится невыгодно, т. к. стоимость перекачки с ПТП становится больше, чем стоимость перекачки без ПТП.

В процессе перекачки нефтепродуктов содержащаяся в транспортируемом топливе вода может выделяться в виде эмульсии. Применение ПТП для крат-

ковременного увеличения производительности перекачки с целью выноса водных скоплений оправдывается компенсацией затрат на присадку за счет снижения энергозатрат на перекачку.

В ходе анализа было рассмотрено увеличение скорости потока на 0,25 м/с с помощью введения в транспортируемую среду ПТП марки Liquid Power TMW, концентрация которой составила  $\theta_1 \approx 9$  ppm.

Была проведена стоимостная оценка данного решения и выяснено, что выгода при перекачке с использованием ПТП составляет  $\approx 243590$  р./мес.

Экономическая целесообразность введения ПТП для выноса воды обусловлена не только снижением затрат на электроэнергию из-за уменьшения турбулизации потока, но и из-за остаточного действия ПТП – «очистки» трубопровода из-за выноса воды (экономии энергоресурсов на очищенном МН).

Сфера применения ПТП может быть расширена за счет использования их в качестве альтернативы скребкам при очистке трубопровода от водных скоплений.

#### Заключение

На восходящих участках трубопровода при скоростях перекачки нефтепродукта, недостаточных для выноса водных скоплений, наблюдается аккумуляция влаги и раздельное движение нефтепродукта и воды. Ранее (рис. 1) приведен характерный расчетный пример такого течения в нефтепроводе. Рельеф трубопровода и его геометрические характеристики не всегда позволяют реализовать вытеснение скопления воды перекачиваемым продуктом, поэтому реально существует потребность в разработке технически и экономически эффективных способов очистки. В ситуа-

ции, когда пропускной способности трубопровода и мощности насосных станций недостаточно для обеспечения критических расходов нефтепродукта, удаление образовавшихся скоплений воды производится пропуском по трассе очистных устройств. В подобном случае, как показано выше, решение проблемы по выносу водных скоплений (частичное или полное) может быть получено путем применения ПТП. При этом для получения экономически приемлемого максимального расхода при использовании полимерной добавки необходимо поддерживать напор на выходе из перекачивающей станции равным допустимому с учетом несущей способности ЛЧ. Чем больше выделенной воды в трубопроводе, тем выгоднее осуществлять ее вынос, тем целесообразнее будет использование ПТП для этой задачи. В ходе анализа, представленного в данной статье, рассмотрен не только «прямой» эффект от использования ПТП для увеличения скорости потока выноса воды, но и косвенные эффекты данного метода, а именно: увеличение эффективного диаметра трубопровода за счет эффекта «очистки» из-за выноса скоплений воды; увеличение скорости потока жидкости, что обеспечит нужную производительность при меньшем увеличении давления на НПС. Данные эффекты позволяют экономить энергопотребление при перекачке, что отражается в уменьшении стоимости перекачки. Следует отметить, что аналогичный результат можно ожидать и при выносе газозводных скоплений.

*Авторы благодарят Владимира Васильевича Жолобова за внимательную проработку статьи и замечания, способствующие улучшению понимания и аргументации выводов.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. An exponential decay function for polymer degradation in turbulent drag reduction / H.J. Choi, C.A. Kim, J.I. Sohn et al. // Polymer degradation and stability. – 2000. – V. 69 (3). – P. 341–346.
2. Toonder Den J.M.J., Hulslen M.A., Kuiken G.D.C. Drag reduction by polymer additives in a turbulent pipe flow: numerical and laboratory experiments // Journal of Fluid Mechanics. – 1997. – V. 337. – P. 193–231.
3. Elbing B.R., Perlin M., Dowling D.R. Modification of the mean near-wall velocity profile of a high-Reynolds number turbulent boundary layer with the injection of drag-reducing polymer solutions // Physics of Fluids. – 2013. – V. 25 (8). – P. 85–103.
4. Flow increase in the Trans Alaska pipeline through use of a polymeric drag-reducing additive / E. Burger, D. Edward, W.R. Munk, H.A. Wahl // Journal of Petroleum Technology. – 1982. – V. 34. – P. 377–386.
5. Чарный И.А. Влияние рельефа местности и неподвижных включений жидкости и газа на пропускную способность трубопроводов // Нефтяное хозяйство. – 1965. – № 6. – С. 51–55.
6. Касперович В.К., Черникин В.И. Экспериментальные исследования по удалению воды из нефтепроводов // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – 1964. – № 12. – С. 6–9.
7. Касперович В.К. Экспериментальные исследования удаления воды и воздуха из нефтепродуктопроводов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1965. – 144 с.
8. Галлямов А.К., Байков И.Р., Аминев Р.М. Оценка скорости выноса скоплений жидкости из пониженных участков трубопроводных систем // Известия высших учебных заведений. Серия: Нефть и газ. – 1990. – № 7. – С. 73–76.
9. Галлямов А.К., Байков И.Р., Гейер Б.В. К вопросу удаления скоплений воды из пониженных участков трубопровода потоком перекачиваемой среды // Актуальные вопросы технической эксплуатации магистральных нефтепроводов. – Уфа: ВНИИСПНефть, 1989. – С. 44–47.
10. Дидковская А.С., Воронин И.В., Левин М.С. Условия выноса скоплений воды из пониженных участков нефтепродуктопроводов // Транспорт и хранение нефтепродуктов. – 1997. – № 12. – С. 20–22.
11. Лурье М.В. Удаление скоплений трубопровода перекачиваемой нефти // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2017. – № 1 (28). – С. 52–58.
12. Чэнь Ян. Оценка влияния путевой деструкции противотурбулентных присадок на их гидравлическую эффективность: дис. ... канд. техн. наук. – Уфа, 2020. – 23 с.
13. The drag reduction phenomenon. Observed characteristics, improved agents, proposed mechanisms / R.C. Little, R.J. Hansen, D.L. Hunston, O. Kim, R.L. Patterson, R.Y. Ting // Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals. – 1975. – V. 14 (4). – P. 283–296.
14. Черникин В.А., Челинцев Н.С. О совершенствовании методов определения эффективности применения противотурбулентных присадок магистральных нефтепродуктопроводах // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2011. – № 1. – С. 58–61.
15. Kuhnen J. et al. Destabilizing turbulence in pipe flow // Nature Physics. – 2018. – V. 14 (4). – P. 386–390.
16. Определение оптимальной концентрации противотурбулентной присадки с помощью дифференциального исчисления математического анализа / Т.А. Моисеенко, В.И. Муратова, А.М. Нечваль, Р.Р. Фарухшина // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2020. – № 3. – С. 35–39.

17. Гольянов А.И. и др. Особенности работы магистрального нефтепровода с применением противотурбулентной присадки // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2013. – № 2. – С. 36–43.
18. Fsadni A.M., Whitty J.P.M., Stables M.A. A brief review on frictional pressure drop reduction studies for laminar and turbulent flow in helically coiled tubes // Applied Thermal Engineering. – 2016. – V. 109. – P. 334–343.
19. Mortazavi S.M.M. Correlation of polymerization conditions with drag reduction efficiency of poly(1-hexene) in oil pipelines // Iranian Polymer Journal. – 2016. – V. 25 (8). – P. 731–737.
20. Чэнь Ян, Нечваль А.М., Муратова В.И. Анализ различных факторов, влияющих на эффективность снижения гидравлического сопротивления при добавлении противотурбулентных присадок // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2019. – № 2. – С. 142–152.
21. Жолобов В.В., Варыбок Д.И., Морещкий В.Ю. К вопросу определения функциональной зависимости гидравлической эффективности противотурбулентных присадок от параметров транспортируемой среды // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2011. – № 4 (4). – С. 52–57.
22. Масштабирование при прогнозировании путевой механической деградации противотурбулентной присадки / В.В. Жолобов, Ф.С. Зверев, Г.В. Несын, Д.О. Лысенко // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2020. – Т. 11. – № 1. – С. 21–31.
23. Mechanical degradation onset of polyethylene oxide used as a hydrosoluble model polymer for enhanced oil recovery / A. Dupas, I. Henaut, J.F. Argillier et al. // Oil & Gas Science and Technology. – 2013. – V. 67 (6). – P. 931–940.
24. Owolabi B.E., Dennis D.J.C., Poole R.J. Drag reduction by polymer additives in parallel-shear flows // Journal of Fluid Mechanics. – 2017. – V. 827. – P. 1–12.
25. Habibpour M., Koteeswaran S., Clark P.E. Drag reduction behavior of hydrolyzed polyacrylamide/polysaccharide mixed polymer solutions – effect of solution salinity and polymer concentration // Rheologica Acta. – 2017. – V. 56 (7–8). – P. 683–694.
26. Experimental study of drag reduction of polymer-polymer mixtures in horizontal dispersed oil-water flow / M. Eshrati, T. Al Wahaibi, A.A.R. Al Hashmi et al. // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2017. – V. 83. – P. 169–176.
27. Куликов А.С. Энерго- и ресурсосбережение при перекачке нефти и нефтепродуктов с применением противотурбулентных присадок // Материалы III Всероссийской научно-практической конференции. – Омск: Омский государственный технический университет, 2019. – С. 39–43.
28. An experimental study on the performance of drag-reducing polymers in single-and multiphase horizontal flow using particle image velocimetry / I.H. Alsurakji, A. Al-Sarkhi, M. Habib et al. // Journal of Energy Resources Technology. – 2017. – V. 140 (5). – P. 052005.
29. Гильмияров Е.А., Шакиров Е.Р. Анализ расчетных зависимостей влияния противотурбулентных присадок на гидродинамические параметры перекачиваемой жидкости // Материалы Международной научно-практической конференции «Булатовские чтения». – Краснодар: ИД «Юг», 2019. – Т. 3. – С. 147–150.
30. Галиев А.Б., Закирова Г.Р. Экономическая оценка применения противотурбулентных присадок при транспортировке нефти и нефтепродуктов // Russian Economic Bulletin – 2020. – Т. 3. – № 3. – С. 24–29.

Поступила 05.09.2022 г.

Прошла рецензирование 19.09.2022 г.

#### Информация об авторах

**Банерджи Таноя**, студент кафедры нефтепродуктообеспечения и газоснабжения РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина.

**Шестаков Р.А.**, кандидат технических наук, доцент кафедры нефтепродуктообеспечения и газоснабжения РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина.



UDC 622.692.4:532.542.4

## METHOD FOR INCREASING THE ECONOMIC EFFICIENCY OF THE USE OF ANTI-TURBULENT ADDITIVES

Banerjee Tanoya<sup>1</sup>,  
tanoyabaner@mail.ru

Roman A. Shestakov<sup>1</sup>,  
shestakov.r@gubkin.ru

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

**The relevance** of the study is caused by the need to increase the economic efficiency of pumping oil and petroleum products by reducing hydraulic losses and removing the formed water accumulations using anti-turbulent additives. This method of using additives is energy-saving, minimizing the operating costs of transporting oil and petroleum products.

**The main aim:** to identify and propose the use of anti-turbulent additives as a way to increase the flow rate of the pumped medium to remove the formed local stationary water formations on the local lowlands of the pipeline profile, leading to decrease in its effective diameter and increase in hydraulic losses.

**Objects:** accumulated water formations on a low-lying section of the linear part of the main oil product pipeline.

**Methods:** mathematical analysis of the anti-turbulent additive impact to assess the prospects for its energy-efficient use as a way to increase the flow rate of the transported medium, technical and economic calculation reflecting the cost of anti-turbulent additive and electricity during pumping.

**Results.** The authors have analyzed the methods for calculating the remote flow velocity of the transported medium and proposed the method for calculating the concentration of anti-turbulent additives necessary to achieve an outrigger velocity by the fluid flow, if it is impossible to increase the permissible working pressure due to the limited bearing capacity of the pipeline. The article considers the effect of increasing the effective diameter of the pipeline, which is a side effect of the influence of anti-turbulent additive, which on the one hand increases the hydraulic efficiency of the additive, and on the other hand, reduces the power consumption of electricity after termination of additive injection. The results of calculating the economic feasibility of using the anti-turbulent additive and a comparative analysis of the cost of pumping with and without anti-turbulent additive are presented. The corresponding analytical dependencies for evaluating the effectiveness are considered.

### Key words:

Additives, hydraulic efficiency, relief pipeline, water accumulations, pipeline cleaning, removal rate, technical and economic calculation.

The authors appreciate Vladimir V. Zholobov. for detailed paper study and commentaries contributing to better comprehension and reasoning of conclusions.

### REFERENCES

- Choi H.J., Kim C.A., Sohn J.I. An exponential decay function for polymer degradation in turbulent drag reduction. *Polymer degradation and stability*, 2000, vol. 69 (3), pp. 341–346.
- Toonder Den J.M.J., Hulsen M.A., Kuiken G.D.C. Drag reduction by polymer additives in a turbulent pipe flow: numerical and laboratory experiments. *Journal of Fluid Mechanics*, 1997, vol. 337, pp. 193–231.
- Elbing B.R., Perlin M., Dowling D.R. Modification of the mean near-wall velocity profile of a high-Reynolds number turbulent boundary layer with the injection of drag-reducing polymer solutions. *Physics of Fluids*, 2013, vol. 25 (8), pp. 85–103.
- Burger E., Edward D., Munk W.R., Wahl H.A. Flow increase in the Trans Alaska pipeline through use of a polymeric drag-reducing additive. *Journal of Petroleum Technology*, 1982, vol. 34, pp. 377–386.
- Charnyi I.A. Vliyaniye relefa mestnosti i nepodviznykh vkluycheniy zhidkosti ili gaza na propusknyuyu sposobnost truboprovodov [The influence of terrain and stationary inclusions of liquid or gas on the capacity of pipelines]. *Neftyanoe khozyaistvo – Oil Industry*, 1965, no. 6, pp. 51–55.
- Kasperovich V.K., Chernikin V.I. Eksperimentalnye issledovaniya po udaleniyu vody iz nefteprovodov [Experimental studies on the removal of water from oil pipelines]. *Transport i khraneniye nefti i nefteproduktov*, 1964, no. 12, pp. 6–9.
- Kasperovich V.K. Eksperimentalnye issledovaniya udaleniya vody i vozdukha iz nefteproduktoprovodov. Diss. Kand. nauk [Experimental studies of water and air removal from oil product pipelines. Cand. Sc. Diss.]. Moscow, 1965. 144 p.
- Gallyamov A.K., Baikov I.R., Aminev R.M. Otsenka skorosti vynosa skopleniy zhidkosti iz ponizhennykh uchastkov truboprovodnykh sistem [Evaluation of the speed of the removal of accumulations of liquid from the low-lying areas of pipeline systems]. *Izvestiya vuzov. Seriya: Neft i gaz*, 1969, no. 12, pp. 73–76.
- Gallyamov A.K., Baikov I.R., Geyer B.V. K voprosu udaleniya skopleniy vody iz ponizhennykh uchastkov truboprovoda potokom perekachivaemoy sredey [On the issue of removing water accumulations from the lowered sections of the pipeline by the flow of the pumped medium]. *Aktualnye voprosy tekhnicheskoy ekspluatatsii magistralnykh nefteprovodov* [Current issues of technical operation of trunk oil pipelines]. Ufa, VNIISPTneft Publ., 1989. pp. 44–47.
- Didkovskaya A.S., Voronin I.V., Levin M.S. Usloviya vynosa skopleniy vody iz ponizhennykh uchastkov nefteproduktoprovodov [Conditions for removal of water accumulations from lowered sections of oil product pipelines]. *Transport i khraneniye nefteproduktov*, 1997, no. 12, pp. 20–22.
- Lurie M.V. Removal of water accumulations from the pipeline with the help of the pumped oil flow. *Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*, 2017, no. 1, pp. 52–58. In Rus.
- Chen Yang. Otsenka vliyaniya putevoy destrukttsii protivoturbulentnykh prisadok na ikh gidravlicheskiy effektivnost. Dis. Kand. nauk [Evaluation of the effect of track destruction of anti-turbulent additives on their drag reduction. Cand. Diss.]. Ufa, 2020. 23 p.
- Little R.C., Hansen R.J., Hunston D.L., Kim O., Patterson R.L., Ting R.Y. The drag reduction phenomenon. Observed

- characteristics, improved agents, proposed mechanisms. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1975, vol. 14 (4), pp. 283–296.
14. Chernikin V.A., Chelincev N.S. Improving methods used to define efficiency of anti-turbulent dopant in main pipelines. *Oil and Oil Products Pipeline Transportation: Science & Technologies*, 2011, no. 1, pp. 58–61. In Rus.
  15. Kuhnen J. Destabilizing turbulence in pipe flow. *Nature Physics*, 2018, vol. 14 (4), pp. 386–390.
  16. Moiseenko T.A., Muratova V.I., Nechval A.M., Faruhshina R.R. Opredelenie optimalnoy kontsentratsii protivoturbulentnoy prisadki s pomoshchyu differentsialnogo ischisleniya matematicheskogo analiza [Determination of the optimal concentration of an anti-turbulence additive using differential calculus and mathematical analysis]. *THNP*, 2020, no. 3, pp. 35–39.
  17. Golyanov A.I. Trunk oil pipeline work specifics with anti-turbulent additive application. *Oil and Oil Products Pipeline Transportation: Science & Technologies*, 2013, no. 2, pp. 36–43. In Rus.
  18. Fsadni A.M., Whitty J.P.M., Stables M.A. A brief review on frictional pressure drop reduction studies for laminar and turbulent flow in helically coiled tubes. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 109, pp. 334–343.
  19. Mortazavi S.M.M. Correlation of polymerization conditions with drag reduction efficiency of poly (1-hexene) in oil pipelines. *Iranian Polymer Journal*, 2016, vol. 25 (8), pp. 731–737.
  20. Chen Yang, Nechval A.M., Muratova V.I. Analysis of various factors affecting hydraulic reduction efficiency by drag reducing additives. *Problems of collection, preparation and transportation of oil and petroleum products*, 2019, no. 2, pp. 142–152. In Rus.
  21. Zholobov V.V., Varybok D.I. Moretskiy V.Yu. K voprosu opredelennya funktsionalnoy zavisimosti gidravlicheskoj effektivnosti protivoturbulentnykh prisadok ot parametrov transportiruemoy sredy [On the issue of determining the functional dependence of the hydraulic efficiency of anti-turbulent additives on the parameters of the transported medium]. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefiti i nefteproduktov*, 2011, no. 4 (4), pp. 52–57.
  22. Zholobov V.V., Zverev F.S., Nesyn G.V., Lysenko D.O. Masshtabirovanie pri prognozirovanii putevoy mekhanicheskoy degradatsii protivoturbulentnoy prisadki [Scaling and forecast of drag reducing additive mechanical degradation along the pipeline]. *Oil and Oil Products Pipeline Transportation: Science & Technologies*, 2020, vol. 11, no. 1, pp. 21–31.
  23. Dupas A., Henaut I., Argillier J.F. Mechanical degradation onset of polyethylene oxide used as a hydrosoluble model polymer for enhanced oil recovery. *Oil & Gas Science and Technology*, 2013, no. 67 (6), pp. 931–940.
  24. Owolabi B.E., Dennis D.J.C., Poole R.J. Turbulent drag reduction by polymer additives in parallel-shear flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 2017, vol. 827, pp. 1–12.
  25. Habibpour M., Koteeswaran S., Clark P.E. Drag reduction behavior of hydrolyzed polyacrylamide/polysaccharide mixed polymer solutions – effect of solution salinity and polymer concentration. *Rheologica Acta*, 2017, vol. 56 (7–8), pp. 683–694.
  26. Eshtrati M., Al Wahaibi T., Al Hashmi A.A.R. Experimental study of drag reduction of polymer-polymer mixtures in horizontal dispersed oil-water flow. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, vol. 83, pp. 169–176.
  27. Kulikov A.S. Energo- i resursosberezhenie pri perekachke nefiti i nefteproduktov s primeneniem protivoturbulentnykh prisadok [Energy and resource saving when pumping oil and petroleum products with the use of anti-turbulent additives]. *III Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya* [III All-Russian Scientific and Practical Conference]. Omsk, Omsk State technical University publ., 2019. pp. 39–43.
  28. Alsarakji I.H., Al-Sarkhi, Habib M. An Experimental study on the performance of drag-reducing polymers in single- and multiphase horizontal flow using particle image velocimetry. *Journal of Energy Resources Technology*, 2017, vol. 140 (5), 052005.
  29. Gilmiyarov E.A., Shakirov E.R. Analiz raschetnykh zavisimostey vliyaniya protivoturbulentnykh prisadok na gidrodinamicheskie parametry perekachivaemoy zhidkosti [Calculation formulae of anti-turbulent additives influence on the hydrodynamic parameters of the pumped liquid analysis]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Bulatovskie chteniya* [Materials of V International scientific and practical conference. Readings of A.I. Bulatov]. Krasnodar, Yug Publ., 2019. Vol. 3, pp. 147–150.
  30. Galiev A.B., Zakirova G.R. Ekonomicheskaya otsenka primeneniya protivoturbulentnykh prisadok pri transportirovke nefiti i nefteproduktov [Economic assessment of the use of anti-turbulence additives in the transportation of oil and petroleum products]. *Russian Economic Bulletin*, 2020, vol. 3, no. 3, pp. 24–29.

Received: 5 September 2022.  
Reviewed 19 September 2022.

#### Information about the authors

**Banerjee Tanoya**, student, National University of Oil and Gas «Gubkin University».

**Shestakov R.A.**, Cand. Sc., associate professor, National University of Oil and Gas «Gubkin University».

УДК 622.276.53

## МЕТОДОЛОГИЯ РАСЧЕТА КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УРАВНОВЕШИВАНИЯ ПРИВОДА ШТАНГОВОЙ УСТАНОВКИ ПРИ КОЛЕБАНИЯХ ДИНАМИЧЕСКОГО УРОВНЯ

Уразаков Камил Рахматуллович<sup>1</sup>,  
urazakk@mail.ru

Тугунов Павел Михайлович<sup>1</sup>,  
TugunovPM@gmail.com

<sup>1</sup> Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Россия, 450044, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

**Актуальность.** Уравновешенность привода является одним из ключевых факторов, определяющих эффективность эксплуатации скважин установками скважинных штанговых насосов. Это имеет особое значение для малодобитных скважин, которые работают на пределе рентабельности, вследствие низких дебитов и высокого энергопотребления. Перевод их на периодический режим приводит к системным колебаниям динамического уровня. Изменение динамического уровня обуславливает изменение нагрузок, действующих на штанговую колонну и балансирный привод. Для сохранения уравновешенности станка-качалки в этих условиях необходима корректировка положения уравнивающих контргрузов.

**Цель:** анализ автоматической системы уравнивания станка-качалки, включающей дополнительный балансирный контргруз, с возможностью автоматического перемещения, положение которого вдоль балансира регулируется за счет вспомогательного электродвигателя; разработка методологии расчета параметров автоматической системы динамического уравнивания, позволяющей проводить расчеты механизма выравнивания нагрузок.

**Методы:** экспресс-метод для оценки параметров контргрузов, учитывающий статические составляющие нагрузок на плунжер и привод, и детальный метод с учетом динамических составляющих нагрузок.

**Результаты.** Показано, что оба метода расчета дают приемлемые результаты с точки зрения обеспечения минимального крутящего момента на кривошипном валу, выравнивания степени загрузки вала и электродвигателя в течение цикла от качки.

**Выводы.** Установлено, что требуемый (для поддержания динамической уравновешенности) вес дополнительного балансирного контргруза в значительной степени возрастает по мере роста разницы динамического уровня в процессе от качки и снижается при увеличении «длины хода» контргруза вдоль балансира. Плечо кривошипного груза при увеличении веса дополнительного балансирного контргруза уменьшается вследствие снижения вклада кривошипной составляющей в системе комбинированного уравнивания.

### Ключевые слова:

штанговая насосная установка, периодический режим от качки, динамический уровень, моделирование, станок-качалка, дополнительный балансирный груз, уравнивание.

### Введение

В настоящее время ввиду ряда причин (постепенной выработки запасов, роста осложненного фонда, снижения фильтрационных характеристик объектов разработки) закономерно возрастает доля низкодебитных скважин [1, 2]. Значительная доля низкодебитного фонда эксплуатируется штанговыми установками с балансирным приводом (станки-качалки). Несмотря на наличие определенных недостатков, таких как большая масса привода, необходимость в массивном фундаменте, значительный период монтажа при обустройстве скважины и ее ремонте и некоторых других, станки-качалки получили широкое распространение в практике механизированной эксплуатации скважин, что обусловлено их достоинствами: простотой конструкции, надежностью механических узлов, отсутствием сложных и дорогостоящих элементов [3].

В условиях снижения дебита и рентабельности эксплуатации установками механизированной добычи, в частности, установками скважинного штангового насоса (УСШН), актуальным является разработка технических средств, позволяющих поддержать оптимальные условия работы насосного оборудования для добычи нефти [4]. Для достижения эффективной

работы УСШН, минимального энергопотребления и загруженности узлов станка-качалки необходимо обеспечить уравновешенность привода [1, 5]. Негативные последствия недостаточного уравнивания связаны с ростом динамических нагрузок, действующих на балансиры и кривошипно-шатунный механизм, увеличением максимального крутящего момента на кривошипном валу и валу редуктора [6, 7]. Это, в свою очередь, приводит к росту требуемого электродвигателем крутящего момента и коэффициента неравномерности его загрузки, увеличению потребляемой электроэнергии [8]. Значительные колебания крутящего момента оказывают отрицательное влияние и на работу клиноременных передач [9]. Колебания натяжения приводных ремней приводят к их растяжению и снижению упруго-прочностных характеристик, проскальзыванию ремней относительно шкивов, снижению КПД передаточного механизма и длины хода головки балансира [10]. Таким образом, уравновешенность привода в значительной степени определяет эффективность эксплуатации скважин штанговыми установками [11, 12].

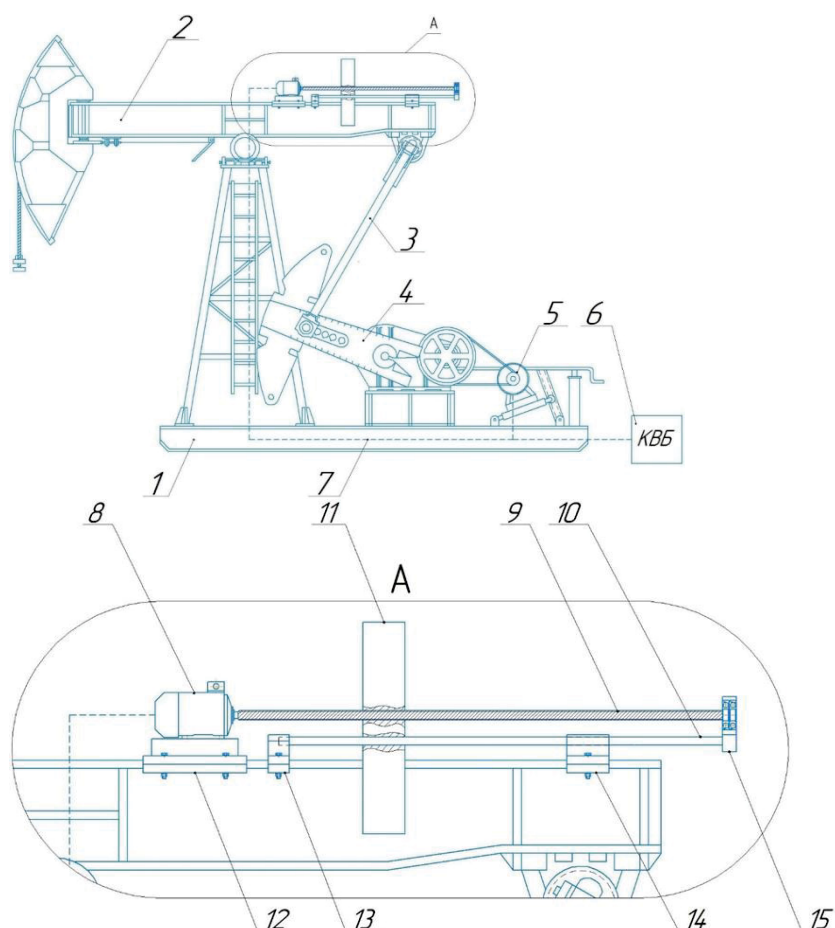
Нагрузки, действующие на узлы штанговых установок (плунжер насоса, штанговую колонну, привод), существенно изменяются при изменении динамиче-

ского уровня. Изменение динамического уровня может быть связано с изменением скорости откачки и параметров технологического режима УСШН (например, в периодическом режиме, включающем чередование полувциклов откачки и накопления жидкости) или с изменением притока пластового флюида вследствие изменения фильтрационных характеристик пластов [1, 3]. На сегодняшний день число низкодебитных скважин, переводимых на режим периодической откачки, возрастает, и вопросы уравнивания данных категорий скважин становятся все более актуальными [13].

**Система автоматического динамического уравнивания и математическая модель ее работы**

Для обеспечения уравниваемости станка-качалки вне зависимости от текущего положения динамического уровня разработана автоматическая система уравнивания, общий вид станка-качалки с уравнивающей системой показан на рис. 1 [14, 15]. Предложенная система базируется на комбинированном роторно-кривошипном методе уравнивания [16]. Уравнивание основной части

переменных нагрузок на привод достигается за счет пары роторных противовесов, размещенных на кривошипе – 4. Кроме того, система (А) включает дополнительный балансирующий контргруз – 11, установленный на заднем плече балансира – 2, приводимый в движение вдоль балансира – 2 посредством винта – 9 на двух направляющих опорах – 10 и электродвигателя – 8, управляющего положением контргруза. Автоматизированная корректировка положения дополнительного балансирующего контргруза поддерживает уравнивание станка-качалки в условиях колебания динамического уровня в скважине [17, 18]. Для этого система оборудована блоком вычисления – 6 для расчета изменения положения балансирующего контргруза – 11 на основе величин потребляемого тока или мощности электродвигателя – 5, который передает команду на распределитель тока (установлен в вычислительном модуле – 6), который регулирует ток питания электродвигателя – 8 [19]. Винт – 9, приводимый во вращение электродвигателем – 8 в необходимом направлении, автоматически корректирует положение уравнивающего контргруза – 11.



**Рис. 1.** Станок-качалка с автоматической системой уравнивания: 1 – станок-качалка; 2 – балансира; 3 – шатун; 4 – кривошип; 5 – электродвигатель станка-качалки; 6 – командно-вычислительный блок; 7 – кабель обратной связи; 8 – электродвигатель уравнивающей системы; 9 – винт; 10 – направляющие; 11 – контргруз; 12–14 – опоры; 15 – подшипниковая опора

**Fig. 1.** Pumping unit with automatic balancing system: 1 – pumping unit; 2 – balancer; 3 – connecting rod; 4 – crank; 5 – electric motor of the pumping unit; 6 – command-computing unit; 7 – feedback cable; 8 – electric motor of the balancing system; 9 – screw; 10 – guides; 11 – counterweight; 12–14 – supports; 15 – bearing support

### Методология расчета комбинированной кривошипно-балансирной системы автоматического уравнивания

Параметры балансирного и кривошипного противовесов системы автоматического уравнивания в значительной степени зависят от выбора критерия уравниваемости [20, 21]. В данной работе в качестве критериев уравниваемости принимается минимизация крутящего момента на кривошипном валу и максимизация равномерности распределения крутящего момента в течение цикла откачки. Разработаны: экспресс-метод для оценки параметров контргрузов, учитывающий статические составляющие нагрузок на плунжер и привод, и детальный метод с учетом динамических составляющих нагрузок. Преимуществом экспресс-метода является простота и наглядность полученных зависимостей для расчета веса и положения контргрузов, преимуществом детального метода – более точная и обоснованная оценка параметров. В обеих моделях принято допущение квазистатичности (медленном характере) изменения динамического уровня, поскольку характерное время изменения динамического уровня (оно, как правило, составляет от десятков минут до нескольких часов, в зависимости от эксплуатационных характеристик пласта, выбранного режима откачки) существенно меньше длительности единичного цикла работы насосной установки, не превышающего обычно 20–30 секунд (2–3 качания в минуту) [8]. Полагается, что в течение единичного цикла работы станка-качалки динамический уровень постоянен.

#### Экспресс-метод оценки параметров контргрузов

Экспресс-метод представлен в виде следующего многоэтапного алгоритма:

1. Задаем интервал изменения динамического уровня в скважине в периодическом режиме работы  $H_{d\min}$ – $H_{d\max}$ .

Для крайних режимов работы штанговой установки (при динамических уровнях ( $H_{d\min}$ ) и ( $H_{d\max}$ )) рассчитывается жидкостная нагрузка на плунжер [17]:

$$P_l(H_d) = \left[ \left( P_w + \int_0^L \left( \rho_{ml} g \cos \alpha + f_{ml} \frac{\rho_{ml} v_t^2}{2d_t} \right) dl \right) - \left( P_z + \int_{H_d}^L (\rho_{mz} g \cos \alpha) dl \right) \right] S_p, \quad (1)$$

где  $\rho_{ml}$ ,  $\rho_{mz}$  – плотность смеси в НКТ и затрубном пространстве соответственно;  $\alpha$  – угол наклона оси скважины к вертикали, рад.;  $f_{ml}$  – коэффициент трения жидкости о стенки НКТ;  $d_t$  – внутренний диаметр НКТ;  $S_p$  – площадь поперечного сечения плунжера;  $L$  – глубина подвески насоса;  $H_d$  – динамический уровень;  $P_z$  – давление газа в затрубном пространстве;  $P_w$  – устьевое давление.

Плотность смеси в затрубном пространстве и плотности НКТ, а также градиент давления рассчитываются согласно механическим моделям.

2. Параметры дополнительного балансирного контргруза определяются с учетом следующего условия: изменение момента относительно оси качаний балансира, обусловленного изменением жидкостной нагрузки на плунжер в процессе перемещения динамического уровня, компенсируется равным изменением момента балансирного контргруза благодаря его перемещению. Задаваясь величиной «длины хода» контргруза вдоль балансира  $\Delta l$ , получим выражение для веса балансирного контргруза:

$$Q_b = \frac{(P_l(H_{d\min}) - P_l(H_{d\max})) k_l}{2\Delta l}, \quad (2)$$

где  $k_l$  – длина переднего плеча балансира (расстояние от головки балансира до оси качания);

3. Определяется средняя (за период откачки) величина плеча дополнительного балансирного контргруза

$$c_m = c_{\max} - \frac{\Delta l}{2}, \quad (3)$$

где  $c_{\max}$  – крайнее положение дополнительного контргруза на балансире. Для минимизации веса балансирного контргруза рекомендуется задавать его максимально возможным (т. е. равным длине заднего плеча).

4. Плечо кривошипного (основного) контргруза рассчитывается исходя из условия, что при жидкостной нагрузке на плунжер, равной среднеарифметической жидкостной нагрузке в крайних положениях динамического уровня  $P_{lm} = 0,5(P_l(H_{d\min}) + P_l(H_{d\max}))$ , дополнительный балансирный контргруз находится в своем «среднем» положении на балансире  $c_m$ .

$$R = \left( \left( P_r + \frac{P_{lm}}{2} \right) \frac{k_l}{k} - Q_b \frac{c_m}{k} \right) \frac{r}{G_p}, \quad (4)$$

где  $Q_b$  – вес дополнительного балансирного груза;  $P_r$  – вес насосных штанг в жидкости;  $k$  – длина заднего плеча балансира (расстояние от оси качания до оси подвески шатунной траверсы);  $r$  – радиус кривошипа, соответствующий принятой длине хода;  $R$  – расстояние от центра кривошипного вала до центра тяжести роторного контргруза;  $G_p$  – суммарный вес кривошипных контргрузов, Н;

В результате расчета параметров динамической системы уравнивания согласно уравнениям (1)–(5) рассчитываем динамику положения центра масс дополнительного груза на балансире как функцию динамического уровня:

$$c(H_d) = \frac{k}{Q_b} \left( \left( P_r + \frac{P_l(H_d)}{2} \right) \frac{k_l}{k} - \frac{G_p R}{r} \right). \quad (5)$$

#### Анализ результатов расчетов

Исследование влияния эксплуатационных факторов на параметры системы динамического уравнивания привода штанговой установки выполняется на примере станка-качалки 7СК8-3.5-4000. Параметры станка-качалки: длина переднего  $l_1$  и заднего пле-

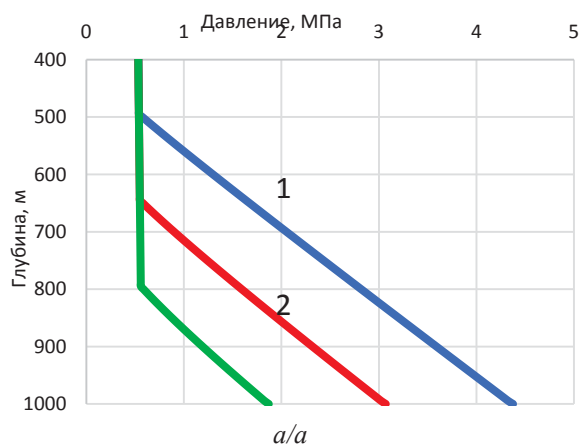
ча  $l_2$  балансира – 3500 и 2500 мм соответственно, длина шатуна  $l_p$  – 3000 мм, результирующая масса кривошипных грузов составляет 6080 кг. В таблице представлены принятые в расчетах параметры скважины и штанговой установки.

**Таблица.** Геолого-технические и технологические параметры скважины и штанговой установки

**Table.** Geological, technical and technological parameters of the well and rod installation

Внутренний диаметр лифтовых труб, мм Inner diameter of lift pipes, mm	62
Диаметр насоса, мм/Pump diameter, mm	57
Диаметр штанг, мм/Rod diameter, mm	22
Плотность материала штанг, кг/м <sup>3</sup> Rod material density, kg/m <sup>3</sup>	7800
Глубина спуска насоса, м/Pump descent depth, m	1000
Устьевое давление, МПа/Wellhead pressure, MPa	0,5
Затрубное давление газа, МПа Annular gas pressure, MPa	0,5
Динамический уровень, м/Dynamic level, m	500–800
Вязкость воды; нефти, мПа*с Viscosity of water; oil, mPa*s	1; 10
Плотность воды; нефти, кг/м <sup>3</sup> Density of water, oil, kg/m <sup>3</sup>	1000; 820
Обводненность продукции/Water cut, %	60
Длина хода полированного штока, м Stroke length of polished rod, m	2,5
Число качаний в минуту Number of strokes per minute	6
Максимальное плечо балансирующего груза в процессе изменения уровня жидкости, м Maximum arm of the balancing weight when changing the liquid level, m	2,5 (равно длине заднего плеча)

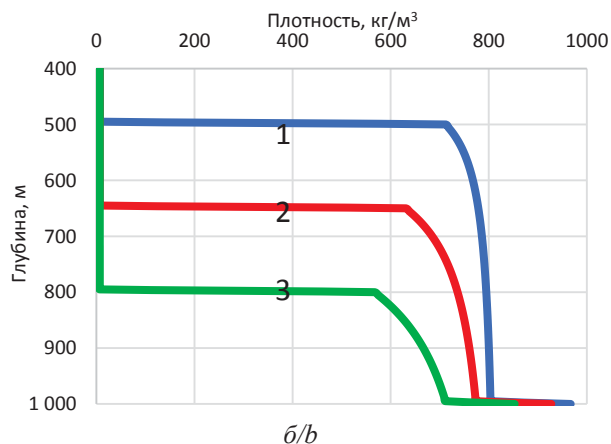
В процессе снижения динамического уровня с 500 до 800 м в период откачки скважинной продукции давление на приеме насоса снижается с 4,4 до 1,9 МПа (рис. 2, а). В связи со снижением давления интенсивность разгазирования нефти в затрубном пространстве скважины возрастает, и плотность жидкости снижается. В частности, при крайних положениях динамического уровня (500 и 800 м) средняя плотность смеси в затрубном пространстве составляет 784 и 661 кг/м<sup>3</sup> соответственно (рис. 2, б).



Снижение давления на приеме насоса приводит к росту жидкостной нагрузки на плунжер, обусловленному разницей весов столбов жидкости в НКТ и затрубном пространстве (рис. 3), при снижении динамического уровня от 500 до 800 м нагрузка на плунжер возрастает до 53 %, с 12,2 до 18,7 кН. Рост нагрузок на плунжер в период откачки при периодическом способе добычи приводит к разбалансировке станка-качалки. Для сохранения балансировки независимо от текущего положения уровня жидкости необходимо динамическое уравнивание привода, реализуемое в предлагаемой системе автоматического уравнивания.

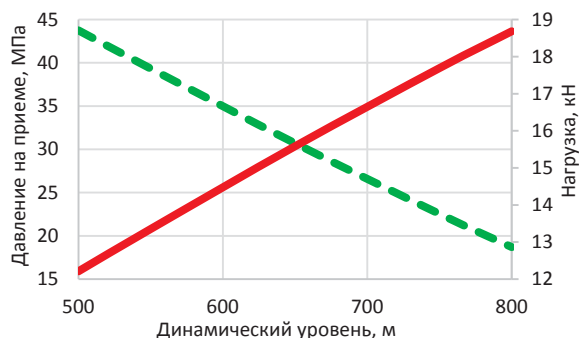
Требуемый (для поддержания динамической уравниваемости) вес дополнительного балансирующего контргруза в значительной степени зависит от пределов изменения нагрузок на плунжер в период откачки, т. е. от интервала изменения динамического уровня (разницы уровней в крайних верхнем и нижнем положении  $\Delta H_d = H_{dmax} - H_{dmin}$ , а также от принятой «длины хода» контргруза вдоль балансира  $\Delta l$  (рис. 4). При увеличении  $\Delta H_d$  вес балансирующего контргруза  $Q_b$  возрастает (до 11,3 кН), при увеличении  $\Delta l$  снижается (с 11,3 до 5,7 кН). Рост  $Q_b$  с увеличением  $\Delta H_d$  связан с необходимостью компенсации большей жидкостной нагрузки на плунжер при снижении динамического уровня, снижение  $Q_b$  с увеличением  $\Delta l$  обусловлено увеличением «размаха» (разницы) плеча балансирующего контргруза в процессе его перемещения вдоль балансира.

Плечо основного кривошипного контргруза напрямую зависит от веса балансирующего контргруза (рис. 4, 5). При увеличении интервала изменения динамического уровня  $\Delta H_d$  вес балансирующего груза возрастает (кривые 1–3, рис. 4), плечо кривошипного груза, напротив, снижается (кривые 1–3, рис. 5). Например, при  $\Delta l = 1$  м требуемый вес балансирующего контргруза возрастает до 8 кН, а плечо кривошипного контргруза снижается на 23 %, с 1,03 до 0,79 м. При увеличении веса дополнительного балансирующего контргруза увеличивается вклад балансирующей и снижается вклад кривошипной составляющей в системе комбинированного уравнивания, поэтому плечо кривошипного груза уменьшается.



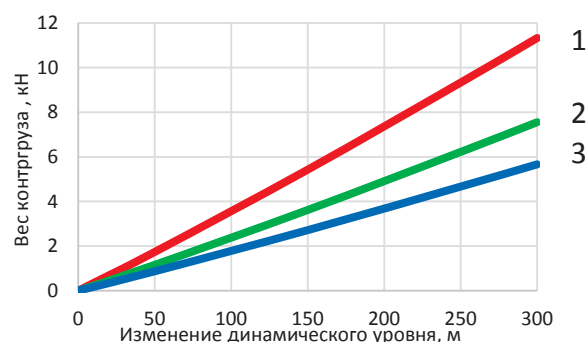
**Рис. 2.** Распределение давления (а) и плотности флюида (б) в затрубном пространстве до приема насоса при динамическом уровне 500 (1), 650 (2) и 800 (3) м

**Fig. 2.** Distribution of pressure (a) and fluid density (b) in the annulus before the pump intake at a dynamic level of 500 (1), 650 (2) and 800 (3) m



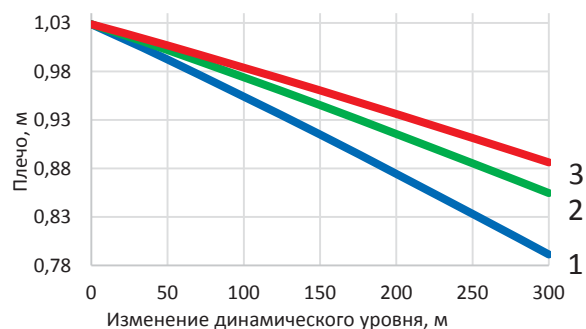
**Рис. 3.** Динамика давления на приеме (штриховая линия) и жидкостной нагрузки на плунжер (сплошная линия) при изменении динамического уровня в период откачки скважинной продукции

**Fig. 3.** Dynamics of pressure at the intake (dashed line) and liquid load on the plunger (solid line) with a change in the dynamic level during the pumping out of well products



**Рис. 4.** Зависимость веса дополнительного балансирующего контргруза от изменения динамического уровня в процессе периодической откачки (1 – «длина хода» контргруза вдоль балансира  $\Delta l=1$  м, 2 –  $\Delta l=1,5$  м, 3 –  $\Delta l=2$  м)

**Fig. 4.** Dependence of the weight of the additional balancing counterweight on the change in the dynamic level in the process of periodic pumping (1 – «stroke» of the counterweight along the balancer  $\Delta l=1$  m, 2 –  $\Delta l=1,5$  m, 3 –  $\Delta l=2$  m)



**Рис. 5.** Расчет плеча кривошипного контргруза как функции изменения динамического уровня в процессе периодической откачки (1 – «длина хода» контргруза вдоль балансира  $\Delta l=1$  м, 2 –  $\Delta l=1,5$  м, 3 –  $\Delta l=2$  м)

**Fig. 5.** Calculation of the arm of the crank counterweight as a function of the change in the dynamic level in the process of periodic pumping (1 – «stroke» of the counterweight along the balancer  $\Delta l=1$  m, 2 –  $\Delta l=1,5$  m, 3 –  $\Delta l=2$  m)

В ходе расчетов получено, что при увеличении динамического уровня с 500 до 800 м плечо дополнительного балансирующего контргруза возрастает с 1,5 до 2,5 м, то есть на требуемую величину  $\Delta l$ .

#### Детальный метод расчета параметров автоматического уравнивания

В работе [22] разработана математическая модель динамики нагрузок, действующих на штанговую колонну и привод при эксплуатации скважины в периодическом режиме. Модель базируется на уравнении динамики деформаций штанговой колонны, которая описывается волновым уравнением продольных упругих колебаний стержня с учетом удельной внешней силы, действующей на штанги, складывающейся из силы тяжести насосных штанг в жидкости, силы вязкого трения штанг о жидкость и силы граничного трения штанг о стенки НКТ [23]:

$$\rho_s S_r \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = ES_r \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) + f_g + f_h + f_b,$$

где  $u(x,t)$  – перемещение фиксированной точки колонны штанг, м;  $t$  – время, с;  $E$  – модуль Юнга материала штанг, Па;  $\rho_s$  – плотность материала штанг,  $\text{кг/м}^3$ ;  $x$  – лагранжева координата по длине колонны штанг, м;  $S_r$  – площадь поперечного сечения штанг,  $\text{м}^2$ ;  $f_g$  – сила тяжести, действующая на единицу длины штанговой колонны, Н/кг;  $f_h, f_b$  – удельная на единицу длины штанг сила гидродинамического и граничного трения, Н/м.

Граничные условия для задачи учитывают колебания уровня жидкости в затрубном пространстве  $h(t)$  при расчете давления на приеме насоса  $p_p(t)$  и, соответственно, нагрузок, действующих на плунжер штангового насоса

$$\begin{cases} u(0,t) = \frac{S}{2}(1 - \cos(2\pi nt)); \\ ES_r \frac{\partial u}{\partial x}(L,t) = (p_{out} - p_{pl})S_p - F_{fr}, \end{cases}$$

где  $S$  – длина хода полированного штока, м;  $n$  – число качаний,  $\text{с}^{-1}$ ;  $L$  – длина штанговой колонны, м;  $p_{out}$  – давление на выкиде насоса, МПа;  $S_p$  – площадь поперечного сечения плунжера,  $\text{м}^2$ ;  $F_{fr}$  – сила граничного трения в плунжерной паре, Н;  $p_{pl}$  – давление в подплунжерной полости насоса, МПа.

Разработаны кинематическая и динамическая модели работы привода, учитывающие геометрию станка-качалки: изменение плеч нагрузок, связанных с силой натяжения канатной подвески  $T$  и веса балансирующего груза  $G_b$ , в процессе качания, изменение угла между балансиром и шатуном в точке их сочленения (рис. 6) [14].

Расчет параметров системы автоматического уравнивания в рамках детального метода включает следующие пункты:

1. Задаем интервалами времени работы скважины в периоды откачки и накопления. Интервал изменения динамического уровня в скважине в периодическом режиме работы  $H_{dmin}-H_{dmax}$  рассчитывается с учетом следующего уравнения динамики уровня жидкости в затрубном пространстве:

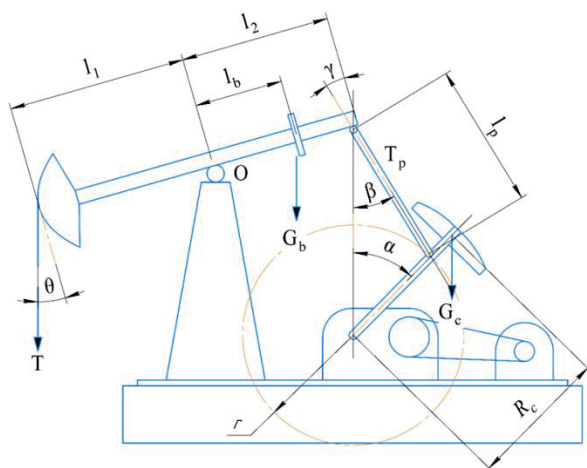


Рис. 6. Схема станка-качалки

Fig. 6. Pumping unit scheme

$$h(t) = \frac{p_{res} - \Delta p_{pr} - \rho g H_p}{\rho g} \times \left( \exp\left(-\frac{K_p \rho g t}{S}\right) - 1 \right) + h_{min} \exp\left(-\frac{K_p \rho g t}{S}\right),$$

где  $\rho$  – плотность жидкости;  $H_p$  – глубина подвески штангового насоса;  $h_{min}$  – минимальное значение динамического уровня, соответствующее минимуму давления на приеме насоса  $p_{pmin}$ ;  $t$  – время;  $S$  – площадь кольцевого сечения между насосными трубами и обсадной колонной. Нижнее положение динамического уровня рассчитывается исходя из критерия равенства подачи насоса и притока пластового флюида:

$$Q_{res}(K_p, p_{res}, p_p + \Delta p_{pr}) = \eta(p_p) q_T,$$

где  $Q_{res}$  – дебит скважины по жидкости;  $\eta_p$  – коэффициент подачи насоса;  $K_p$  – коэффициент продуктивности пласта;  $p_{res}$  – пластовое давление;  $p_p$  – давление

на приеме насоса;  $\Delta p_{pr}$  – разница забойного давления и давления на приеме;  $q_T$  – теоретическая подача;

2. Жидкостная нагрузка на плунжер, вес и положение балансирующего груза рассчитываются так же, как и для экспресс-методики, однако нагрузка на головку балансира  $T$  рассчитывается с учетом динамической составляющей из решения волнового уравнения [21]:

$$P_{дин}(t) = ES_r \frac{\partial u}{\partial x}(0, t).$$

3. Плечо кривошипного (основного) контргруза рассчитывается исходя из условия минимизации крутящего момента на кривошипном валу, определяемого с учетом зависимости [24, 25]

$$M(t) = \left( \frac{(T(t)l_1 - G_b l_b) \cos \theta(t)}{l_2 \cos \gamma(t)} \times \left( \sin(\alpha(t) + \beta(t)) - G_c \frac{R_c}{r} \sin(\alpha(t)) \right) \right) r,$$

где  $T$  – нагрузка на головку балансира;  $l_2$  – длина заднего плеча балансира;  $l_b$ ,  $G_b$  – соответственно плечо и вес балансирующего уравновешивающего контргруза;  $T_p$  – усилие в шатуне кривошипно-шатунного механизма;  $R_c$ ,  $G_c$  – соответственно радиус и вес кривошипного уравновешивающего контргруза.

#### Сравнение методов расчета системы автоматического уравнивания

Для обоснования эффективности автоматической системы динамического уравнивания и сравнения точности предложенных методик выполнены расчеты формирования крутящего момента на кривошипном валу в процессе работы штанговой установки в периодическом режиме (рис. 7) [26].

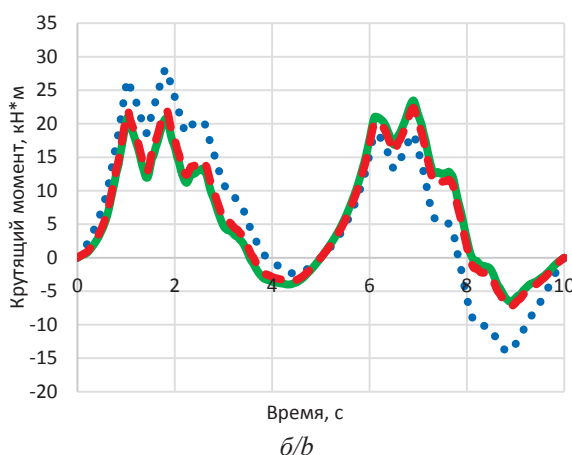
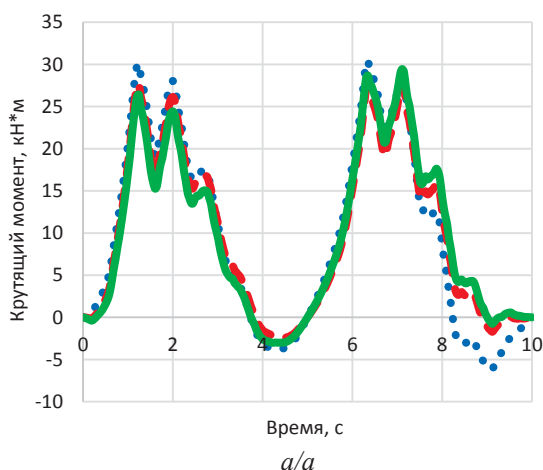


Рис. 7. Сравнение динамики крутящих моментов для предложенных методов расчета в нижнем (а) и верхнем (б) положении динамического уровня (сплошная линия – экспресс модель, штриховая – детальная модель, точки – обычное кривошипное уравнивание)

Fig. 7. Dynamics of torques comparison for the proposed calculation methods in the lower (a) and upper (b) position of the dynamic level (solid line – express model, dashed line – detailed model, dots – conventional crank balancing)



Из графиков видно, что для УСШН с автоматической системой уравнивания достигается существенное снижение максимального крутящего момента – до 6 кН·м (26 %), при этом амплитуды крутящего момента в полциклах (ход вверх и вниз) равны 1 (для детального метода уравнивания) [27, 28]. Экспресс-метод расчета параметров контргруза несколько уступает детальному в эффективности. В нижнем положении динамического уровня максимальный крутящий момент для него на 3 кН·м (11,5 %) выше, чем для детального метода, а отношение пиков крутящего момента составляет 1,11, в верхнем положении разность крутящих моментов и асимметрия максимумов составляют соответственно 2,4 кН·м (11,3 %) и 1,11. Таким образом, оба метода расчета дают приемлемые результаты с точки зрения обеспечения минимального крутящего момента на кривошипном валу, выравнивания степени загрузки вала и электродвигателя [29, 30] в течение цикла от качки.

#### Выводы

1. Разработана методология расчета параметров автоматической системы динамического уравнивания. Для модельного примера показано, что при эксплуатации скважины в периодическом режиме для УСШН с автоматической системой уравнивания достигается существенное снижение максимального крутящего момента – до 6 кН·м (26 %), чем для УСШН с обычным балансирным уравниванием.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование нагрузок на привод штанговых установок в тихоходном режиме при добыче высоковязкой нефти / К.Р. Уразаков, Р.З. Нургалиев, Г.И. Бикбулатова, С.Л. Сабанов, Ю.А. Болтнева // Нефтегазовое дело. – 2020. – Т. 18. – № 1. – С. 120–129.
2. Viscosity effects on sand flow regimes and transport velocity in horizontal pipelines / E. Zorgani, H. Al-Awadi, W. Yan, S. Al-Lababid, H. Yeung, C.P. Fairhurst // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2018. – V. 92. – P. 89–96.
3. Gabor T. Sucker-rod pumping handbook: production engineering fundamentals and long-stroke rod pumping. – Houston, Texas: Gulf Professional Publishing, 2015. – 585 p.
4. Осипов Д.В. Контрольно-измерительные приборы и автоматизации технологического процесса на скважине, виды, принцип действия, назначения // Инновации. Наука. Образование. – 2021. – № 28. – С. 1017–1020.
5. Выбор критерия уравниваемости штанговых скважинных насосных установок / Г.И. Бикбулатова, Г.И. Болтнева, А.С. Галеев, Р.Н. Сулейманов, С.Л. Сабанов // Газовая промышленность. – 2019. – № 11 (792). – С. 124–128.
6. Зюзев А.М., Бубнов М.В. Диагностика уравниваемости штанговой глубинной насосной установки по ваттметрограмме // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 4. – С. 178–187.
7. Волохин Е.А., Терентьев А.Н., Волохин А.В. Усовершенствование балансирного привода штанговой скважинной насосной установки // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2019. – Т. 22. – № 3. – С. 19–25.
8. Бажин М.В., Муравский А.К. Краткий обзор способов уравнивания станков-качалок // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромышленного оборудования. – 2016. – Т. 1. – С. 130–136.
9. Сабанов С.Л. Сравнительный анализ критериев уравнивания тихоходной штанговой скважинной насосной

2. Предложен экспресс-метод для оценки параметров контргрузов, учитывающий статические составляющие нагрузок на плунжер и привод, и детальный метод с учетом динамических составляющих нагрузок. Показано, что оба метода расчета дают приемлемые результаты с точки зрения обеспечения минимального крутящего момента на кривошипном валу, выравнивания степени загрузки вала и электродвигателя в течение цикла от качки, для менее точного экспресс-метода крутящий момент до 3 кН·м (11,5 %) выше, чем для детального, а отношение пиков крутящего момента составляет 1,11.
3. Установлено, что требуемый (для поддержания динамической уравниваемости) вес дополнительного балансирного контргруза в значительной степени зависит от интервала изменения динамического уровня  $\Delta H_d$  в процессе от качки и «длины хода» контргруза вдоль балансира  $\Delta l$ . При увеличении  $\Delta H_d$  вес балансирного контргруза  $Q_b$  возрастает (до 11,3 кН в примере), при увеличении  $\Delta l$  снижается (с 11,3 до 5,7 кН). Плечо кривошипного груза при увеличении веса дополнительного балансирного контргруза уменьшается вследствие снижения вклада кривошипной составляющей в системе комбинированного уравнивания.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90135.*

- установки // Газовая промышленность. – 2019. – № 7 (787). – С. 104–109.
10. Model predictive automatic control of sucker rod pump system with simulation case study / B. Hansen, B. Tolbert, C. Vernon, J.D. Hedengren // Computers and Chemical Engineering. – 2019. – V. 121. – P. 265–284.
11. Takacs G., Kis L., Koncz A. The calculation of gearbox torque components on sucker-rod pumping units using dynamometer card data // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2016. – № 6. – P. 101–110.
12. Имитационное моделирование установки штангового глубинного насоса для добычи нефти / Д.С. Торгаева, М.П. Сухорук, Ю.А. Шурыгин, Ю.А. Шиняков, Н.А. Шаляпина // Доклады ТУСУР. – 2019. – № 3. – С. 71–78.
13. Gabor Takacs, Laszlo Kis. A new model to find optimum counterbalancing of sucker-rod pumping units including a rigorous procedure for gearbox torque calculations // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2021. – V. 205. – P. 1–11.
14. Brill J.P., Mukherjee H.K. Multiphase flow in wells. – Richardson, Texas: SPE, 1999. – 164 p.
15. Petalas N., Aziz K. A mechanistic model for multiphase flow in pipes // Petroleum Society of Canada. – 1998. – № 1. – P. 1–22.
16. Динамическая модель штанговой насосной установки для скважин с направленным профилем ствола / Р.Н. Бахтизин, К.Р. Уразаков, С.Ф. Исмагилов, А.С. Топольников, Ф.Ф. Давлетшин // Научные труды НИПИ «Нефтегаз» ГНКАР. – 2017. – № 4. – С. 74–82. DOI: 10.5510/OGP20170400333.
17. Boyuan Zheng, Xianwen Gao, Xiangyu Li. Fault detection for sucker rod pump based on motor power // Control Engineering Practice. – 2019. – V. 86. – P. 37–47.
18. Yang Y., Peng H., Wen Ch. Sand. Transport and deposition behaviour in subsea pipelines for flow assurance // Energies. – 2019. – V. 21. – № 12. – P. 1–12.
19. Стендовое моделирование динамических нагрузок на привод штанговых установок / К.Р. Уразаков, П.М. Тугунов, М.М. Ахтямов, В.А. Молчанова // Нефтегазовое дело. – 2020. – № 2. – С. 131–138.

20. Drift-flux parameters for three-phase steady-state flow in wellbores / H. Shi, J. Holmes, L. Diaz, L.J. Durlofsky, K. Aziz // SPE Journal. – 2005. – V. 10. – № 2. – P. 130–137.
21. On the numerical simulation of sand transport in liquid and multiphase pipelines / M. Leporinia, A. Terenzi, B. Marchetti, F. Corvaro, F. Polonara // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – V. 175. – P. 519–535.
22. Building the dynamometer card of sucker rod pump using power consumption of the electric motor of pumping unit / G. Guluyev, A. Pashayev, F. Pashayev, A. Rzayev, E. Sabziyev // Problems of cybernetics and informatics: IV international conference. – Baku, Azerbaijan, September 12–14, 2012. – V. III. – P. 19–21.
23. Исследование режимов работы частотно-регулируемого электропривода станка-качалки / Р.Ф. Ярыш, А.Р. Гарифуллина, Р.И. Гарифуллин, А.Н. Якунин // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. – 2018. – № 11–12. – С. 56–64.
24. Сагдатуллин А.М. Регулирование режимов работы установок скважинных штанговых насосов оборудованных станками качалками // Ученые записки Альметьевского государственного нефтяного института. – 2015. – Т. 13. – № 1. – С. 228–235.
25. Акберов Я.С. Анализ метода управления электропривода станка-качалки // Технология машиностроения. – 2019. – № 10. – С. 36–40.
26. Хакимьянов М.И. Удельный расход электроэнергии при механизированной добыче нефти штанговыми глубиннонасосными установками // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2014. – Т. 18. – № 2 (63). – С. 54–60.
27. Критерий уравниваемости тихоходного привода скважинной штанговой насосной установки для повышения надежности редуктора / А.С. Галеев, Р.З. Нургалеев, Г.И. Бикбулатова, С.Л. Сабанов, Ю.А. Болтнева // Нефтегазовое дело. – 2019. – Т. 17. – № 6. – С. 96–101.
28. Молчанов А.Г. Пути дальнейшего совершенствования штанговых скважинных насосных установок // Бурение и нефть. – 2014. – № 2. – С. 3–8.
29. Станок-качалка: пат. Рос. Федерация № 2709589, опубл. 10.10.2019. Бюл. № 28.
30. Уразаков К.Р., Молчанова В.А., Тугунов П.М. Метод расчета динамических нагрузок и энергопотребления штанговой установки с системой автоматического уравнивания // Записки Горного института. – 2020. – Т. 246. – С. 640–649.

Поступила 16.05.2022 г.

Прошла рецензирование 21.09.2022 г.

#### Информация об авторах

**Уразаков К.Р.**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры машин и оборудования нефтегазовых промыслов, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

**Тугунов П.М.**, ассистент кафедры машины и оборудования нефтегазовых промыслов, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

UDC 622.276.53

## METHODOLOGY FOR CALCULATING THE COMBINED SYSTEM FOR BALANCING THE DRIVE OF A ROD INSTALLATION WITH FLUCTUATIONS IN THE DYNAMIC LEVEL

Kamil R. Urazakov<sup>1</sup>,  
urazakk@mail.ru

Pavel M. Tugunov<sup>1</sup>,  
TugunovPM@gmail.com

<sup>1</sup> Ufa State Petroleum Technological University,  
1, Kosmonavtov street, Ufa, 450044, Russia.

**Relevance.** Drive balance is one of the key factors determining the efficiency of well operation by downhole rod pump units. This is of particular importance for stripper wells, which operate at the margin of profitability due to low flow rates and high energy consumption. Transferring them to a periodic mode leads to systemic fluctuations in the dynamic level. A change in the dynamic level causes a change in the loads acting on the rod string and balancer drive. To maintain the balance of the pumping unit under these conditions, it is necessary to adjust the position of the balancing counterweights.

**Objective:** analysis of the automatic balancing system of the pumping unit, including an additional balancing counterweight, with the inclusion of automatic switching, which provides balance control by turning on the auxiliary electric motor; development of a methodology for calculating the parameters of a dynamic balancing system, which makes it possible to carry out calculations of the deflection balancing mechanism.

**Methods:** express method for estimating the parameters of counterweights, taking into account the static components of the loads on the plunger and drive, and detailed method, taking into account the dynamic components of the loads.

**Results.** It is shown that both methods of calculation give acceptable results in terms of providing a minimum torque on the crankshaft to equalize the degree of loading of the shaft and the electric motor during the pumping cycle.

**Conclusions.** It was established that the required (to maintain dynamic balance) weight of the additional balancing counterweight grows to a large extent as the difference in the dynamic level increases during pumping and decreases with the growth in the «stroke length» of the counterweight along the balancer. The shoulder of the crank load with the increase in the weight of the additional balancing counterweight decreases due to decrease in the contribution of the crank component in the combined balancing system.

### Key words:

rod pumping unit, periodic pumping mode, dynamic level, modeling, pumping unit, additional balancing weight, balancing.

The research was financially supported by the RFBR within the scientific project no. 19-38-90135.

### REFERENCES

- Urazakov K.R., Nurgaliyev R.Z., Bikbulatova G.I., Sabanov S.L., Boltneva Yu.A./ Investigation of loads on the drive of rod installations in low-speed mode during the production of high-viscosity oil. *Oil and gas engineering*, 2020, vol. 18, no. 1, pp. 120–129. In Rus.
- Zorgani E., Al-Awadi H., Yan W., Al-Lababid S., Yeung H., Fairhurst C.P. Viscosity effects on sand flow regimes and transport velocity in horizontal pipelines. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2018, vol. 92, pp. 89–96.
- Gabor T. *Sucker-rod pumping handbook: production engineering fundamentals and long-stroke rod pumping*. Houston, Texas, Gulf Professional Publishing, 2015. 585 p.
- Osipov D.V. Instrumentation and automation of the technological process at the well, types, principle of operation, purpose. *Innovations. The science. Education*, 2021, no. 28, pp. 1017–1020. In Rus.
- Bikbulatova G.I., Boltneva G.I., Galeev A.S., Suleymanov R.N., Sabanov S.L. Choice of balance criterion for sucker-rod pumping units. *Gas industry*, 2019, no. 11 (792), pp. 124–128. In Rus.
- Zyuzev A.M., Bubnov M.V. Diagnosis of the balance of a sucker-rod pumping unit according to the wattmeter diagram. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 4, pp. 178–187. In Rus.
- Volokhin E.A., Terentiev A.N., Volokhin A.V. Improvement of the balance drive of a sucker rod pumping unit. *Bulletin of ISTU named after M.T. Kalashnikov*, 2019, vol. 22, no. 3, pp. 19–25. In Rus.
- Bazhin M.V., Muravsky A.K. A brief review of methods for balancing pumping units. *Actual problems of improving the efficiency and safety of operation of mining and oilfield equipment*, 2016, vol. 1, pp. 130–136. In Rus.
- Sabanov S.L. Comparative analysis of balancing criteria for a low-speed sucker rod pumping unit. *Gas industry*, 2019, no.7 (787), pp. 104–109. In Rus.
- Hansen B., Tolbert B., Vernon C., Hedengren J.D. Model predictive automatic control of sucker rod pump system with simulation case study. *Computers and Chemical Engineering*, 2019, vol. 121, pp. 265–284.
- Takacs G., Kis L., Koncz A. The calculation of gearbox torque components on sucker-rod pumping units using dynamometer card data. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2016, no. 6, pp. 101–110.
- Torgaeva D.S., Sukhorukov M.P., Shurygin Yu.A., Shinyakov Yu.A., Shalyapina N.A. Simulation modeling of a sucker rod pump for oil production. *Reports of TUSUR*, 2019, no. 3, pp. 71–78. In Rus.
- Gabor Takacs, Laszlo Kis. A new model to find optimum counterbalancing of sucker-rod pumping units including a rigorous procedure for gearbox torque calculations. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, vol. 205, pp. 1–11.
- Brill J.P., Mukherjee H.K. *Multiphase flow in wells*. Richardson, Texas: SPE, 1999. 164 p.
- Petalas N., Aziz K. A mechanistic model for multiphase flow in pipes. *Petroleum Society of Canada*, 1998, no. 1, pp. 1–22.
- Bakhtizin R.N., Urazakov K.R., Ismagilov S.F., Topolnikov A.S., Davletshin F.F. Dynamic model of a sucker-rod pumping unit for wells with a directed borehole profile. *Scientific works of NIPi «Neftegaz» SOCAR*, 2017, no. 4, pp. 74–82. In Rus. DOI: 10.5510/OGP20170400333.
- Boyuan Zheng, Xianwen Gao, Xiangyu Li. Fault detection for sucker rod pump based on motor power. *Control Engineering Practice*, 2019, vol. 86, pp. 37–47.

18. Yang Y., Peng H., Wen Ch. Sand. Transport and deposition behaviour in subsea pipelines for flow assurance. *Energies*, 2019, vol. 21, no. 12, pp. 1–12.
19. Urazakov K.R., Tugunov P.M., Akhtyamov M.M., Molchanova V.A. Bench modeling of dynamic loads on the drive of rod installations. *Oil and gas engineering*, 2020, no. 2, pp. 131–138. In Rus.
20. Shi H., Holmes J., Diaz L., Durlafsky L.J., Aziz K. Drift-flux parameters for three-phase steady-state flow in wellbores. *SPE Journal*, 2005, vol. 10, no. 2, pp. 130–137.
21. Leporinia M., Terenzi A., Marchetti B., Corvaro F., Polonara F. On the numerical simulation of sand transport in liquid and multiphase pipelines. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 175, pp. 519–535.
22. Guluyev G., Pashayev A., Pashayev F., Rzayev A., Sabziyev E. Building the dynamometer card of sucker rod pump using power consumption of the electric motor of pumping unit. *IV international conference. Problems of cybernetics and informatics*. Baku, Azerbaijan, September 12–14, 2012. Vol. III, pp. 19–21.
23. Yarysh R.F., Garifullina A.R., Garifullin R.I., Yakunin A.N. Studying of the operating modes of the frequency-controlled electric drive of the pumping unit. *News of Higher Educational Institutions. Energy problems*, 2018, no. 11–12, pp. 56–64. In Rus.
24. Sagdatullin A.M. Operating modes regulation of installations of borehole rod pumps equipped with rocking machines. *Bulletin of Almet'yevsk State Oil Institute*, 2015, vol. 13, no. 1, pp. 228–235. In Rus.
25. Akberov Y.S. Analysis of the control method of the pumping unit electric drive. *Mechanical engineering technology*, 2019, no. 10, pp. 36–40. In Rus.
26. Khakimyanov M.I. Specific power consumption in mechanized oil production by sucker-rod pumping units. *Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University*, 2014, vol. 18, no. 2 (63), pp. 54–60. In Rus.
27. Galeev A.S., Nurgaliev R.Z., Bikbulatova G.I., Sabanov S.L., Boltneva Y.A. Balance criterion for a low-speed drive of a down-hole rod pumping unit to improve the reliability of the gearbox. *Oil and gas engineering*, 2019, vol. 17, no. 6, pp. 96–101. In Rus.
28. Brunman V.E., Vataev A.S., Volkov A.N., Volkov E.A., Petkova A.P., Kochanzhi F.I., Plotnikov D.G. Methods for improving the energy efficiency of oil production with sucker-rod pumps in the development of low-rate fields in the cluster method. *Bulletin of mechanical engineering*, 2017, no. 2, pp. 33–37. In Rus.
29. Urazakov K.R., Molchanova V.A., Tugunov P.M., Baryshnikov Yu.N., Alimetov Sh.A. *Stanok-kachalka* [Pumping unit]. Patent RF no. 2709589, 2019.
30. Urazakov K.R., Molchanova V.A., Tugunov P.M. Method for calculating dynamic loads and energy consumption of a rod installation with an automatic balancing system. *Notes of Mining Institute*, 2020, vol. 246, pp. 640–649. In Rus.

Received: 16 May 2022.  
Reviewed 21 September 2022.

**Information about the authors**

**Kamil R. Urazakov**, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University.  
**Pavel M. Tugunov**, assistant, Ufa State Petroleum Technological University.

Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*  
Корректура и перевод на английский язык *С.В. Жаркова*  
Дизайн обложки *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива  
*Валерия Касаткина*

Руководство для авторов и образец оформления статьи: [izvestiya.tpu.ru](http://izvestiya.tpu.ru)

Подписано к печати 28.11.2022. Дата выхода журнала: 30.11.2022.  
Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. 26,52. Уч.-изд. л. 23,99.  
Заказ 274-22. Тираж 500 экз. Цена свободная.



**Издательство**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Адрес учредителя, редакции, издателя, типографии:  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, каб. 139.



TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY



ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ