

**ИЗВЕСТИЯ  
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 331, № 5, 2020

# ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ

## Редакционная коллегия

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

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

Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2020

## 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

Пятилетний импакт-фактор РИНЦ за 2015 г. – 0,339  
(без самоцитирования – 0,287)

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

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

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

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

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

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

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

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

Полнотекстовый доступ к электронной версии журнала возможен на сайтах [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru), [scholar.google.com](http://scholar.google.com)

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

Volume 331, № 5, 2020

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

**Editorial Board**

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

**AIMS AND SCOPES**

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

The journal was founded in 1903.

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

ISSN (print) – 2500-1019

ISSN (on-line) – 2413-1830

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

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

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

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

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

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

The publication of manuscripts is free of charge.

The journal is on open access on  
[www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru), [scholar.google.com](http://scholar.google.com).

## СОДЕРЖАНИЕ

## CONTENTS

- Учет параметра анизотропии проницаемости в геолого-гидродинамических моделях карбонатных объектов (на примере Гагаринского месторождения)  
Менгалиев А.Г., Мартышев Д.А. 7 Accounting the parameter of anisotropy of permeability in geological and hydrodynamic models of carbonate objects (on the example of the Gagarin deposit)  
Mengaliev A.G., Martyshev D.A.
- Анализ эффективности применения сайклинг-технологии при разработке залежей газового конденсата  
Волженина Д.А., Шарф И.В., Сабанчин И.В. 18 Analysis of efficiency of applying cycling in reservoir development of gas condensate  
Volzhenina D.A., Sharf I.V., Sabanchin I.V.
- Методология управления геохимическим балансом водосборов на территории Западной Сибири  
Савичев О.Г., Гусева Н.В. 28 Methodology of management of river basins geochemical balance in Western Siberia  
Savichev O.G., Guseva N.V.
- Изучение зон аномального пластового давления с помощью анализа атрибутов сейсмических полей на примере месторождений Западной Сибири  
Орехов А.Н., Аmani Мангуа Марк М 46 Studying the abnormal formation pressure zones by analyzing seismic field attributes on the example of Western Siberia deposits  
Orekhov A.N., Amani Mangoua Marc M
- Очистка газовых выбросов от CO<sub>2</sub> в среде трифторуксусной кислоты при добыче нефти и газа  
Иванова М.С., Вишнецкая М.В., Томский К.О. 57 Cleaning gas emissions from CO<sub>2</sub> through trifluoroacetic acid in oil and gas production  
Ivanova M.S., Vishnetskaya M.V., Tomsky K.O.
- Влияние природных факторов на содержание ртути в озерах севера Западной Сибири  
Захарченко А.В., Пасько О.А., Тигеев А.А. 64 Impact of natural factors on mercury in lakes of the north of western Siberia  
Zakharchenko A.V., Pasko O.A., Tigeev A.A.
- Экспериментальное исследование контроля состояния обмоток высоковольтных трансформаторов на основе коммутационных импульсов  
Лавринович В.А., Мытников А.В. 77 Experimental research of controlling high voltage transformer winding condition based on switching impulses  
Lavrinovich V.A., Mytnikov A.V.
- Динамика геометрически и физически нелинейного чувствительного элемента наноэлектромеханического датчика в виде неоднородной нанобалки, находящейся в температурном и шумовом полях  
Крысько В.А., Папкина И.В., Яковлева Т.В., Захарова А.А., Жигалов М.В., Крысько А.В. 87 Dynamics of a geometrically and physically nonlinear sensitive element of a nanoelectromechanical sensor in the form of an inhomogeneous nanobeam in the temperature and noise fields  
Krysko V.A., Papkova I.V., Yakovleva T.V., Zakharova A.A., Zhigalov M.V., Krysko A.V.
- Оптимальное проектирование безредукторной машины с переключением потока для ветрогенератора  
Практ В.А., Дмитриевский В.А., Казакбаев В.М. 97 Optimization of gearless flux switching machine design for wind generator systems  
Prakht V.A., Dmitrievskii V.A., Kazakbaev V.M.
- Моделирование и прогнозирование производства нефтепродуктов с учетом сезонности на основе авторегрессионных моделей  
Тугашова Л.Г., Затонский А.В. 109 Modeling and forecasting of petroleum products production taking into account seasonality on the basis of autoregressive models  
Tugashova L.G., Zatonskiy A.V.
- Влияние геолого-технических и технологических параметров на нагрузки и усталостную прочность в штанговой колонне винтовых насосов  
Уразакон К.Р., Латыпов Б.М. 120 Influence of operating conditions on loads and fatigue strength in a rod column of PCP  
Urazakov K.R., Latypov B.M.
- Ультразвуковая коагуляция в скрубберах Вентури: особенности реализации и эффективность применения  
Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Цыганок С.Н., Нестеров В.А. 128 Ultrasound coagulation in Venturi scrubbers: features of implementation and efficiency of application  
Khmelev V.N., Shalunov A.V., Tsyganok S.N., Nesterov V.A.
- О снижении уровня неопределенности при управлении заводнением залежей с трудноизвлекаемыми запасами  
Мухаметшин В.В., Кулешова Л.С. 140 On uncertainty level reduction in managing waterflooding of the deposits with hard to extract reserves  
Mukhametshin V.V., Kuleshova L.S.
- Органическая геохимия кайнозойских пород ушумунского бурогоугольного месторождения среднеамурского осадочного бассейна  
Тимошина И.Д., Фомин А.Н. 147 Organic geochemistry of Cenozoic rocks in the Ushumunskoe brown coal field of the Middle Amur sedimentary basin  
Timoshina I.D., Fomin A.N.
- Гидролиз концентрированных растворов нитрата карбамида  
Островский Д.Ю., Заборцев Г.М., Островский Ю.В. 158 Hydrolysis of urea nitrate concentrated solutions  
Ostrovsky D.Yu., Zabortsev G.M., Ostrovsky Yu.V.
- Влияние противопаводковых дамб в пойме на форму зоны затопления, поле скоростей и глубин потока на примере численной модели участка реки Кондома  
Романовский Р.В. 166 Effect of flood protection dams in the river floodplain on flood zone shape, flow velocity fields and water levels on the example of a numerical model of the Kondoma river  
Romanovskiy R.V.

- |   |            |   |
|---|------------|---|
| <b>Идентификация гидродинамической модели скважины с электроцентробежным насосом по данным контроля возмущённых режимов эксплуатации</b><br>Соловьев И.Г., Говорков Д.А., Цибульский В.Р. | <b>181</b> | <b>Identification of a well hydrodynamic model with an electric submersible pump using the perturbed operation modes control data</b><br>Solovyev I.G., Govorkov D.A., Tsibulsky V.R.                 |
| <b>Эволюция нефтегазовой струи, истекающей через разрыв магистрального нефтепровода (газопровода), расположенного на дне водоема</b><br>Кильдибаева С.Р., Гималтдинов И.К.                | <b>193</b> | <b>Evolution of oil and gas jet flowing through rupture of main oil pipeline (gas pipeline) located on bottom of water reservoir</b><br>Kildibaeva S.R., Gimaitdinov I.K.                             |
| <b>Действие гамма-облучения на параметры активности микропорошков алюминия</b><br>Ильин А.П., Мостовщиков А.В., Рот Л.О., Змановский С.В., Смирнова В.В., Исмаилов Д.В., Рузиева Г.У.     | <b>201</b> | <b>Impact of gamma-radiation exposure on activity parameters of aluminium micropowders</b><br>Ilyin A.P., Mostovshchikov A.V., Root L.O., Zmanovskiy S.V., Smirnova V.V., Ismailov D.V., Ruzieva G.U. |
| <b>Алгоритмы бездатчикового отказоустойчивого управления вентильно-индукторным электродвигателем насоса для добычи нефти</b><br>Однокопылов Г.И., Розаев И.А.                             | <b>208</b> | <b>Algorithms of fault-tolerant sensorless vector control of switched-reluctance motor in electrical oil pump</b><br>Odnokopylov G.I., Rozaev I.A.  |

УДК 622.276

## УЧЕТ ПАРАМЕТРА АНИЗОТРОПИИ ПРОНИЦАЕМОСТИ В ГЕОЛОГО-ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ КАРБОНАТНЫХ ОБЪЕКТОВ (НА ПРИМЕРЕ ГАГАРИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ)

Менгалиев Александр Генрихович<sup>1</sup>,  
mengaliev.alexandr@gmail.com

Мартюшев Дмитрий Александрович<sup>2</sup>,  
martyushevdi@inbox.ru

<sup>1</sup> Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми,  
Россия, 614000, г. Пермь, ул. Советской Армии, 29.

<sup>2</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Россия, 614990, г. Пермь, пр. Комсомольский, 29.

**Актуальность работы.** Значительная доля разрабатываемых нефтяных активов, приуроченных к карбонатным сложнопостроенным объектам, заметно возросла как на территории России, так и в Пермском крае. Достоверное знание параметров трещинно-порового типа коллектора позволяет уточнить действующие геолого-гидродинамические модели, подобрать рациональную систему разработки, регулировать процессы разработки и обеспечить для данного пласта оптимальные геолого-технические мероприятия. При построении и адаптации геолого-гидродинамических моделей нефтяных месторождений, особенно относящихся к сложнопостроенным карбонатным коллекторам, важное значение имеет знание как горизонтальной, так и вертикальной проницаемости (параметра анизотропии). При создании геолого-гидродинамических моделей карбонатных объектов месторождений Пермского края зачастую вертикальную проницаемость принимают равной нулю, хотя это далеко не так. Определение вертикальной проницаемости (параметра анизотропии), ее динамика при изменении пластового и забойного давлений и использование в геолого-гидродинамических моделях является актуальной задачей, которая позволит повысить качество и достоверность использования цифровых моделей для расчета и прогнозирования процесса добычи нефти.

**Цель:** совершенствование геолого-гидродинамических моделей с учетом использования показателя анизотропии проницаемости.

**Объект:** карбонатная фаменская залежь Гагаринского месторождения.

**Методы:** обработка данных геолого-промысловых исследований; использование гидродинамического симулятора Tempest версии 8.3.1 компании Roxar.

**Результаты.** По предложенной в статье методике определения параметра анизотропии обработаны 252 исследования, проведенные на добывающих и нагнетательных скважинах фаменской залежи Гагаринского месторождения. Для каждой литолого-фациальной зоны построена зависимость показателя анизотропии проницаемости от забойного давления. Для прогнозирования и оценки эффективности применяемых геолого-технических мероприятий и технологических показателей разработки авторами статьи модифицирована геолого-гидродинамическая модель с учетом полученных зависимостей об изменении параметра анизотропии. С помощью модифицированной гидродинамической модели удалось значительно улучшить адаптацию как по добывающим, так и по нагнетательным скважинам. Таким образом, повысилось качество и достоверность цифровой модели фаменской залежи Гагаринского месторождения для расчетов и прогнозирования процесса добычи нефти.

### Ключевые слова:

Гидродинамические исследования скважин, вертикальная проницаемость, горизонтальная проницаемость, литолого-фациальные зоны, модифицированная гидродинамическая модель.

### Введение

Значительная доля разрабатываемых нефтяных активов, приуроченных к карбонатным сложнопостроенным объектам, заметно возросла как на территории России, так и в Пермском крае. Карбонатные сложнопостроенные коллектора характеризуются различными типами пустотности (поры, трещины, каверны), значительной неоднородностью, перетоками флюидов между типами пустот, а также различием между латеральной и вертикальной проницаемостью, данные факторы в значительной мере влияют на продуктивность и производительность добывающих скважин и в целом на коэффициент нефтеизвлечения [1–4]. Достоверное знание параметров трещинно-порового типа коллектора позволяет уточнить действующие геолого-гидродинамические модели (ГГДМ), подобрать раци-

ональную систему разработки, регулировать процессы разработки и обеспечить для данного пласта оптимальные геолого-технические мероприятия (ГТМ) [5–8].

При построении и адаптации ГГДМ нефтяных месторождений, особенно относящихся к сложнопостроенным карбонатным коллекторам, важное значение имеет знание как горизонтальной, так и вертикальной проницаемости (параметра анизотропии). При создании ГГДМ карбонатных объектов месторождений Пермского края зачастую вертикальную проницаемость принимают равной нулю, хотя это далеко не так [9, 10]. Даже в самых низкопроницаемых пластах аргиллитов, по которым в лабораторных исследованиях проницаемость практически была равна нулю, может быть развита трещиноватость, а если

существует еще и линзовидность напластования, то по всему резервуару вертикальную проницаемость принимать равной нулю неверно [11]. Особое значение знание вертикальной проницаемости в условиях сложнопостроенного карбонатного коллектора играет при активной роли пластовых вод [12–14]. Добыча нефти может быть высокой на протяжении некоторого периода времени, но затем снизится при появлении конуса подошвенной воды, который часто образуется при форсированной и нерациональной выработке запасов и необоснованных технологических режимах добывающих скважин. Процесс образования конусов протекает намного интенсивнее в трещинных коллекторах, имеющих вертикальные трещины, так как именно они простираются далеко вниз в подстилающие пласты, образуя пути для создания конусов воды. Таким образом, определение вертикальной проницаемости (параметра анизотропии) и использование ее в ГГДМ являются актуальными задачами, которые позволят повысить качество и достоверность использования цифровых моделей для расчета и прогнозирования процесса добычи нефти.

#### Методы определения параметра анизотропии (вертикальной проницаемости)

На сегодняшний день существует несколько промысловых методов, с помощью которых можно оценить вертикальную проницаемость, но каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки, которые представлены в таблице.

Параметр анизотропии проницаемости в карбонатных коллекторах может быть определен различными геофизическими, промысловыми и гидродинамическими исследованиями скважин и пластов (ГДИ). Изучение кернового материала и геофизические исследования не могут дать точных знаний об особенностях

пласта в связи с особенностями самих исследований. Наиболее разработанными методами определения параметра анизотропии проницаемости являются методы гидропрослушивания и трассирование меченых веществ, однако они достаточно длительные и дорогостоящие [15, 16]. Метод трассирующих индикаторов может быть надежно реализован на поздней стадии разработки месторождения при интенсивном обводнении продукции. Особое внимание следует уделять интерпретации данных гидродинамических исследований скважин (КВД или КВУ) как наиболее распространенному методу контроля за разработкой месторождений, позволяющему решить огромный круг производственных и научных задач [17, 18].

#### Определение параметра анизотропии проницаемости по данным гидродинамических исследований скважин

В статье [19] коллективом авторов изложена методика определения вертикальной проницаемости и параметра анизотропии проницаемости. Актуальность данных расчетов очевидна, поскольку, с одной стороны, повышает информативность исследований скважин методом восстановления давления, с другой стороны, позволяет получить весьма ценную информацию об анизотропии пласта без затрат на проведение специальных исследований. Ниже представлена методика определения параметра анизотропии на примере скважины № 405 фаменской залежи Гагаринского месторождения.

1. Исходная кривая восстановления давления (КВД) перестраивается в координатах « $P_{заб}(t) - \lg(t)$ » (рис. 1, а). Рассматривается конечная часть КВД – выделяется конечный участок и определяется уклон  $\beta$ , для текущего примера  $\beta = 6,0203$  МПа/lg с.
2. Также КВД строится в координатах « $P_{заб}(t) - 1/t^{0,5}$ » (рис. 1, б).

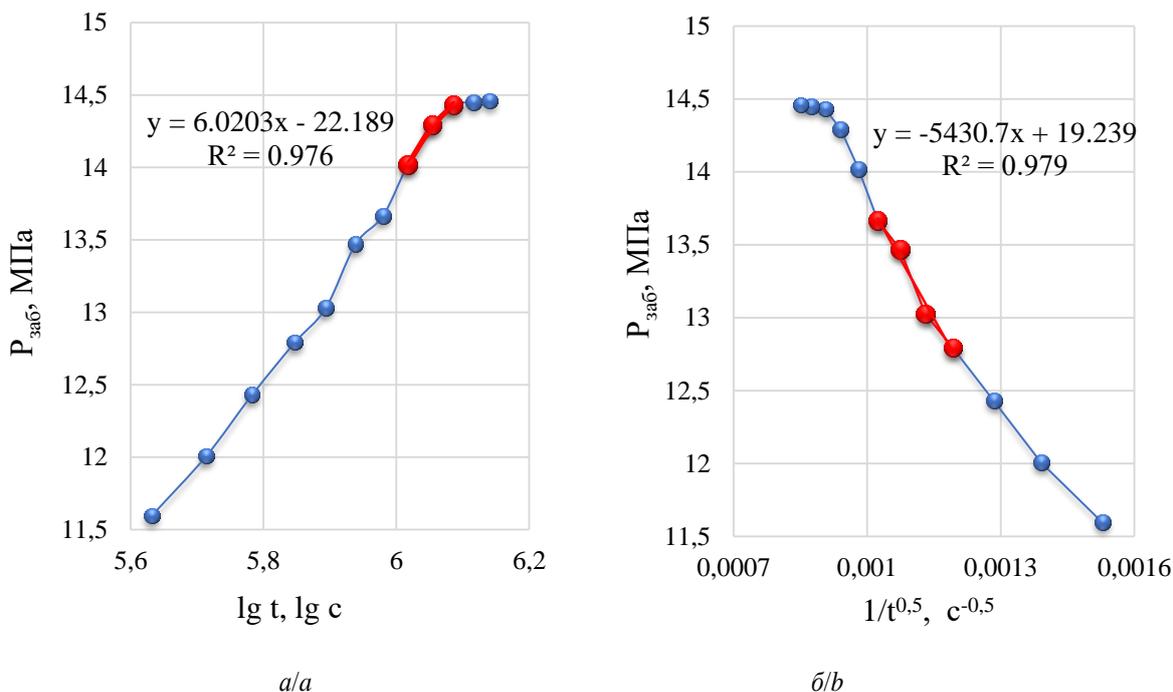


Рис. 1. Кривая восстановления давления, перестроенная в координатах: а) « $P_{заб}(t) - \lg(t)$ »; б) « $P_{заб}(t) - 1/t^{0,5}$ »  
 Fig. 1. Pressure recovery curve rebuilt in coordinates: а) « $P_{заб}(t) - \lg(t)$ »; б) « $P_{заб}(t) - 1/t^{0,5}$ »

**Таблица.** Методы определения параметра анизотропии (вертикальной проницаемости)

**Table.** Methods for determining the anisotropy parameter (vertical permeability)

Метод Method	Способ определения Method of determination	Преимущества Advantages	Недостатки Disadvantages
Промышленно-геофизические исследования Geophysical surveys	Боковой каротаж сканирующий Side logging scan	Позволяет судить о наличии в разрезе вертикальных и субвертикальных трещин при значении показателя анизотропии пород более 1,3 Allows you to judge the presence in the section of vertical and sub-vertical fractures with a value of anisotropy of rocks more than 1,3	Определяется не сам показатель анизотропии проницаемости, а лишь анизотропия электропроводности пластов, однако такая оценка возможна при относительно низкоомном разрезе (водонасыщенные коллекторы 11–100 Ом*м, нефтенасыщенные – 20–500 Ом*м) It is not the permeability anisotropy index itself that is determined, but only the anisotropy of the electrical conductivity of the layers, but such an assessment is possible with a relatively low-ohm section (water-saturated collectors 11–100 Ohm*m, oil-saturated – 20–500 Ohm*m)
	Волновые методы (волновой акустический каротаж и др.) Wave methods (wave acoustic logging, etc.)	Определение физико-механических свойств пород (ФМС), позволяющих судить о наличии трещиноватости. В обсаженных скважинах путем сравнительных измерений параметров ФМС, волны Стоунли, коэффициента анизотропии до и после гидроразрыва пласта (ГРП) определяются интервалы ГРП. Determination of physico-mechanical properties of rocks, which allow judging the presence of fracture. In cased wells, comparative measurements of parameters of physico-mechanical properties, Stoneley waves, anisotropy coefficients before and after hydraulic fracturing, determine fracturing intervals.	Определяется не сам показатель анизотропии проницаемости, а лишь акустическая анизотропия пород по интервальному времени быстрой и медленной поперечных волн. It is not the permeability anisotropy index itself that is determined, but only the acoustic anisotropy of rocks by the interval time of fast and slow transverse waves.
<b>Вывод:</b> определение целого ряда различных параметров, характерных для ГИС, но оценка на качественном уровне. Привязка к скважине – локальность определения. <b>Conclusion:</b> definition of a number of different parameters characteristic of well logging, but the assessment at a qualitative level. Binding to the well – locality of determination.			
Исследования ядра Core studies	Изучение ориентированного ядра Oriented core study	Изучение проницаемости вдоль направлений X, Y, Z. Возможность создания различных термобарических условий и характера насыщения. Численное определение значения искомого параметра. Study of permeability along the X, Y, Z directions. The possibility of creating different temperature and pressure conditions and the nature of saturation. Numerical determination of the value of the desired parameter.	Дороговизна и редкость отбора ориентированного ядра, соответственно, невозможность исследования для скважины, в которой в период бурения не отобран ядро. Привязка к скважине – локальность определения. Иногда невозможность воссоздать пластовые условия. High cost and rarity of the selection of oriented core, respectively, the impossibility of research for the well, in which the core was not selected during the drilling period. Binding to the well – locality of determination. Sometimes the inability to recreate reservoir conditions.
Гидродинамические исследования скважин Well test	Интерпретация кривой восстановления давления (уровня) Interpretation of the pressure recovery curve (level)	Снятие КВД (КВУ) входит в стандартный комплекс исследований по контролю за разработкой месторождений. Отсутствие необходимости в специальных дорогих приборах. Численное определение значения искомого параметра. Охват по площади зоны дренирования. Сравнительно высокая скорость обработки. Removal of the pressure recovery curve (level recovery curve) is a part of the standard research complex for field development control. No need for special expensive devices. Numerical determination of the value of the desired parameter. Coverage area of the drainage zone. Relatively high processing speed.	Желательно наличие ТМС и отсутствие возмущений от соседних скважин. It is desirable to have a telemetry system and the absence of disturbances from neighboring wells.
Специальные методы ГДИ Special methods of well testing	Гидропрослушивание пластов и трассирование меченых веществ Hydraulic interception of layers and tracing of labeled substances	Наиболее полно разработанные способы, большой охват исследованиями. Численное определение значения искомого параметра. The most fully developed methods, large research coverage. Numerical determination of the value of the desired parameter.	Дороговизна. Длительность исследований. Для трассирования необходима большая обводненность продукции. High cost. Duration of research. Tracing requires a high water cut.

На КВД, построенной в координатах « $P_{заб}(t)-1/t^{0,5}$ », выделяется прямолинейный участок так, чтобы время, соответствующее его окончанию, было меньше, чем время, соответствующее началу прямолинейного участка в координатах « $P_{заб}(t)-lg(t)$ », и определяется уклон участка  $\sigma$ . В данном примере обозначен участок с параметрами:  $t = 954540$  с,  $\sigma = 5430,7$  МПа  $\cdot$  с $^{-0,5}$ .

1. Зная вскрытую (работающую) толщину  $h_{вс}$ , величины  $\sigma$  и  $\beta$  и координаты последней точки прямой, построенной в координатах « $P_{заб}(t)-1/t^{0,5}$ », определяют общую толщину пласта:

$$h = \frac{h_{вс}}{\left(1 - \frac{\beta \cdot \sqrt{1,5 \cdot t}}{2,09 \cdot \sigma}\right)} = \frac{18,3}{\left(1 - \frac{6,0203 \cdot \sqrt{1,5 \cdot 954540}}{2,09 \cdot 5430,7}\right)} = 50,09 \text{ м.}$$

2. Вычисляется вертикальная проницаемость ( $K_v$ ):

$$K_v = \frac{0,229 \cdot m \cdot \mu \cdot h \cdot \beta}{P_{пл} \cdot \sigma} = \frac{0,229 \cdot 0,11 \cdot 3,4 \cdot 10^{-3} \cdot 50,09 \cdot 6,0203}{14,52 \cdot 10^6 \cdot 5430,7} = 327,56 \text{ мД.}$$

где  $m$  – пористость, д. ед.;  $P_{пл}$  – текущее пластовое давление, МПа;  $\mu$  – вязкость флюида в условиях пласта, мПа  $\cdot$  с.

3. Вычислив вертикальную проницаемость, рассчитывают вертикальную пьезопроводность:

$$\alpha_v = \frac{P_{пл} \cdot K_v}{\mu \cdot m} = \frac{14,52 \cdot 10^6 \cdot 327,56 \cdot 10^{-15}}{3,4 \cdot 10^{-3} \cdot 0,11} = 0,01272 \text{ М}^2/\text{с}$$

4. Зная значение вертикальной пьезопроводности, вычисляют горизонтальную проницаемость ( $K_r$ ):

$$K_r = \frac{Q \cdot T_{пл} \cdot \mu}{\pi \cdot \sigma \cdot \sqrt{3,3 \alpha_v}} = \frac{45,95 \cdot 10^{-5} \cdot 306 \cdot 3,4 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 5430,7 \cdot 10^6 \cdot \sqrt{3,3 \cdot 0,01272}} = 136,78 \text{ мД,}$$

где  $Q$  – дебит скважины перед исследованием, м $^3$ /с;  $T_{пл}$  – пластовая температура, К.

5. Находится параметр анизотропии:

$$v = \frac{K_v}{K_r} = \frac{327,56 \cdot 10^{-15}}{136,78 \cdot 10^{-15}} = 2,39 \text{ д. ед.}$$

По данной методике обработаны 252 исследования, проведенные на добывающих и нагнетательных скважинах фаменской залежи Гагаринского месторождения. Стоит отметить, что карбонатная залежь нефти в фаменских отложениях Гагаринского месторождения характеризуется двойной пустотностью и имеет следующую геологическую особенность: по площади распространения залежи установлено чередование коллекторов разной емкости для одних и тех же стратиграфических горизонтов, обусловленное условиями седиментации [20–23]. Лучшими фильтрационно-емкостными свойствами (ФЕС) обладает часть залежи в виде рифового гребня, в более низкорельефные участки в процессе седиментации сносил-

ся микритовый материал, который заполнял естественные трещины, ухудшая фильтрационно-емкостные свойства горных пород (рис. 2). Для каждой литолого-фациальной зоны построена зависимость показателя анизотропии проницаемости от забойного давления (рис. 3). Полученные зависимости, представленные на рис. 3, могут быть использованы для прогнозирования параметра анизотропии проницаемости в каждой литолого-фациальной зоне, что повлияет на подбор оптимального технологического режима работы скважин и на выбор геолого-технических мероприятий [24–27].

Для прогнозирования и оценки эффективности применяемых геолого-технических мероприятий и технологических показателей разработки авторами статьи модифицирована ГГДМ с учетом полученных зависимостей об изменении параметра анизотропии проницаемости. Модифицированная ГГДМ по сравнению с базовой моделью, которая не учитывает показатель анизотропии (вертикальную проницаемость), поможет достовернее и качественнее оценить технологические показатели разработки и режимы работы скважин после проведения ГТМ.

#### Совершенствование геолого-гидродинамической модели с учетом изменения показателя анизотропии

Существует множество способов учета трещиноватости в гидродинамических моделях. Первый, который является наиболее трудоемким, но при этом физичным, – это создание модели двойной среды [28]. Очевидным преимуществом использования такой ГГДМ является учет сложного строения пустотного пространства при многофазной фильтрации пластовых флюидов. Однако процесс построения модели и ее использования связан со значительными трудностями, такими как неоднозначность определения параметров трещинной среды и утяжеление модели с замедлением скорости расчетов, т. к. будет распределение фильтрационно-емкостных свойств между двумя пустотностями, а также перетоки между ними. Поэтому на практике встретить такие модели можно довольно редко. Другой способ основан на использовании в ГГДМ слоев с низкой пористостью и высокой проницаемостью, например, в районе скважин [29]. Применяют также не соседние соединения, при которых флюид практически мгновенно может перенестись от одной точки пласта до другой. Косвенно смоделировать фильтрацию в трещинно-поровом коллекторе можно с помощью кривых ОФП [30, 31]. Встречаются на практике методы учета изменения проницаемости коллектора в зависимости от динамики пластового давления [32]. Один из подобных методов, который дает удовлетворительные показатели при рациональных временных затратах на модификации, выбран для учета трещинной составляющей пустотного пространства фаменской залежи Гагаринского месторождения. Моделирование производилось в гидродинамическом симуляторе Tempest версии 8.3.1 компании Roxar.

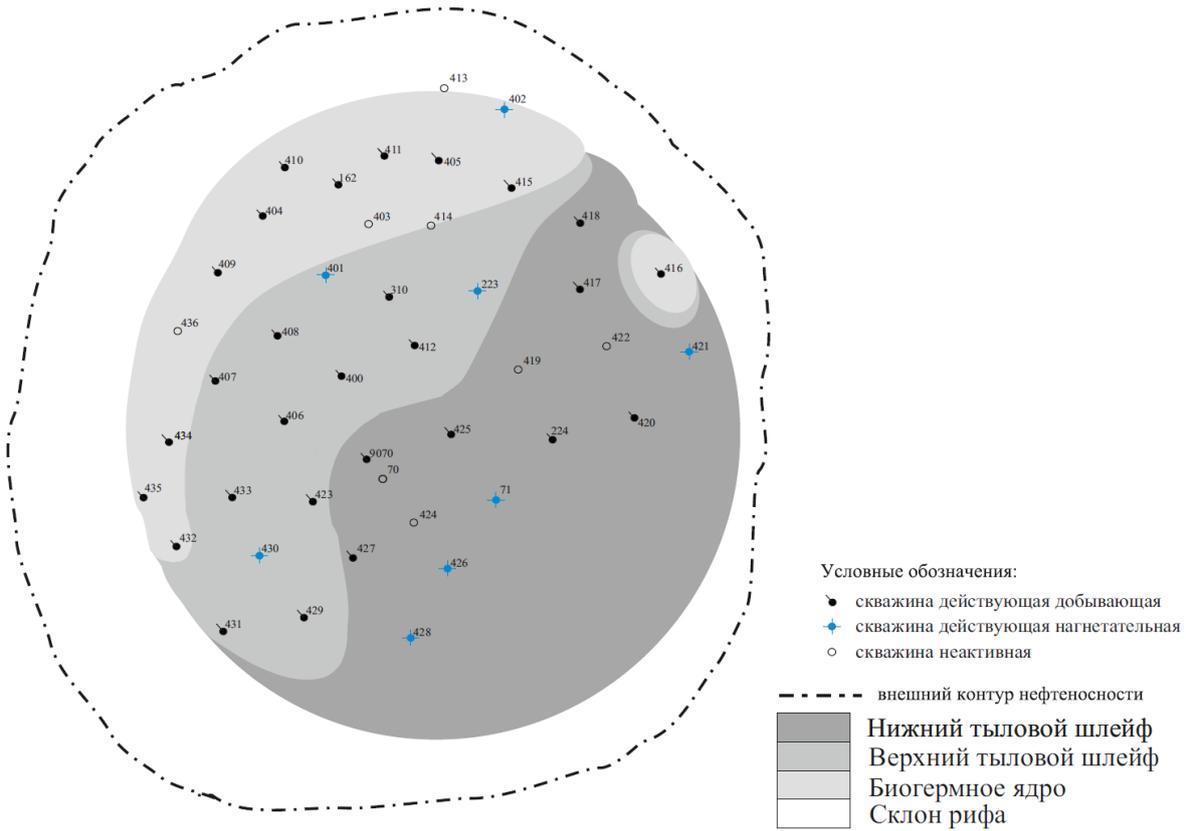


Рис. 2 Литолого-фациальная карта фаменских отложений Гагаринского месторождения

Fig. 2. Lithofacies map of the Famennian deposits of the Gagarinsky field

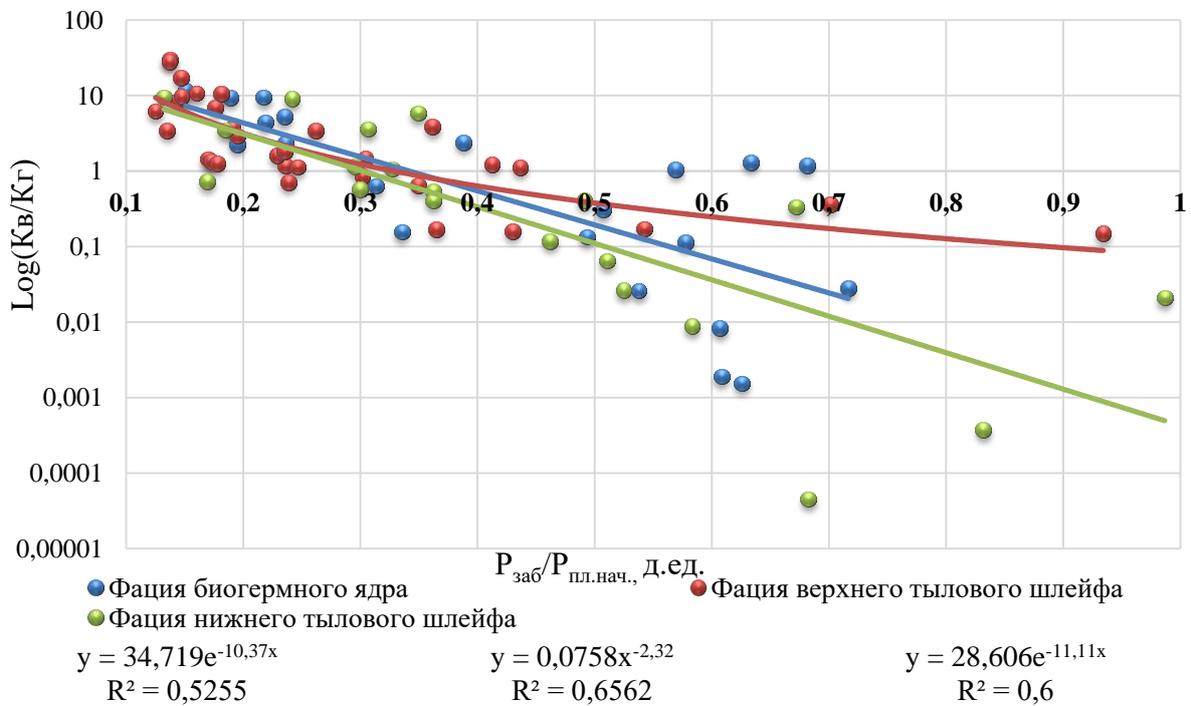


Рис. 3. Зависимость показателя анизотропии от забойного давления для каждой литолого-фациальной зоны фаменской залежи Гагаринского месторождения

Fig. 3. Dependence of the anisotropy index on the bottomhole pressure for each lithofacial zone of the Famennian deposit of the Gagarinsky field

Предварительно вертикальная проницаемость численно настраивалась по результатам интерпретации ГДИ. Далее происходил процесс модификации гидродинамической модели путем поиска множителей проницаемости в несколько этапов:

1. Преобразование полученной зависимости показателя анизотропии от отношения текущего забойного к начальному пластовому давлению в зависимость показателя анизотропии от текущего пластового давления. Зависимость будет иметь примерно такой же вид.
2. Построение зависимость проницаемости от пластового давления при анализе проведенных гидродинамических исследований на неустановившихся режимах. Проницаемость, получаемая при исследованиях, будет равна проницаемости по латерали  $K_x=K_y$ .

3. При достаточно маленьком шаге, например, 5 бар, от атмосферного до пластового давления (выше можно уменьшать дискретность) получаются значения проницаемости по латерали.
4. Горизонтальная проницаемость подставляется в зависимость пункта 1. Получается распределение вертикальной проницаемости от пластового давления.

Принимается, что при начальном пластовом давлении проницаемости не изменены, а при изменении давления в ту или иную сторону увеличиваются либо уменьшаются. Так как распределение проницаемости в зоне каждой скважины может значительно различаться, то для использования необходимо не сами значения проницаемостей, а их множители (при  $P_{пл}=P_{пл-нач}$  множитель равен единице). Прделанные операции представлены на рис. 4.

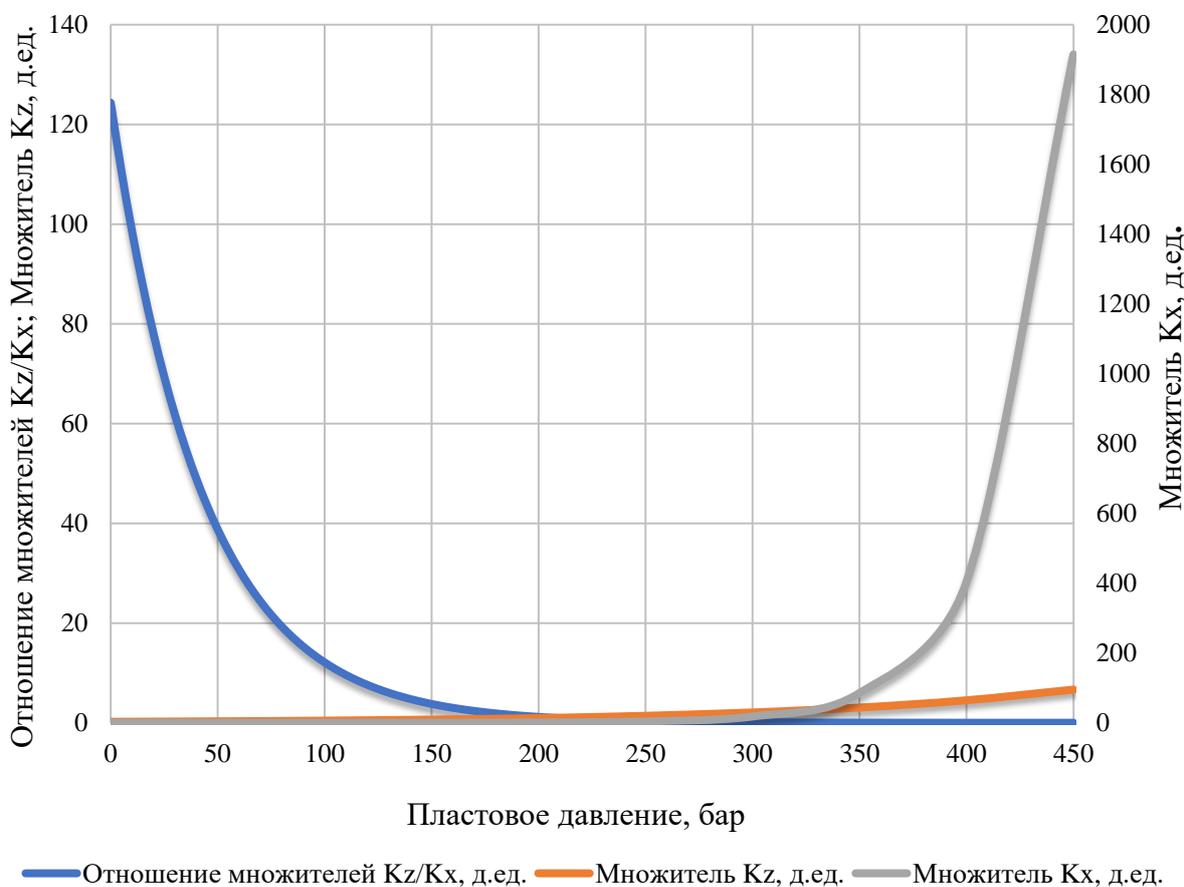


Рис. 4. Зависимость множителей проницаемости от пластового давления для фации верхнего тылового шлейфа  
 Fig. 4. Dependence of permeability multipliers on reservoir pressure for the facies of the upper rear plume

Анализируя полученные графики, можно прийти к выводу, что при значительном снижении пластового давления роль вертикальной фильтрации выходит на первый план. Данная процедура была выполнена для каждой литолого-фациальной зоны рассматриваемого объекта разработки. Таким образом, имеются зависимости изменения проницаемостей по латерали и вертикали для каждой зоны. В отличие от распространенного способа при помощи ключевого слова KVSP

применение ключевых слов KVPX, KVPY и KVPZ дает возможность разнонаправленного распределения изменения проницаемости от давления, что и было сделано. Внешний вид модифицированной геолого-гидродинамической модели представлен на рис. 5 на примере куба измененных регионов.

При работе с модифицированной моделью получилось улучшить адаптацию как по добывающим, так и по нагнетательным скважинам (рис. 5, 6).

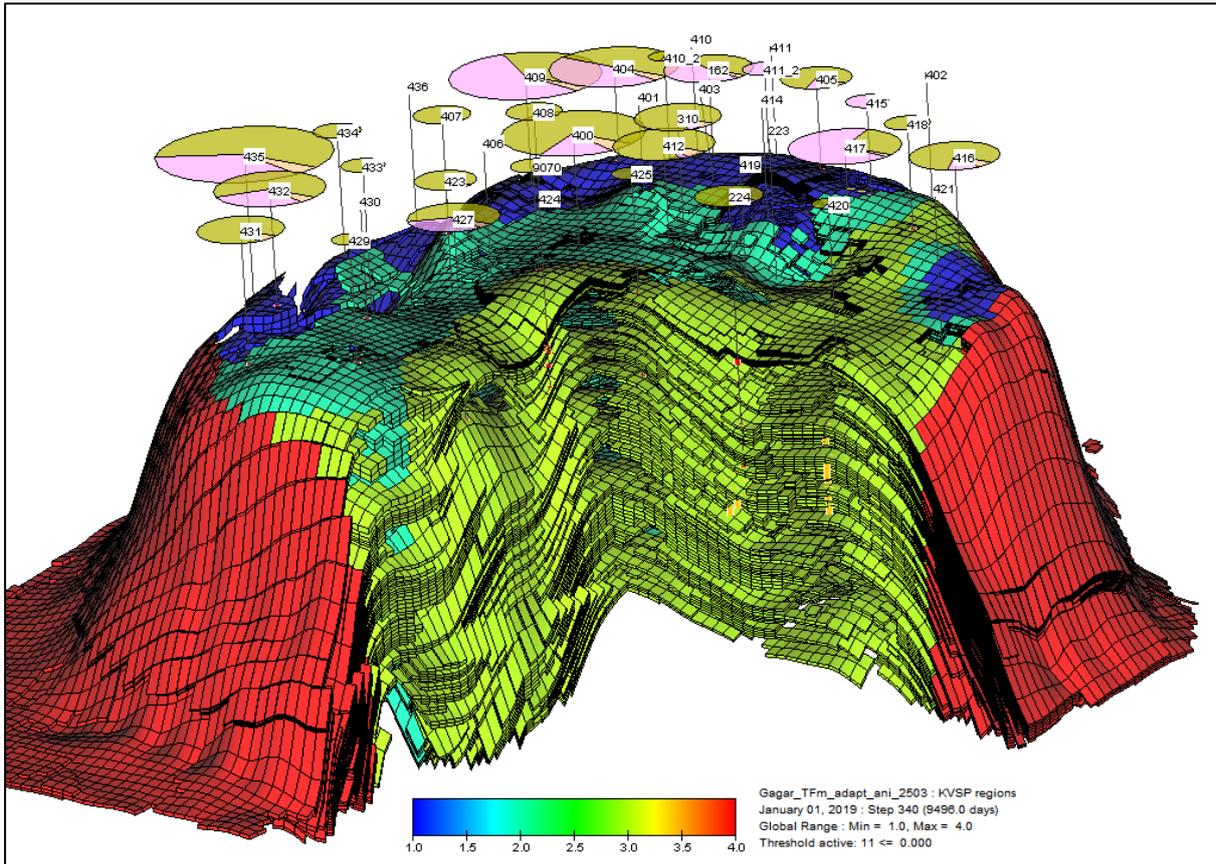


Рис. 4. Внешний вид модифицированной геолого-гидродинамической модели фаменской залежи Гагаринского месторождения

Fig. 4. Appearance of the modified geological and hydrodynamic model of the Famennian deposit of the Gagarinsky field

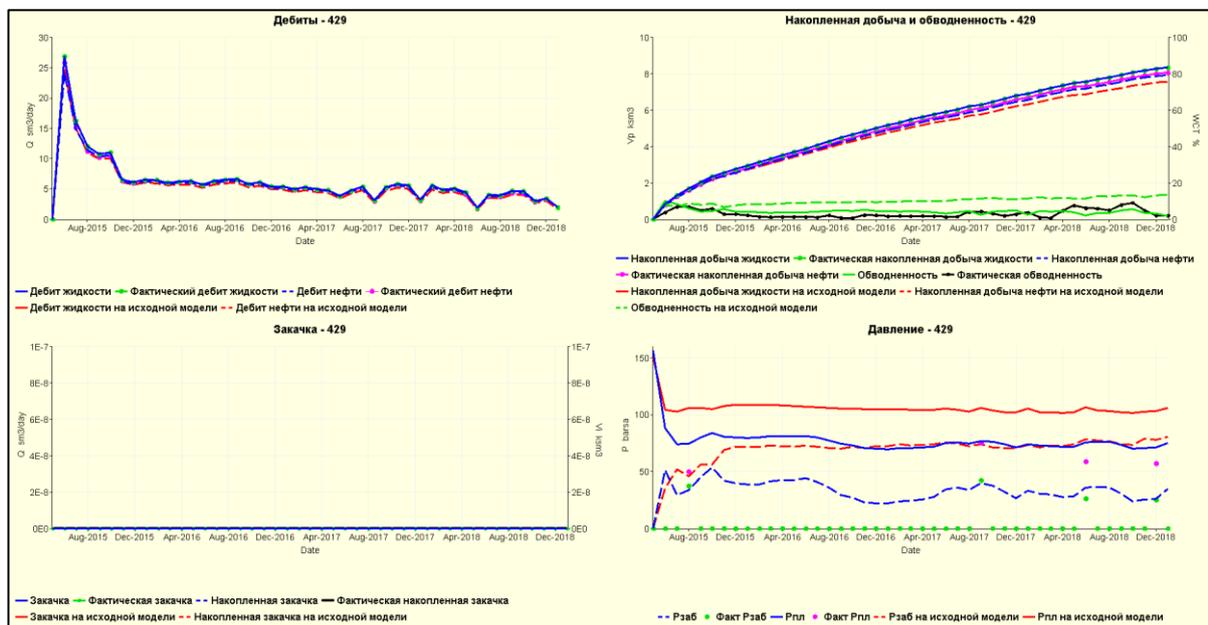


Рис. 5. Сравнение результатов адаптации по добывающей скв. 429 на модифицированной и исходной модели

Fig. 5. Comparison of the results of adaptation for mining well 429 on the modified and the original model

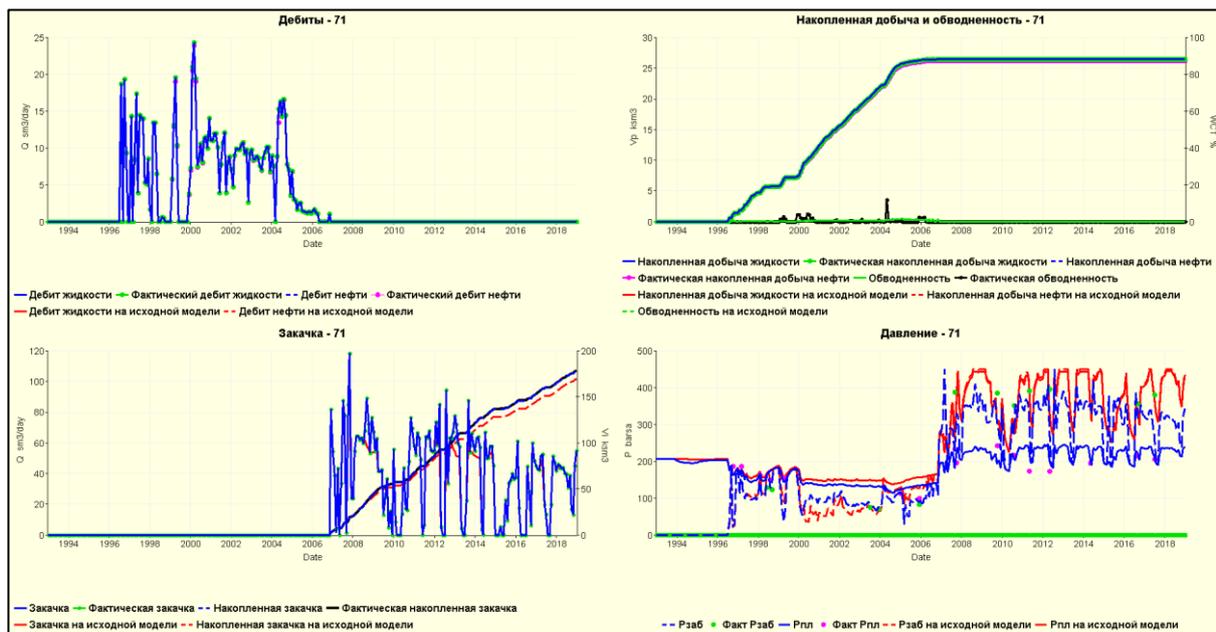


Рис. 6. Сравнение результатов адаптации по нагнетательной скв. 71 на модифицированной и исходной модели  
 Fig. 6. Comparison of the results of adaptation for injection well 71 on the modified and the original model

Таким образом, проведенные расчеты в модифицированной гидродинамической модели по скв. 429 позволили воссоздать динамику забойного давления, настроить тренд пластового давления и значительно улучшить сходимость параметра обводненности. По скв. 71 удалось добиться необходимой исторической репрессии, а также весь объем закачиваемой жидкости ушел в пласт. На исходной модели этого не получилось и забойное давление находилось на полке в некоторые периоды времени. Моделировался эффект авто-ГРП.

#### Заключение

В данной статье рассмотрена актуальная проблема, направленная на определение параметра анизотропии проницаемости (вертикальной проницаемости) и его учет в действующих геолого-гидродинамических моделях (на примере фаменской залежи Гагаринского месторождения). Описан подход, который позволяет оперативно оценить вертикальную и горизонтальную проницаемость, а также параметр анизотропии без проведения специальных дорогостоящих и долговременных исследований, а в рамках регулярных гидродинамических исследований (КВД или КВУ). Для

каждой литолого-фациальной зоны фаменской залежи Гагаринского месторождения получена зависимость изменения параметра анизотропии проницаемости от забойного давления. Установлено, что значения показателя анизотропии в различных литолого-фациальных зонах изменяются в широком диапазоне. С помощью полученных зависимостей оценки параметра анизотропии проницаемости была модифицирована действующая геолого-гидродинамическая модель фаменской залежи Гагаринского месторождения. С помощью модифицированной гидродинамической модели удалось значительно улучшить адаптацию как по добывающим, так и по нагнетательным скважинам. Таким образом, удалось повысить качество и достоверность цифровой модели фаменской залежи Гагаринского месторождения для расчетов и прогнозирования процесса добычи нефти. С помощью описанной в статье методики можно оценить изменение параметра анизотропии проницаемости и на других карбонатных объектах месторождений Пермского края и России и в дальнейшем модифицировать существующие геолого-гидродинамические модели.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вахитова Г.Р., Галин Н.Н., Гумерова А.С. Анализ заводнения продуктивных пластов при наличии пространственной неоднородности // Сборник научных трудов SWORLD по материалам международной научно-практической конференции. – 2011. – Т. 13. – Вып. № 2. – С. 80–90.
2. Huaifeng Sun, Sandra Vega, Guo Tao. Analysis of heterogeneity and permeability anisotropy in carbonate rock samples using digital rock physics // Journal of petroleum science and engineering. – 2017. – V. 156. – P. 419–429.
3. Байков В.А., Аксаков А.В., Борщук О.С. Математическое моделирование миграции жидкости через флюидоупор по трещинам // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 5. – С. 48–51.
4. Кадыров Р.И., Закиров Т.Р. 2D фрактальный и мультифрактальный анализ пустотно-пористого пространства карбонатных коллекторов нефти // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 11. – С. 72–74.
5. Мартюшев Д.А. Оценка трещиноватости карбонатных коллекторов вероятностно-статистическими методами // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 4. – С. 51–53.
6. Абдуллин Р.Н., Рахматуллин А.Р. Пример практического применения информации о трещиноватости по данным комплекса ГИС и высокотехнологических методов // Георесурсы. – 2017. – Т. 20. – № 3. – С. 261–266.
7. A permeability model for naturally fractured carbonate reservoir // V. Guerriero, S. Mazzoli, A. Iannace, S. Vitale, Ch. Strauss // Marine and petroleum geology. – 2013. – V. 40. – P. 115–134.

8. Иктисанов В.А., Бобб И.Ф., Ганиев Б.Г. Изучение закономерностей оптимизации забойных давлений для трещинно-поровых коллекторов // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 10. – С. 94–97.
9. Henderson N., Pena L. Simulating effects of the permeability anisotropy on formation of viscous fingers during waterflood operations // Journal of petroleum science and engineering. – 2017. – V. 153. – P. 178–186.
10. Jackson R.R., Banerjee R. Application of reservoir simulation and history matching methods to MDT vertical interference testing and determination of permeability anisotropy // 8<sup>th</sup> European Conference on the mathematics of oil recovery. – Freiberg, Germany, 3–6 September 2002. – P. 775–794.
11. Ханипов М.Н., Насыбуллин А.В., Саттаров Р.З. Оценка влияния неоднородности коллектора на эффективность нестационарного заводнения с применением геолого-гидродинамического моделирования // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 7. – С. 30–32.
12. Кудряшова Д.А. Использование вероятно-статистических методов для определения источников обводнения скважин-кандидатов для водоизоляционных работ (на примере визейского объекта месторождения пермского края) // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2018. – Т. 17. – № 1. – С. 26–36.
13. Biao Li, Ron C.K. Wong, Sina Heidari. A modified Kozeny–Carman model for estimating anisotropic permeability of soft mudrocks // Marine and petroleum geology. – 2018. – V. 98. – P. 356–368.
14. Experimental study of impact of anisotropy and heterogeneity on gas flow in coal. P. II: Permeability / Yuling Tan, Zhejun Pan, Jishan Liu, Fubao Zhou, Asadul Haque // Fuel. – 2018. – V. 230. – P. 397–409.
15. Minory Sato, Takato Takemura, Manabu Takahashi. Development of the permeability anisotropy of submarine sedimentary rocks under true triaxial stresses // International journal of rock mechanics and mining sciences. – 2018. – V. 108. – P. 118–127.
16. Noirot M., Massonnat G., Jourde H. On the use of Wireline Formation testing (WFT) data: 2. Consequences of permeability anisotropy and heterogeneity on the WFT responses inferred flow modeling // Journal of petroleum science and engineering. – 2015. – V. 133. – P. 776–784.
17. Цаган-Маджиев Т.Н. Повышение достоверности определения вертикальной проницаемости пласта по данным гидродинамических исследований // Газовая промышленность. – 2012. – № 5. – С. 19–23.
18. Wen Zhang, Qin Wang. Permeability anisotropy and gas slippage of shales from the Sichuan Basin in South China // International journal of coal geology. – 2018. – V. 194. – P. 22–32.
19. Оценка анизотропии проницаемости карбонатных коллекторов по кривым восстановления давления / С.С. Черепанов, Д.А. Мартюшев, И.Н. Пономарева, Г.П. Хижняк // Нефтяное хозяйство. – 2013. – № 4. – С. 60–61.
20. Галкин В.И., Пономарева И.Н., Репина В.А. Исследование процесса нефтеизвлечения в коллекторах различного типа пустотности с использованием многомерного статистического анализа // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2016. – Т. 15. – № 19. – С. 145–154.
21. Щербенев А.В. Использование вероятно-статистических методов для деления пород на проницаемую и непроницаемую части (на примере терригенных отложений визейского яруса Софьинского месторождения) // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2017. – Т. 16. – № 1. – С. 14–22.
22. Бегма Д.С., Белкина В.А. Литолого-фациальные особенности строения верхнеюрских отложений месторождения Т // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 1. – С. 109–122.
23. Особенности геологического строения и перспективы разработки низкопроницаемых карбонатных коллекторов Подвесьюского нефтяного месторождения / Р.С. Хисамов, А.Г. Хабибрахманов, В.Б. Подалов, Ю.П. Кемаева, Л.М. Миронова // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 11. – С. 84–87.
24. Investigation of the permeability anisotropy of 2D fractured rock masses / Feng Ren, Guowei Ma, Guoyang Fu, Ke Zhang // Engineering geology. – 2015. – V. 196. – P. 171–182.
25. Farrell N.J.C., Healy D., Taylor C.W. Anisotropy of permeability in faulted porous sandstones // Journal of structural geology. – 2014. – V. 63. – P. 50–67.
26. Menezes F.F. Anisotropy of volume change and permeability evolution of hard sandstones under triaxial stress conditions // Journal of petroleum science and engineering. – 2019. – V. 174. – P. 921–939.
27. The permeability of stylolite-bearing limestone / M. Heap, T. Reuschle, P. Baud, F. Renard, G. Lezzi // Journal of structural geology. – 2018. – V. 116. – P. 81–93.
28. Методика гидродинамического моделирования сложнопостроенных карбонатных трещиноватых коллекторов на примере Манчаровского месторождения / А.И. Саяхутдинов, Н.Р. Кондратьева, Д.Ч. Галлямова, Э.В. Карачурина, Е.С. Булатова // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 2. – С. 114–115.
29. Черепанов С.С., Чумаков Г.Н., Галкин С.В. Возможности учета трещиноватости коллекторов при геолого-гидродинамическом моделировании разработки залежей с заводнением пластов // Нефтепромысловое дело. – 2016. – № 8. – С. 5–8.
30. Щипанов А.А. Модификация относительных фазовых проницаемостей как один из подходов к учёту трещиноватости коллекторов при гидродинамическом моделировании // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2002. – № 8. – С. 60–66.
31. О связи коэффициентов трещиностойкости и геофизических характеристик горных пород месторождений углеводородов / Ю.А. Кашников, С.Г. Ашихмин, А.Э. Кухтинский, Д.В. Шустов // Записки горного института. – 2020. – Т. 241. – С. 83–90.
32. Аббасов Е.М., Агаева Н.А., Керимова Ш.А. Интегральное моделирование работы газовых скважин с учетом деформируемости коллектора пласта // SOCAR Proceedings. – 2019. – № 2. – С. 45–52.

Поступила 28.08.2019 г.

#### Информация об авторах

**Менгалиев А.Г.**, инженер 2-й категории отдела создания и мониторинга гидродинамических моделей приоритетных месторождений филиала ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми.

**Мартюшев Д.А.**, кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

UDC 622.276

## ACCOUNTING THE PARAMETER OF ANISOTROPY OF PERMEABILITY IN GEOLOGICAL AND HYDRODYNAMIC MODELS OF CARBONATE OBJECTS (ON THE EXAMPLE OF THE GAGARIN DEPOSIT)

**Alexander G. Mengaliev**<sup>1</sup>,  
mengaliev.alexandr@gmail.com

**Dmitriy A. Martyushev**<sup>2</sup>,  
martyushevd@inbox.ru

<sup>1</sup> LLC «LUKOIL-Engineering» «PermNIPIneft» in Perm,  
29, Sovetskoy Armii street, Perm, 614000, Russia.

<sup>2</sup> Perm National Research Polytechnic University,  
29, Komsomolskiy avenue, Perm, 614990, Russia.

**The relevance of the research.** A significant share of the developed oil assets, confined to carbonate complex objects, has increased markedly both in Russia and in the Perm Krai. Reliable knowledge of the parameters of a fracture-porous reservoir type allows selecting a rational development system, controlling development, ensuring optimal geological and technical measures for a given reservoir, clarifies the existing geological and hydrodynamic models. When building and adapting geological and hydrodynamic models of oil fields, especially those related to complex carbonate reservoirs, knowledge of both horizontal and vertical permeability (anisotropy parameter) is important. In practice, the vertical permeability in geological and hydrodynamic models is often assumed to be zero, although this is far from the case. Determining the vertical permeability (anisotropy parameter), its dynamics when changing reservoir and bottomhole pressures, and use in geological and hydrodynamic models is an important task that will improve the quality and accuracy of using digital models for calculating and predicting oil production.

**The main aim** of the study is to improve the geological and hydrodynamic model, taking into account the use of permeability anisotropy index.

**Object:** carbonate Famennian deposit of the Gagarinsky field.

**Methods:** processing of geological research data; use of the Tempest hydrodynamic simulator version 8.3.1 from Roxar.

**The results.** According to the method for determining the anisotropy parameter proposed in the article, 252 studies at production and injection wells in the Famennian deposit of the Gagarinsky field were carried out. For each lithofacial zone, the dependence of the permeability anisotropy index on the bottomhole pressure was constructed. For forecasting and evaluating the effectiveness of the applied geological and technical measures and technological indicators of development, the authors modified the geological and hydrodynamic model taking into account the dependencies obtained on the change in the anisotropy parameter. With the help of a modified hydrodynamic model, we managed to significantly improve the adaptation of both production and injection wells. Thus, it was possible to improve the quality and reliability of the digital model of the Famennian reservoir of the Gagarinsky field for calculating and forecasting oil production.

### Key words:

Well testing, vertical permeability, horizontal permeability, lithologic-facies zones, modified hydrodynamic model.

### REFERENCES

- Vakhitova G.R., Galin N.N., Gumerova A.S. Analysis of the flooding of productive layers in the presence of spatial heterogeneity. *Collection of scientific papers by SWORLD on the materials of the international scientific-practical conference*, 2011, vol. 13, no. 2, pp. 80–90. In Rus.
- Huafeng Sun, Sandra Vega, Guo Tao. Analysis of heterogeneity and permeability anisotropy in carbonate rock samples using digital rock physics. *Journal of petroleum science and engineering*, 2017, vol. 156, pp. 419–429.
- Baikov V.A., Aksakov A.V., Borshchuk O.S. Mathematical modeling of fluid migration through a fluid seal along fractures. *Oil industry*, 2018, no. 5, pp. 48–51. In Rus.
- Kadyrov R.I., Zakirov T.R. 2D fractal and multifractal analysis of voidness-pore space of carbonate reservoirs of oil. *Oil Industry*, 2016, no. 11, pp. 72–74. In Rus.
- Martyushev D.A. Assessment of fracturing of carbonate reservoirs by probabilistic-statistical methods. *Oil industry*, 2014, no. 4, pp. 51–53. In Rus.
- Abdullin R.N., Rakhmatullin A.R. An example of the practical application of information on fracturing according to the GIS complex and high-tech methods. *Georesources*, 2017, vol. 20, no. 3, pp. 261–266. In Rus.
- Guerriero V., Mazzoli S., Iannace A., Vitale S., Strauss Ch. A permeability model for naturally fractured carbonate reservoir. *Marine and petroleum geology*, 2013, vol. 40, pp. 115–134.
- Iktisanov V.A., Bobb I.F., Ganiev B.G. The study of the optimization of downhole pressure for fractured-porous reservoirs. *Oil industry*, 2017, no. 10, pp. 94–97. In Rus.
- Henderson N., Pena L. Simulating effects of the permeability anisotropy on formation of viscous fingers during waterflood operations. *Journal of petroleum science and engineering*, 2017, vol. 153, pp. 178–186.
- Jackson R.R., Banerjee R. Application of reservoir simulation and history matching methods to MDT vertical interference testing and determination of permeability anisotropy. *8<sup>th</sup> European Conference on the mathematics of oil recovery*. Freiberg, Germany, 3–6 September 2002. pp. 775–794.
- Khanipov M.N., Nasybullin A.V., Sattarov R.Z. Estimation of influence of heterogeneity of the reservoir on the efficiency of unsteady water flooding using geological and hydrodynamic modeling. *Oil Industry*, 2016, no. 7, pp. 30–32. In Rus.
- Kudryashova D.A. Using probabilistic-statistical methods for determining the sources of irrigation of candidate wells for water-proofing works (using the example of a Visean facility in a field in the Perm Territory). *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil and gas and mining*, 2018, vol. 17, no. 1, pp. 26–36. In Rus.
- Biao Li, Ron C.K. Wong, Sina Heidari. A modified Kozeny-Carman model for estimating anisotropic permeability of soft mudrocks. *Marine and petroleum geology*, 2018, vol. 98, pp. 356–368.
- Yuling Tan, Zhejun Pan, Jishan Liu, Fubao Zhou, Asadul Haque. Experimental study of impact of anisotropy and heterogeneity on

- gas flow in coal. P. II: Permeability. *Fuel*, 2018, vol. 230, pp. 397–409.
15. Minory Sato, Takato Takemura, Manabu Takahashi. Development of the permeability anisotropy of submarine sedimentary rocks under true triaxial stresses. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 2018, vol. 108, pp. 118–127.
  16. Noirot M., Massonnat G., Jourde H. On the use of Wireline Formation testing (WFT) data: 2. Consequences of permeability anisotropy and heterogeneity on the WFT responses inferred flow modeling. *Journal of petroleum science and engineering*, 2015, vol. 133, pp. 776–784.
  17. Tsagan-Madzhiev T.N. Improving the reliability of determining the vertical permeability of the reservoir according to hydrodynamic studies. *Gas industry*, 2012, no. 5, pp. 19–23. In Rus.
  18. Wen Zhang, Qin Wang. Permeability anisotropy and gas slippage of shales from the Sichuan Basin in South China. *International journal of coal geology*, 2018, vol. 194, pp. 22–32.
  19. Cherepanov S.S., Martyshev D.A., Ponomareva I.N., Khizhnyak G.P. Evaluation of permeability anisotropy of carbonate reservoirs by pressure recovery curves. *Oil industry*, 2013, no. 4, pp. 60–61. In Rus.
  20. Galkin V.I., Ponomareva I.N., Repina V.A. Investigation of the process of oil recovery in reservoirs of various types of emptiness using multidimensional statistical analysis. *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Geology. Oil and gas and mining*, 2016, vol. 15, no. 19, pp. 145–154. In Rus.
  21. Shcherbenev A.V. Using probabilistic-statistical methods for dividing rocks into permeable and impermeable parts (using as an example terrigenous deposits of the Visean layer of the Sofinskoye deposit). *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Geology. Oil and gas and mining*, 2017, vol. 16, no. 1, pp. 14–22. In Rus.
  22. Begma D.S., Belkina V.A. Lithologic-facial features of the structure of Upper Jurassic deposits of the T deposit. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets engineering*, 2017, vol. 328, no. 1, pp. 109–122. In Rus.
  23. Khisamov R.S., Khabibrakhmanov A.G., Podavalov V.B., Ke-maeva Yu.P., Mironova L.M. Features of the geological structure and prospects for the development of low-permeable carbonate reservoirs of the Podveryuskoe oil field. *Oil industry*, 2016, no. 11, pp. 84–87. In Rus.
  24. Feng Ren, Guowei Ma, Guoyang Fu, Ke Zhang. Investigation of the permeability anisotropy of 2D fractured rock masses. *Engineering geology*, 2015, vol. 196, pp. 171–182.
  25. Farrell N.J.C., Healy D., Taylor C.W. Anisotropy of permeability in faulted porous sandstones. *Journal of structural geology*, 2014, vol. 63, pp. 50–67.
  26. Menezes F.F. Anisotropy of volume change and permeability evolution of hard sandstones under triaxial stress conditions. *Journal of petroleum science and engineering*, 2019, vol. 174, pp. 921–939.
  27. Heap M., Reuschle T., Baud P., Renard F., Lezzi G. The permeability of stylolite-bearing limestone. *Journal of structural geology*, 2018, vol. 116, pp. 81–93.
  28. Sayakhutdinov A.I., Kondratieva N.R., Gallyamova D.Ch., Karachurina E.V., Bulatova E.S. Method of complex carbonate reservoir simulation of fractured reservoirs on the example of Mancharovskoe deposit. *Oil Industry*, 2014, no. 2, pp. 114–115. In Rus.
  29. Cherepanov S.S., Chumakov G.N., Galkin S.V. Opportunities of accounting fractured reservoirs in geological and hydrodynamic modeling of development of reservoir with water flooding layers. *Oilfield business*, 2016, no. 8, pp. 5–8. In Rus.
  30. Schipanov A.A. Modification of relative phase permeabilities as one of the approaches to the consideration of reservoir fracturing in hydrodynamic modeling. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2002, no. 8, pp. 60–66. In Rus.
  31. Kashnikov Yu.A., Ashikhmin S.G., Kukhtinsky A.E., Shustov D.V. On the relationship of fracture toughness coefficients and geophysical characteristics of rocks of hydrocarbon deposits. *Journal of Mining Institute*, 2020, vol. 241, pp. 83–90. In Rus.
  32. Abbasov E.M., Agaeva N.A., Kerimova Sh.A. Integral modeling of gas well operation considering the deformability of the reservoir. *SOCAR Proceedings*, 2019, no. 2, pp. 45–52. In Rus.

Received: 28 August 2019.

#### Information about the authors

**Alexander G. Mengaliev**, 2<sup>nd</sup> category engineer, LLC «LUKOIL-Engineering» «PermNIPIneft» in Perm.  
**Dmitriy A. Martyshev**, Cand. Sc., assistant professor, Perm National Research Polytechnic University.

УДК 87.35.91

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ САЙКЛИНГ-ТЕХНОЛОГИИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ЗАЛЕЖЕЙ ГАЗОВОГО КОНДЕНСАТА

**Волженина Диана Алексеевна<sup>1</sup>,**  
Volzhenina\_DA@irkutskoil.ru

**Шарф Ирина Валерьевна<sup>2</sup>,**  
irina\_sharf@mail.ru

**Сабанчин Игорь Валентинович<sup>2</sup>,**  
isabanchin@irkutskoil.ru

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

<sup>2</sup> Иркутская Нефтяная Компания,  
Россия, 664007, г. Иркутск, пр. Большой Линейный, 4.

**Актуальность** исследования обусловлена тем, что при разработке газоконденсатных залежей на месторождениях нефти и газа наблюдаются процессы ретроградной конденсации, вследствие которых в пласте безвозвратно теряются значительные объемы высококипящих компонентов углеводородной группы  $C_{5+}$ , добыча которых являлась бы дополнительным доходным источником для нефтегазовых компаний. Общие запасы газового конденсата в России составляют около 2 млрд т, поэтому для решения проблемы наиболее полного извлечения компонентов газоконденсатной пластовой смеси необходимо внедрение новых эффективных методов добычи.

**Целью** исследования является обоснование эффективности применения сайклинг-технологии для разработки газоконденсатной залежи.

**Объект:** месторождение N, расположенное на территории Восточной Сибири.

**Методы:** композиционное, геологическое и гидродинамическое моделирование газоконденсатной залежи

**Результаты.** Проведено композиционное моделирование газоконденсатной пластовой смеси в соответствии с компонентным составом проб газа и газового конденсата, а также результатами газоконденсатных исследований. Построена упрощенная геологическая модель исследуемой залежи, на основе которой проведено гидродинамическое моделирование ее состояния на различных режимах разработки. Сравнительный анализ показателей разработки газоконденсатной залежи, таких как коэффициент извлечения конденсата, коэффициент извлечения компонентов  $C_2$ - $C_4$  и конденсато-газовый фактор, на различных режимах работы доказал, что применение сайклинг-технологии приводит к увеличению извлечения компонентов углеводородной группы  $C_{5+}$  и позволяет решать ряд экономических и экологических задач. Возможна адаптация представленной модели под необходимые горно-геологические условия с целью применения данной технологии на территории Западно-Сибирской и других нефтегазоносных провинций.

### **Ключевые слова:**

Месторождение, разработка, высококипящие группы углеводородов, сайклинг-технология, газоконденсатная залежь, композиционное, геологическое и гидродинамическое моделирование, коэффициент извлечения конденсата.

### **Введение**

Основной особенностью залежей газового конденсата является большое содержание в нем углеводородов группы  $C_{5+}$ , которые при изотермическом снижении давления выпадают в жидкую фазу. Такой процесс называется ретроградной конденсацией и ведет не только к потерям высококипящих углеводородов, являющихся значимым источником доходов для добывающих компаний, но и к осложнениям в процессе разработки. В связи с этим газоконденсатные системы были признаны типом резервуара с наиболее сложными термодинамическими характеристиками и поведением газожидкостного потока.

Фазовые превращения газового конденсата с изменением температуры и давления происходят поэтапно. При начальном пластовом давлении ( $P_{пл}$ ) смесь находится в газообразном состоянии, однако с началом разработки давление в пласте начинает снижаться и при достижении давления, соответствующего уровню начала конденсации ( $P_{нк}$ ), смесь переходит

в двухфазное парожидкостное состояние. Доля жидкой фазы растет вплоть до достижения давления максимальной конденсации, после чего при дальнейшем снижении давления жидкая фаза испаряется. Однако немаловажно то, что переход конденсата из жидкой фазы в газовую происходит при низких давлениях, которые не достигаются при разработке месторождений и на практике обратного испарения газового конденсата в полной мере не наблюдается. Кроме того, в пористой среде испарению выпавшей жидкой фазы могут препятствовать силы взаимодействия с поверхностью породы [1].

Газожидкостные потоки в ретроградных газоконденсатных залежах можно разделить на три области (рис. 1).

1. Первая область находится на удалении от призабойной зоны, и  $R_{пл}$  в ней выше  $R_{нк}$ , в этой области присутствует только однофазный углеводородный газ.
2. Вторая область – область накопления конденсата, где жидкость выпадает из газовой фазы, но еще не

является подвижной, то есть поток газа все еще является однофазным.

- Третья область, или призабойная зона пласта, отличается более низким давлением, чем в предыдущих зонах. Таким образом, насыщение жидкостью увеличивается, что обуславливает течение к стволу скважины конденсата не только в газовой, но и в жидкой фазе, что приводит к значительному снижению относительной проницаемости по газу и, тем самым, уменьшается продуктивность добывающей скважины [2, 3].

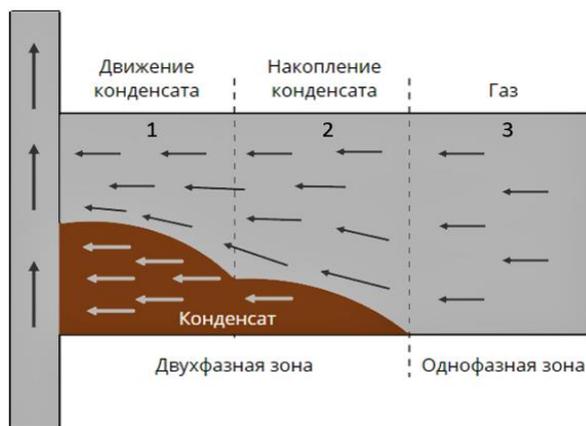


Рис. 1. Газожидкостные потоки в газоконденсатных залежах

Fig. 1. Gas-liquid flows in gas-condensate reservoir

По оценкам ИНГГ СО РАН общие запасы газового конденсата в России составляют около 2 млрд т, поэтому проблема наиболее полного извлечения компонентов газоконденсатной пластовой смеси, содержащейся в залежах газового конденсата, является актуальной для нефтегазодобывающих компаний и требует внедрения новых эффективных методов добычи [4–6]. Одним из подходов к разработке таких залежей является применение сайклинг-технологии, которая заключается в поддержании пластового давления путем нагнетания в продуктивный горизонт сухого газа. Целью применения данной технологии является предотвращение ретроградной конденсации жирного углеводородного газа в призабойной зоне пласта, увеличение коэффициента извлечения конденсата и получение газового конденсата в качестве товарного продукта. Помимо этого, становится возможным решить экологическую проблему, связанную с утилизацией попутного газа в случае отсутствия инфраструктуры для его подготовки и сбыта, путем консервации запасов газа до возможности их реализации [7, 8]. Таким образом, целью данного исследования является обоснование эффективности применения сайклинг-технологии при разработке газоконденсатной залежи на примере месторождения N Восточной Сибири и возможного тиражирования данной технологии на месторождениях Западной Сибири.

#### Материалы и методы

Обоснование эффективности применения сайклинг-технологии (далее *сайклинг*) на газоконден-

сатных месторождениях проводилось путем сравнительного анализа технологических показателей, полученных для различных режимов разработки. Основным инструментом проведения сравнительного анализа являются следующие виды моделирования:

- композиционное;
- геологическое;
- гидродинамическое.

#### Результаты

Композиционное моделирование.  
Создание модели флюида

Наиболее доступным и эффективным средством контроля за пластовой системой, а также инструментом визуализации процессов, происходящих в газоконденсатной залежи, признано композиционное моделирование, результатом которого является модель пластового флюида. В рамках данного исследования моделирование производилось в программном комплексе ECLIPSE (PVTi & ECLIPSE Compositional) [9]. Исходными данными для модели послужили сведения о составе, физико-химических и термодинамических свойствах пластового флюида, полученные на основе специальных промысловых и лабораторных исследований газоконденсата. Однако в связи с тем, что может присутствовать фактор неопределенности, обусловленный возможными неточностями и ошибками при проведении замеров, было уделено особое внимание выбору максимально представительной пробы, на основе которой рассчитывается композиционная модель, с целью уменьшения искажений в оценках фазового состояния и свойств компонентов флюида при создании модели газожидкостной смеси [10, 11].

В рамках исследования была использована наиболее представительная для исследуемого месторождения N проба газа и газового конденсата, свойства которой представлены в табл. 1.

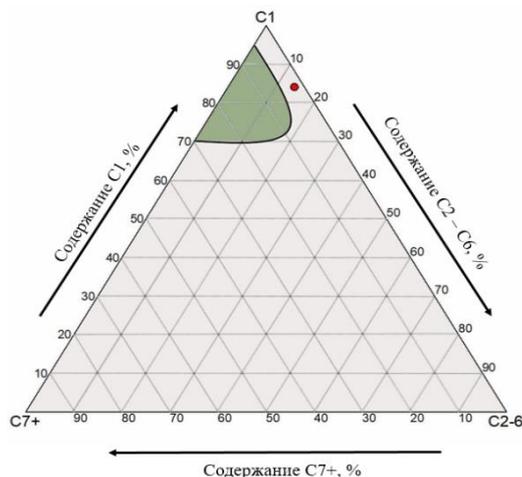
Таблица 1. Параметры выбранной для моделирования пробы

Table 1. Parameters of sample simulation

Параметр Parameter	Обозначение Designation	Значение Value	Единица измерения Unit of measurement
Пластовое давление Formation pressure	$P_{пл}$	256	бар
Пластовая температура Formation temperature	$T_{пл}$	32	°C
Давление начала конденсации Dew point pressure	$P_{нк}$	242	бар
Конденсато-газовый фактор Condensate-gas factor	$KГФ$	321,8	см <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>
Плотность конденсата Density	$\rho_{конд}$	705	кг/м <sup>3</sup>

Построенная тернарная диаграмма, представленная на рис. 2, отображает состав и фазовое состояние флюида в условиях начального пластового давления и

температуры. Двухфазное состояние смеси при заданных термобарических условиях ( $P_{пл}$ ,  $T_{пл}$ ) иллюстрируется закрашенной областью на диаграмме. Однако точка, характеризующая состав выбранной пробы флюида, лежит вне этой области, что говорит об однофазном газообразном состоянии пластового флюида в момент начала разработки [12, 13].



**Рис. 2.** Тернарная диаграмма пластовой смеси  
**Fig. 2.** Ternary diagram of formation fluid

Для построения корректной модели углеводородной смеси, которая будет полностью характеризовать исходный пластовый флюид и его фазовое поведение, необходимо не только задать состав и свойства флюида, но и настроить PVT-модель, то есть правильно определить параметры уравнения состояния на основе принципов парожидкостного равновесия фаз при конкретных термобарических условиях и фактическом составе пластового газа (табл. 2), газа сепарации и газового конденсата [14–16].

**Таблица 2.** Компонентный состав пластового флюида  
**Table 2.** Formation fluid composition

Компонент Component	Содержание, % Content, %	Молярная масса, г/моль Molar mass, g / mol
N <sub>2</sub>	3,768	28,013
He	0,188	4,0
C <sub>1</sub>	79,066	16,04
C <sub>2</sub>	6,747	30,07
C <sub>3</sub>	2,085	44,097
C <sub>4</sub>	1,679	58,124
C <sub>5+</sub>	4,511	76,341
C <sub>7+</sub>	1,128	105,87
C <sub>10+</sub>	0,828	166,57

При создании композиционной модели газоконденсатной пластовой смеси использовался алгоритм, описанный в работе Т.С. Ющенко [17]. Настройка PVT-модели выполнена на основе результатов следующих лабораторных исследований пластового флюида.

1. Dew point test (определение давления начала конденсации).
2. Separator test (ступенчатая сепарация, определение плотности и газового фактора с учетом стандартных условий на последней ступени сепарации) [18].

3. Constant Composition Expansion test (CCE, исследования при постоянной массе), благодаря которому определяется PV соотношение, z-фактор газа, плотность и вязкость пластового флюида, объем жидкой фазы и давление насыщения.
4. Constant Volume Depletion test (CVD, исследования при постоянном объеме), которое позволяет определить z-фактор газа, объем насыщенной жидкой фазы, состав и свойства газа и выделившегося конденсата на каждой ступени сепарации.

Так как корректность PVT-модели газового конденсата в значительной степени определяется свойствами группы углеводородов C<sub>5+</sub>, то для повышения ее достоверности и точности было проведено искусственное разбиение группы углеводородов (УВ) C<sub>5+</sub> на несколько псевдофракций методом, предложенным С.Н. Whitson [19, 20], который основан на предположении, что распределение молярных долей тяжёлых фракций описывается гамма-распределением. В нашем случае разбиение производилось на 30 компонентов с последующей группировкой до C<sub>5+</sub>, C<sub>7+</sub> и C<sub>10+</sub> с целью корректирования свойств флюида и дальнейшей группировки до необходимого количества компонентов.

Таким образом, созданная композиционная модель флюида позволяет достаточно точно прогнозировать значения таких параметров, как давление насыщения, плотность, вязкость, объёмный коэффициент и фазовое состояние пластового флюида как в пластовых условиях, так и на ступенях сепарации.

#### Геологическое моделирование

При построении геологической модели производится агрегация всей имеющейся геологической информации о залежи, в том числе о запасах УВ. Геологическое моделирование является основой для последующего гидродинамического моделирования процесса разработки залежи [21]. Для проведения сравнительного анализа режимов разработки создана упрощенная геологическая модель с принятыми для данной залежи усредненными геолого-геофизическими параметрами продуктивного интервала, представленными в табл. 3. Неоднородность залежи по проницаемости для решения поставленной задачи по оценке эффективности разных режимов разработки с применением сайклинга достаточно описать коэффициентом анизотропии, который связан с процессами осадконакопления в период формирования породы-коллектора и который принят равным  $k_{пр.в}/k_{пр.г}=0,15$ . Помимо этого, породы, слагающие исследуемую залежь, характеризуются межзерновой пористостью, которая в модели принята одинаковой для всего продуктивного интервала вследствие ее малой изменчивости по объему.

Объемы геологических запасов каждого компонента в стандартных условиях, заключённых в созданной модели, рассчитывались по формуле:

$$V_i = \frac{Z_i \times (GRV \times K_p \times (1 - K_{во} - K_{но}))}{B_0},$$

где  $V_i$  – геологические запасы  $i$ -го компонента;  $Z_i$  – мольная доля  $i$ -го компонента в смеси (рис. 1);  $GRV=2000*2000/10=40*106 \text{ м}^3$  – объем куба (модели);  $K_p=0,12$  – коэффициент пористости;  $K_{во}=0,12$  – остаточная водонасыщенность;  $K_{но}=0,32$  – остаточная нефтенасыщенность;  $V_0$  – объемный коэффициент газа с учетом  $z$ -фактора.

Таблица 3. Параметры геологической модели

Table 3. Parameters of geologic model

Параметр Parameter	Обозначение Designation	Значение Value	Единица измерения Unit of measurement
Размер модели (Model size)	X, Y, Z	2000×2000×10	м
Пористость (Porosity)	$K_p$	12	%
Горизонтальная проницаемость (Horizontal permeability)	$K_{пр.г}$	100	мД
Вертикальная проницаемость (Vertical permeability)	$K_{пр.в}$	15	мД
Песчанистость (Net to gross)	$NTG$	0,8	Ед.
Остаточная водонасыщенность (Residual water saturation)	$K_{во}$	12	%
Остаточная нефтенасыщенность (Residual oil saturation)	$K_{но}$	32	%

#### Гидродинамическое моделирование

На основе геологической модели была построена гидродинамическая модель объекта исследуемой залежи, которая позволяет не только прогнозировать технологические показатели разработки, но и является инструментом для принятия производственных решений [16]. Данная модель является инструментом визуализации процессов, происходящих в залежи с заданными геолого-физическими свойствами (табл. 3) и насыщенной углеводородной смесью, состав и свойства которой описаны посредством композиционного моделирования (табл. 1, 2). Гидродинамическая модель позволяет дать оценку эффективности применения сайклинг-технологии в условиях газоконденсатной залежи путем прогнозирования показателей разработки на 30 лет. В качестве инструмента для моделирования был использован гидродинамический симулятор tNavigator® компании Rock Flow Dynamics® (RFD), посредством которого была инициализирована цифровая секторная гидродинамическая модель газоконденсатной залежи N-го месторождения Восточной Сибири (рис. 3).

Модельный сектор является частью пятиточечной системы разработки и содержит две вертикальные скважины с перфорацией по всей эффективной толщине пласта. В рамках исследования сайклинг реализуется посредством нагнетания в пласт сухого газа, собранного с последней ступени сепарации, что позволяет решить проблему утилизации газа, а подбор

низкотемпературного сепаратора предотвращает обратную закачку в пласт высококипящих компонентов.

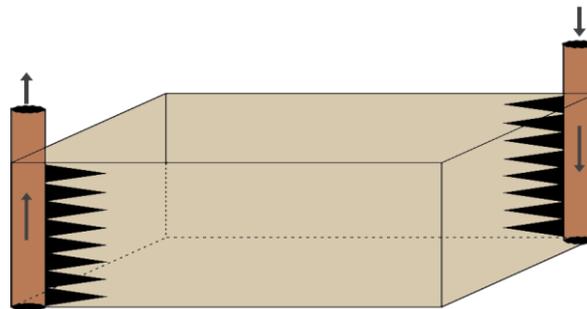


Рис. 3. Схема секторной гидродинамической модели залежи  
 Fig. 3. Scheme of the sectoral hydrodynamic formation model

#### Сравнительный анализ

В настоящее время разработка газоконденсатных месторождений в России ведется, как правило, без поддержания пластового давления, то есть на режиме истощения.

При разработке газоконденсатных месторождений особое внимание уделяется в первую очередь извлечению непосредственно газового конденсата, содержащего углеводородную группу компонентов  $C_{5+}$ . Однако нельзя забывать о том, что большую часть природного газа составляют именно легкие УВ, которые также являются важным энергетическим ресурсом и их добыча приносит добывающим компаниям значительный экономический эффект. Поэтому при выборе оптимального сценария разработки необходимо учитывать покомпонентную добычу УВ ( $C_1, C_2, C_3-C_4, C_{5+}$ ). В связи с этим критерием эффективности того или иного режима разработки выбран такой показатель, как коэффициент извлечения компонента (КИК), т. е. отбор компонента в зависимости от его геологических запасов.

Так ли эффективен сайклинг и есть ли необходимость в его применении? Для ответа на эти вопросы проведен сравнительный анализ эффективности разработки месторождения на режиме истощения и с применением сайклинга. На рис. 4 приведены дебиты газового конденсата со скважины исследуемого месторождения с прогнозом на 30 лет для указанных выше режимов.

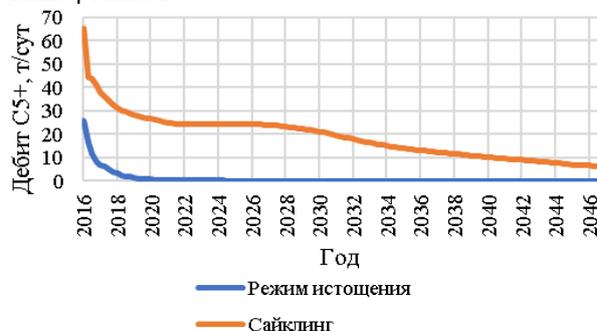


Рис. 4. Дебиты газового конденсата в динамике на режимах истощения и с применением сайклинга

Fig. 4. Flow rates of gas condensate in dynamics at depletion drive and cycling

Коэффициент извлечения конденсата при работе на режиме истощения составляет 23 %, на режиме сайклинга – 62 %, что объясняется поддержанием Рпл закачкой в пласт сухого газа и предотвращением потерь компонентов  $C_{5+}$  вследствие процессов ретроградной конденсации. Отсюда можно сделать вывод о том, что применение сайклинга для разработки газоконденсатной залежи увеличивает извлечение конденсата в три раза и является эффективным технологическим решением.

Повышение эффективности сайклинг-технологии

Целью дальнейших исследований стал поиск способов повышения эффективности сайклинга, в рамках которого эмпирическим методом производился подбор следующих параметров: 1) время начала воздействия на пласт для максимального извлечения компонентов; 2) оптимальные объемы закачки (коэффициент компенсации); 3) порог рентабельности технологии.

В работе смоделированы и рассчитаны 10 режимов разработки газоконденсатной залежи, критериями эффективности которых выбраны КИК и темпы отбора газового конденсата. Моделирование сайклинга производилось на компенсации в 50 и 100 % и с нагнетанием газа в объемах, равных максимальной приемистости газонагнетательной скважины (рис. 5).

Режим истощения с последующим сайклингом подразумевает введение системы поддержания Рпл путем закачки сухого газа через какое-то время после начала разработки. Такой сценарий разработки основан на предварительном истощении залежи, в процессе которого вырабатываются в основном запасы низкокипящих компонентов, после чего запускается сайклинг для извлечения газового конденсата.

Режимы с переходом на истощение после сайклинга обоснованы необходимостью извлекать

уже сухой газ после того, как запасы конденсата отработаны [22]. Помимо этого, на эффективность сайклинга большое влияние оказывает коэффициент компенсации, который равен отношению объемов закачиваемого и добываемого газа в пластовых условиях и напрямую зависит от доступного количества реагента закачки, технических мощностей и т. д.

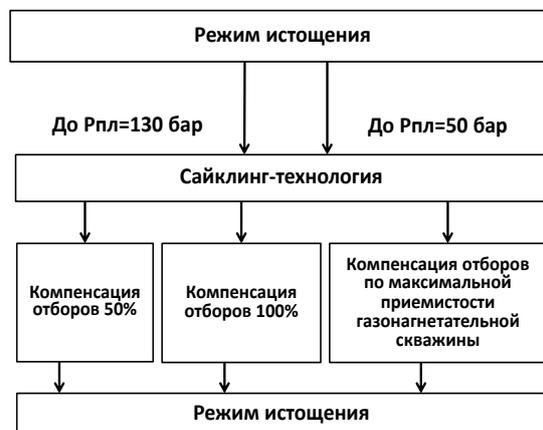


Рис. 5. Режимы разработки газоконденсатной залежи  
 Fig. 5. Gas condensate reservoir development mechanisms

По результатам гидродинамического моделирования построена гистограмма дебитов газового конденсата (рис. 6), из которой можно сделать вывод о том, что варианты с предварительным истощением являются малоэффективными для извлечения компонентов  $C_{5+}$ . Такой результат объясняется стремительным снижением Рпл до уровня ниже Рнк до момента введения сайклинга, что ведет к ретроградной конденсации, а следовательно, и к снижению добычи газового конденсата.

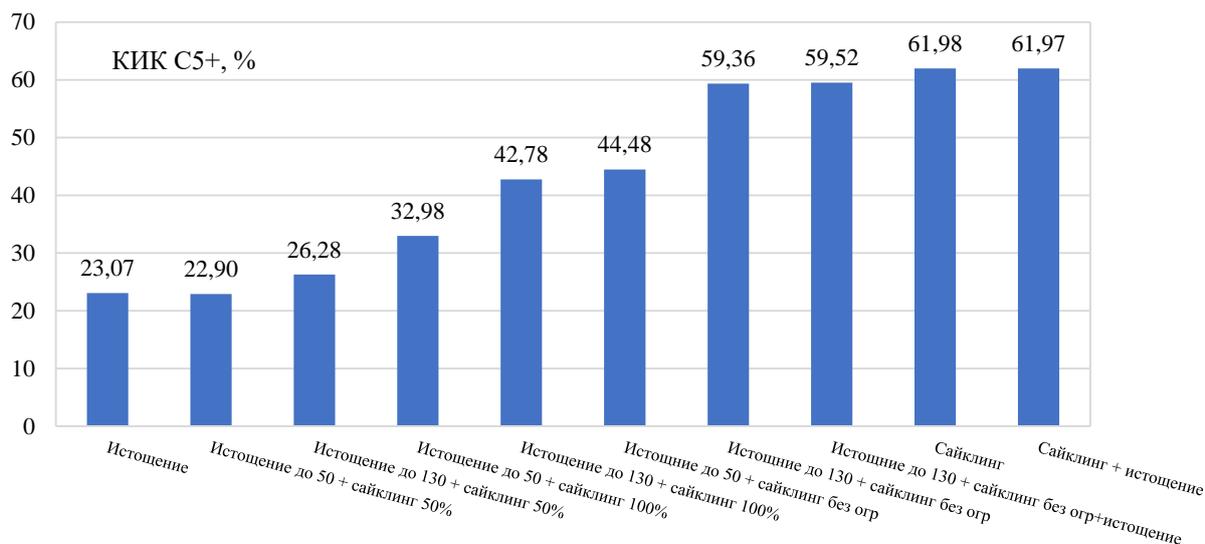


Рис. 6. Сравнительная гистограмма дебитов и коэффициентов извлечения газового конденсата при различных комбинациях режимов истощения и сайклинга

Fig. 6. Comparative histogram of flow rates and gas condensate recovery factor at different combinations of depletion drive and cycling

Величина, на которую поднимется Рпл при подключении нагнетательной скважины, напрямую зависит от количества закачиваемого газа [23], поэтому более высокие коэффициенты извлечения конденсата достигаются при компенсации 100 %, чем при 50 %. Однако необходимо учесть, что доведение до 100 % компенсации может быть не реализовано в силу необходимости подключения дополнительных объемов газа извне, что не всегда является возможным. Для режимов, на которых получены максимальные дебиты и, соответственно, коэффициенты извлечения

конденсата, построена гистограмма добычи компонентов УВ порядка  $C_1-C_4$  (рис. 7).

Для визуализации темпов отбора газового конденсата проведен анализ конденсато-газового фактора (КГФ) в добываемом флюиде, результаты которого представлены на рис. 8. Явление ретроградной конденсации при снижении Рпл ниже уровня Рнк приводит к осушению скважиной продукции посредством выпадения в пласте компонентов  $C_{5+}$  [24], о чем говорит низкий КГФ при истощении и более высокий при сайклинге.

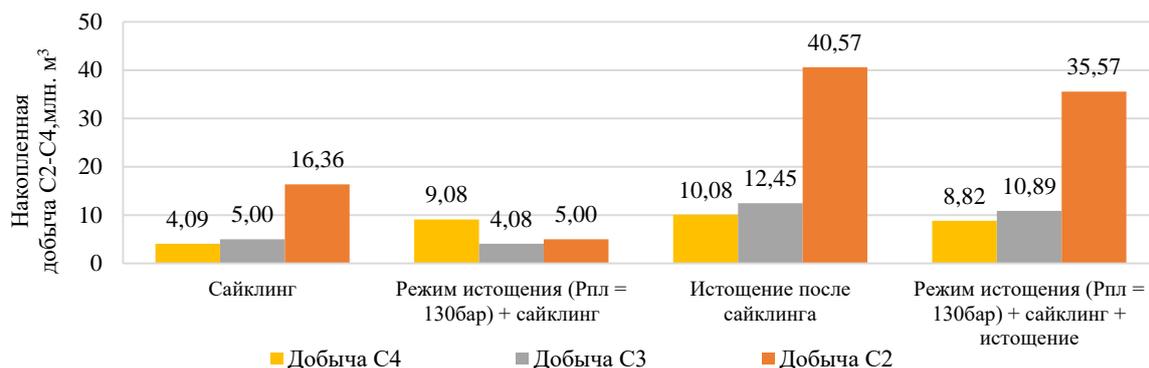


Рис. 7. Гистограмма накопленной добычи компонентов углеводородов  $C_1-C_4$

Fig. 7. Histogram of cumulative production of hydrocarbon component  $C_1-C_4$

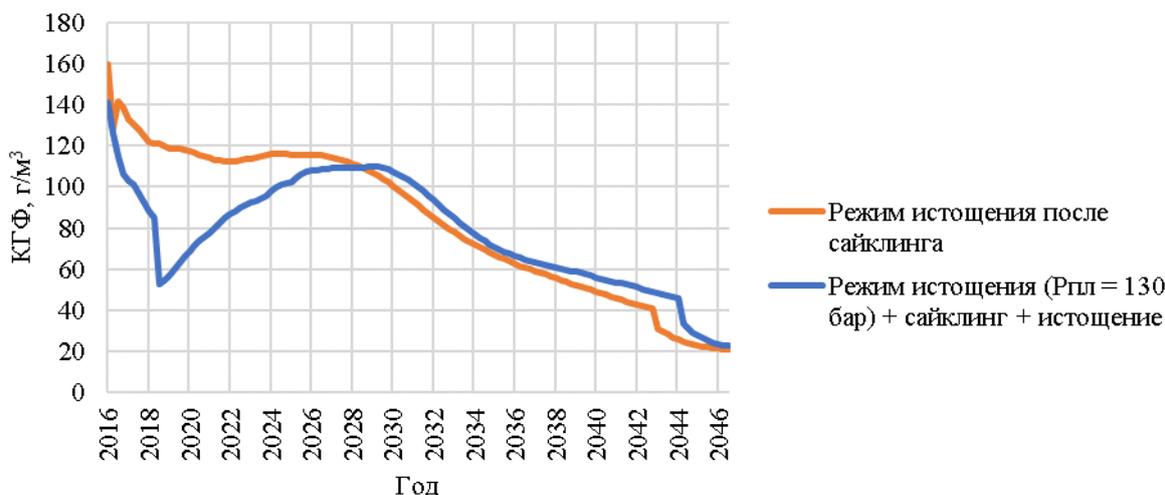


Рис. 8. Конденсато-газовый фактор в динамике, г/м³

Fig. 8. Condensate-gas factor in dynamics, g/m³

В случае разработки по сценарию «истощение, сайклинг, истощение» неизбежны значительные потери газового конденсата в первые годы разработки. Таким образом, высокие темпы отбора конденсата можно получить только путем поддержания пластового давления непосредственно с начала эксплуатации, не опуская его ниже давления начала конденсации газа.

Как говорилось ранее, для экономической эффективности проекта необходимо учитывать добычу не только конденсата, но и других групп УВ. Истощение залежи после выработки газового конденсата имеет положительный эффект и позволяет извлекать низко-

кипящие углеводородные компоненты, которые при дальнейшей оптимизации можно перевести в разряд товарных продуктов в виде СПГ, этилена и природного газа. Поэтому на последней стадии разработки газоконденсатного месторождения можно повысить эффективность проекта путем перевода нагнетательных скважин в добывающий фонд.

Проведенное технико-экономическое обоснование показывает, что высокий темп отбора конденсата и низкокипящих УВ именно в первые годы разработки месторождения приносит максимальный экономический эффект.

### Заключение

Для решения проблемы, связанной с потерями высококипящих компонентов группы УВ группы C<sub>5+</sub> при разработке газоконденсатных залежей, предложено применение сайклинг-технологии, которая позволяет:

- предотвратить выпадение конденсата в пласте путем поддержания пластового давления;
- обеспечить максимальный отбор газового конденсата в первые годы разработки;
- обеспечить эффективную разработку залежи при условии 100 % компенсации отборов из пласта;
- решить экологические проблемы, связанные с утилизацией попутного газа;
- осуществлять отбор не только УВ группы C<sub>5+</sub>, но и этана, пропана и бутана.

Проведенные расчеты на основе усовершенствованной композиционной модели газоконденсатной смеси и секторной геологической модели залежи показали, что применение сайклинга для разработки

газоконденсатной залежи увеличивает извлечение конденсата в три раза на прогнозируемом периоде в 30 лет.

В результате модельных расчетов получен коэффициент извлечения конденсата, равный 62 %, и высокий конденсатно-газовый фактор в первые 10 лет разработки. Также выделен наиболее оптимальный режим разработки газоконденсатной залежи, который предполагает применение режима истощения после реализации сайклинга.

Авторы считают возможным тиражирование технологии сайклинга на месторождениях Западной Сибири путем адаптации модели под необходимые геологические условия.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 18-010-00660 А Концептуальные подходы к парадигме устойчивого и сбалансированного недропользования области с учетом специфики минерально-сырьевой базы и отраслевой структуры в целях обеспечения долгосрочного социально-экономического роста нефтедобывающего региона.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tarek A. Reservoir engineering handbook. – London, UK: Elsevier Science & Technology, Gulf Professional Publ., 2010. – 1463 p.
2. Al-Baqawi A.M., Al-Malki B.H. Well test analysis in naturally fractured gas condensate reservoirs below dew point pressure // Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition. – Jakarta: Society of Petroleum Engineers, 2009. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-122594-MS> (дата обращения 03.09.2019).
3. Siddiqui M.A.Q., Alnuaim S., Khan R.A. Well placement and rate optimization for gas cycling in gas condensate reservoirs // SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference. – Manama, Bahrain: Society of Petroleum Engineers, 2015. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-172641-MS> (дата обращения 03.09.2019).
4. Закономерности истощения запасов нефти и газа в России и прогноз их воспроизводства / И.В. Филимонова, Л.В. Эдер, И.В. Проворная, А.В. Комарова // Экологический вестник России. – 2018. – № 4. – С. 4–12.
5. Current state and problems of integrated development of mineral resources base in Russia / I.V. Filimonova, L.V. Eder, M.V. Mishenin, T.M. Mamakhatov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – V. 84. – № 1. – P. 1–5.
6. Key problems in the development of the power of Siberia project / A.E. Kontorovich, L.V. Eder, I.V. Filimonova, S.M. Nikitenko // Regional Research of Russia. – 2018. – V. 8. – № 1. – P. 92–100.
7. Эдер Л.В., Проворная И.В., Филимонова И.В. Проблемы рационального использования попутного нефтяного газа в России // География и природные ресурсы. – 2019. – Т. 40. – № 1. – С. 9–14.
8. Sharf I., Tsubulnikova M., Dmitrieva N. Economic evaluation of the approaches to associated petroleum gas utilization // Ecology, Economics, Education and Legislation: Proc. 16th International multidisciplinary scientific geoconference (SGEM 2016). – Sofia: STEF92 Technology Ltd, 2016. – V. 2–5. – P. 153–160.
9. PVTi and ECLIPSE 300. An Introduction to PVT analysis and compositional simulation. – Houston, USA: Schlumberger, Abingdon Technology Center Training 2005. – 402 p.
10. Щebetов А.В., Галкин М.В. Оценка качества и моделирование газоконденсатных исследований в условиях неопределенности исходных данных // Газовая промышленность. – 2009. – № 9. – С. 40–44.
11. Научные основы прогноза фазового поведения пластовых газоконденсатных систем // А.И. Гриценко, И.А. Гриценко, В.В. Юшкин, Т.Д. Островская. – М.: Недра, 1995. – 432 с.
12. Afidick D., Kaczorowski N.J., Bette S. Production performance of retrograde gas reservoir: a case study of the Arun field // SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference. – Melbourne: The Society Publ., 1994. – P. 73–80.
13. Брусиловский А.И. Фазовые превращения при разработке месторождений нефти и газа. – М.: Грааль, 2002. – 575 с.
14. Грачев С.И., Краснова Е.И. Термодинамические процессы при разработке нефтегазоконденсатных месторождений. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2015. – 99 с.
15. Брусиловский А.И. Моделирование фазового состояния и термодинамических свойств природных многокомпонентных систем при проектировании разработки и эксплуатации месторождений нефти и газа: дис. ... д-ра техн. наук. – М., 1994. – 602 с.
16. Spivak A., Dixon T.N. Simulation of gas-condensate reservoirs // SPE Symposium on Numerical Simulation of Reservoir Performance. – Houston, USA: Society of Petroleum Engineers, 1973. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-4271-MS> (дата обращения 03.09.2019).
17. Ющенко Т.С. Методика автоматизированного создания термодинамических моделей газоконденсатных пластовых углеводородных систем на основе кубического уравнения состояния // Труды МФТИ. – 2014. – Т. 6. – № 3. – С. 154–161.
18. Шарипов А.Ф., Волков А.Н. Анализ критериев оценки качества отбора проб при газоконденсатных исследованиях // Вестник ЦКР Роснедра. – 2015. – № 4. – С. 33–41.
19. Use of compositional simulation in the management of Arun gas condensate reservoir / T. Sutan-Assin, S.C. Rastogi, M. Abdullah, D. Hidayat // 7th Offshore South East Asia Conference. – Singapore: Society of Petroleum Engineers, 1988. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-17683-MS> (дата обращения 05.09.2019).
20. Whitson C.H., Brule M.R. Phase behavior. – Texas: Richardson, 2000. – 240 p.
21. Итерационный подход при геологическом и гидродинамическом моделировании / Д.А. Зундэ, А.А. Горланов, И.П. Шаламов, А.И. Давлетшин, В.Ю. Белянский, О.А. Лознюк, К.Е. Закревский, В.Н. Абрашов // Нефтяное хозяйство. – 2019. – № 5. – С. 58–61.
22. Dake L.P. Fundamentals of reservoir engineering. – Amsterdam, The Netherlands: Elsevier science B.V, 1978. – 438 p.
23. Aziz R.M. Critique on gas cycling operations in gas condensate reservoirs // Middle East Oil Technical Conference and Exhibition. – Manama, Bahrain: Society of Petroleum Engineers, 1983. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-11477-MS> (дата обращения 05.09.2019).
24. Инструкция по комплексному исследованию газовых и газоконденсатных пластов и скважин / под ред. Г.А. Зотова, З.С. Алиева. – М.: Недра, 1980. – 301 с.

Поступила 14.11.2019 г.

**Информация об авторах**

**Волженина Д.А.**, магистрант отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Шарф И.В.**, кандидат экономических наук, доцент отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Сабанчин И.В.**, директор департамента разработки месторождений Иркутской Нефтяной Компании.

UDC 87.35.91

## ANALYSIS OF EFFICIENCY OF APPLYING CYCLING IN RESERVOIR DEVELOPMENT OF GAS CONDENSATE

**Diana A. Volzhenina**<sup>1</sup>,  
Volzhenina\_DA@irkutskoil.ru

**Irina V. Sharf**<sup>1</sup>,  
irina\_sharf@mail.ru

**Igor V. Sabanchin**<sup>2</sup>,  
isabanchin@irkutskoil.ru

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

<sup>2</sup> Irkutsk Oil Company,  
4, Bolshoy Liteiny avenue, Irkutsk, 664007, Russia.

**The relevance** of the research is conditioned by the processes of retrograde condensation while developing gas-condensate reservoirs at oil and gas fields. Due to these processes the reservoir loses its significant volumes of high-boiling components of C<sub>5+</sub> hydrocarbon group, the production of which would be an additional income source for oil companies. The total reserves of gas condensate in Russia is about two billion tons. Therefore, to solve the problem of the fullest extraction of gas-condensate reservoir components it is necessary to implement new production methods.

**The research aim** is to justify the efficiency of cycling technology in gas-condensate reservoir development.

**Subject:** N field located in the territory of the Eastern Siberia.

**Methods:** compositional, geologic, and hydrodynamic simulation of gas-condensate reservoir

**Results.** The paper presents the results of gas-condensate formation fluid compositional simulation in accordance with gas and condensate sample composition as well as gas-condensate study. Simplified geologic model of studied reservoir has been built and hydrodynamic simulation of its condition has been performed for different recovery mechanisms. Comparative analysis of gas condensate reservoir development parameters (condensate recovery factor, C<sub>2</sub>-C<sub>4</sub> recovery factor, and condensate-gas factor) at different recovery mechanisms proved that application of cycling results in increase of extraction of hydrocarbon group C<sub>5+</sub> component and allows solving a number of economic and environmental problems. It is possible to adapt the model to the required geologic conditions to use the given technology in the territory of Eastern Siberia and other petroleum provinces.

### Key words:

Reservoir, development, high-boiling hydrocarbon groups, cycling, gas-condensate reservoir, compositional, geologic, and hydrodynamic simulation, condensate recovery factor.

The research was financially supported by the RFBR, grant 18-010-00660 A Conceptual approaches to the paradigm of stable and balanced subsurface management of the region considering the specific character of mineral resource base and sectoral structure to support long-term social and economic growth of oil producing region.

### REFERENCES

1. Tarek A. *Reservoir engineering handbook*. London, UK, Elsevier Science & Technology, Gulf Professional Publ., 2010. 1463 p.
2. Al-Baqawi A.M., Al-Malki B.H. Well test analysis in naturally fractured gas condensate reservoirs below dew point pressure. *Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*. Jakarta, Society of Petroleum Engineers, 2009. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-122594-MS> (accessed 3 September 2019).
3. Siddiqui M.A.Q., Alnuaim S., Khan R.A. Well placement and rate optimization for gas cycling in gas condensate reservoirs. *SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference*. Manama, Bahrain: Society of Petroleum Engineers, 2015. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-172641-MS> (accessed 3 September 2019).
4. Filimonova I.V., Eder L.V., Provornaya I.V., Komarova A.V. Regularities of oil and gas reserve depletion in Russia and the forecast of their reproduction. *Environmental bulletin of Russia*, 2018, no. 4, pp. 4–12. In Rus.
5. Filimonova I.V., Eder L.V., Mishenin M.V., Mamkhatov T.M. Current state and problems of integrated development of mineral resources base in Russia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, vol. 84, no. 1, pp. 1–5.
6. Kontorovich A.E., Eder L.V., Filimonova I.V., Nikitenko S.M. Key problems in the development of the power of Siberia project. *Regional Research of Russia*, 2018, vol. 8, no. 1, pp. 92–100.
7. Eder L.V., Provornaya I.V., Filimonova I.V. Problems of rational use of associated petroleum gas in Russia. *Geography and Natural Resources*, 2019, vol. 40, no. 1, pp. 9–14. In Rus.
8. Sharf I., Tsibulnikova M., Dmitrieva N. Economic evaluation of the approaches to associated petroleum gas utilization. *Ecology, Economics, Education and Legislation: Proc. 16<sup>th</sup> International multidisciplinary scientific geoconference (SGEM 2016)*. Sofia, STEF92 Technology Ltd, 2016. Vol. 2–5, pp. 153–160.
9. PVTi and ECLIPSE 300. *An Introduction to PVT analysis and compositional simulation*. Houston, USA, Abingdon Technology Center Training, Schlumberger, 2005. 402 p.
10. Shhebetov A.V., Galkin M.V. Otsenka kachestva i modelirovaniye gazokondensatnykh issledovaniy v usloviyakh neopredelennosti iskhodnykh dannykh [Quality assessment and modeling of gas condensate studies under uncertainty of initial data]. *GAS Industry of Russia*, 2009, no. 9, pp. 40–44.
11. Gritsenko A.I., Gritsenko I.A., Yushkin V.V., Ostrovskaya T.D. *Nauchnye osnovy prognoza fazovogo povedeniya plastovykh gazokondensatnykh sistem* [Scientific bases for prediction of phase behavior of reservoir gas condensate systems]. Moscow, Nedra Publ., 1995. 432 p.

12. Afidick D., Kaczorowski N.J., Bette S. Production performance of retrograde gas reservoir: a case study of the Arun field. *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference*. Melbourne, The Society Publ., 1994. pp. 73–80.
13. Brusilovskiy A.I. *Fazovye prevrashcheniya pri razrabotke mestorozhdeniy nefii i gaza* [Phase transformations in oil and gas field development]. Moscow, Graal Publ., 2002. 575 p.
14. Grachev S.I., Krasnova E.I. *Termodinamicheskie protsessy pri razrabotke neftegazokondensatnykh mestorozhdeniy* [Thermodynamic processes in the development of oil and gas condensate fields]. Tyumen, Industrial University of Tyumen Publ., 2015. 99 p.
15. Brusilovskiy A.I. *Modelirovanie fazovogo sostoyaniya i termodinamicheskikh svoystv prirodnykh mnogokomponentnykh sistem pri proektirovani razrabotki i ekspluatatsii mestorozhdeniy nefii i gaza*. Diss. Dokt. nauk [Modeling of the phase state and thermodynamic properties of natural multicomponent systems in the design development and operation of oil and gas fields. Dr. Diss.]. Moscow, 1994. 602 p.
16. Spivak A., Dixon T.N. Simulation of gas-condensate reservoirs. *SPE Symposium on Numerical Simulation of Reservoir Performance*. Houston, USA, Society of Petroleum Engineers, 1973. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-4271-MS> (accessed 3 September 2019).
17. Yushchenko T.S. Metodika avtomatizirovannogo sozdaniya termodinamicheskikh modeley gazokondensatnykh plastovykh uglevodorodnykh sistem na osnove kubicheskogo uravneniya sostoyaniya [Method of automated development of thermodynamic models of gas condensate reservoir hydrocarbon systems based on the cubic state equation]. *Proceedings of Moscow Institute of Physics and Technology*, 2014, vol. 6, no 3, pp. 154–161.
18. Sharipov A.F., Volkov A.N. Analysis of sampling quality assessment criteria during gas condensate studies. *Vestnik CKR Rosnedra*, 2015, no 4, pp. 33–41. In Rus.
19. Sutan-Assin T., Rastogi S.C., Abdullah M., Hidayat D. Use of compositional simulation in the management of Arun gas condensate reservoir. *7th Offshore South East Asia Conference*. Singapore, Society of Petroleum Engineers, 1988. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-17683-MS> (accessed 5 September 2019).
20. Whitson C.H., Brule M.R. *Phase behavior*. Texas, Richardson, 2000. 240 p.
21. Zunde D.A., Gorlanov A.A., Shalamov I.P., Davletshin A.I., Belyansky V.Yu., Loznyuk O.A., Zakrevskiy K.E., Abrashov V.N. Iterative approach to geological and hydrodynamic modeling. *Oil Industry Journal*, 2019, no. 5. In Rus. Available at: <https://onepetro.org/journal-paper/OIJ-2019-05-058-061-RU> (accessed 5 September 2019).
22. Dake L.P. *Fundamentals of reservoir engineering*. Amsterdam, The Netherlands, Elsevier science B.V., 1978. 438 p.
23. Aziz R.M. Critique on gas cycling operations in gas condensate reservoirs. *Middle East Oil Technical Conference and Exhibition*. Manama, Bahrain, Society of Petroleum Engineers, 1983. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-11477-MS> (accessed 5 September 2019).
24. *Instruktsiya po kompleksnomu issledovaniyu gazovykh i gazokondensatnykh plastov i skvazhin* [Instructions for comprehensive study of gas and gas condensate reservoirs and wells]. Eds. G.A. Zotov, Z.S. Aliev. Moscow, Nedra Publ., 1980. 301 p.

*Received: 14 November 2019.*

#### Information about the authors

**Diana A. Volzhenina**, undergraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Irina V. Sharf**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Igor V. Sabanchin**, Director of the Field Development Department, Irkutsk Oil Company.

УДК 502.2: 556.18

## МЕТОДОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ГЕОХИМИЧЕСКИМ БАЛАНСОМ ВОДОСБОРОВ НА ТЕРРИТОРИИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Савичев Олег Геннадьевич<sup>1</sup>,  
OSavichev@mail.ru

Гусева Наталья Владимировна<sup>1</sup>,  
Guseva24@yandex.ru

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

**Актуальность** определяется наличием нерешенных вопросов оценки состояния водных объектов, их долгосрочного прогноза, нормирования антропогенных воздействий, очистки сточных вод и рекультивации водных объектов в Западной Сибири.

**Цель:** разработка методологии управления геохимическим балансом водных экосистем Западной Сибири в различных природных и антропогенных условиях.

**Методы:** ландшафтно-геохимический, географо-гидрологический, статистические методы, методы математического моделирования водного стока и химического состава вод.

**Результаты и выводы.** Предложена методология управления геохимическим балансом водосборной территории, заключающаяся в: 1) оценке состояния водных объектов, тенденций его изменения и антропогенного влияния; 2) построении комплекса математических моделей, описывающих формирование водного стока и химического состава вод; 3) разработке мероприятий, позволяющих минимизировать антропогенное влияние на водные объекты; 4) оценке эффективности водоохраных мероприятий путем сравнения результатов наблюдений и моделирования. Разработан алгоритм определения элементов геохимического баланса водосборов. Охарактеризована направленность геохимических процессов в водных объектах Западной Сибири. Сформулированы ключевые аспекты выбора методов очистки сточных вод и рекультивации нарушенных земель. Показано, что строительство очистных сооружений целесообразно, если сброс неочищенных сточных вод составляет более 5 % от стока в замыкающем створе. Оптимальная структура очистки сточных вод предполагает широкое использование отстойников и сооружений биологической очистки с естественной аэрацией, которые рекомендуется совместить с естественными понижениями рельефа в долинах рек или внутри болот при условии инженерной защиты территории. Рекультивация может считаться эффективной, если разница между значениями элементов баланса до нарушения и после рекультивации не превышает 20 %.

### Ключевые слова:

Водный и геохимический баланс, речные водосборы, управление геохимическим балансом, Западная Сибирь, заболоченные территории.

### Введение

Улучшение состояния водных экосистем и эффективное долгосрочное водопользование возможны только в случае, когда есть понимание, как функционирует водная экосистема в целом, установлены основные факторы формирования ее эколого-геохимического состояния, количественно объективно оценен вклад каждого из факторов, имеются надежные и адекватные сложившимся природным и социально-экономическим условиям способы управления этими факторами. В настоящее время достигнуты значительные успехи в моделировании гидрологических и гидрохимических процессов [1–10], разработке теории управления водными ресурсами [2, 5, 11–13] и способов очистки сточных вод и утилизации образующихся отходов [14–17].

Однако имеется и большое количество нерешенных вопросов оценки состояния водных объектов, их долгосрочного прогноза, нормирования воздействий [11, 13, 18]. Так, в Российской Федерации (РФ) в целом разработана и внедрена система нормирования сбросов сточных вод (которая в основном сводится к оценке предельного воздействия при наихудших условиях разбавления стоков), но пока недостаточно проработаны вопросы оценки природной и антропо-

генной составляющих фоновых концентраций, нормирования воздействий на донные отложения, водный режим и ряд других. Также следует отметить, что технологии очистки сточных вод и рекультивации водных объектов весьма дороги и часто неэффективны относительно их стоимости, особенно с учетом того, что достижение ряда целевых показателей качества после строительства канализационных очистных сооружений (КОС) с использованием наилучших доступных технологий не всегда возможно.

Все это и определяет актуальность разработки методологии управления геохимическим состоянием природно-территориальных комплексов на основе составления и анализа системы уравнений водного и геохимического балансов для водных экосистем и их водосборов. Если методология и методика анализа теплового, водного и водохозяйственного балансов достаточно разработана [2–5, 19, 20], то вопросы составления и анализа геохимического баланса проработаны пока недостаточно. Конечно, известны общие подходы к составлению гидрохимического баланса, стока растворенных веществ и их генезиса [10, 21, 22], а в Министерстве природных ресурсов и экологии (МПР) России разработаны нормативные документы по расчёту химического стока рек, поступлению за-

грязняющих веществ (ЗВ) из диффузных источников, нормированию сбросов ЗВ на основе анализа упрощенного уравнения гидрохимического баланса [23, 24].

Но пока нет теоретически обоснованных и одновременно применимых на практике методов: оценки аккумуляции и переноса веществ в донных и пойменных отложениях и вторичного загрязнения вод от донных отложений в разные фазы водного режима (с учётом размыва и аккумуляции донных отложений, изменения стока взвешенных и влекомых наносов); оценки загрязнения водных объектов в результате загрязнения атмосферного воздуха; оценки образования и трансформации веществ в самих водных экосистемах при взаимодействии воды, органического вещества (ОВ), растворённых газов, подстилающих и водовмещающих горных пород, донных отложений и речных наносов; трансформации геохимического состояния при эволюции водных экосистем (например, изменение химического состава болотных вод по мере эвтрофикации озёр и образования сперва низинных, а потом переходных и верховых болот; изменение химического состава бессточных озёр при изменении климата и так далее); оценки изменения форм миграции химических элементов и адекватного их учета при оценке состояния водных экосистем; оценки природной и антропогенной составляющих химического состава вод (в настоящее время в РФ на практике все, что больше нормативов, считается результатом влияния хозяйственной деятельности без учета природных условий); оценки взаимосвязей между химическим составом подземных и поверхностных вод; оптимального выбора методов очистки с учётом особенностей окружающей среды, климата, хозяйственной деятельности и прогнозов их изменения; оптимального размещения производственных и непроизводственных объектов с учётом изменения гидрологических и геохимических характеристик (например, изменения площади водосбора  $F$  и водного режима при строительстве объектов инфраструктуры, активизация карстовых, термокарстовых и иных опасных процессов и т. д.); систематического вовлечения продуктов и отходов производства в геохимические циклы, характерные для конкретного региона.

Ряд указанных выше вопросов в той или иной мере рассматривается в работах В.И. Данилова-Данильяна, Т.И. Моисеенко, А.М. Никанорова, Б.Н. Рыженко, С.Л. Шварцева и многих других [1, 10–13, 22, 25], но удовлетворительные решения получены далеко не во всех случаях. И самое главное – отсутствует обоснованный и реально выполнимый общий алгоритм составления и анализа геохимического баланса водной экосистемы и её водосбора, принятия решений о целесообразности строительства очистных сооружений, систем инженерной защиты и мелиоративных систем, влияющих на эколого-геохимическое состояние территорий, определения способов очистки, использования донных отложений, торфов, загрязнённых грунтов, ила сточных вод и т. д. Соответственно, цель рассматриваемого исследования, выполненного в 2017–2020 гг. в Томском политехническом университете (ТПУ) и Томском филиале

Института нефтегазовой геологии и геофизики (ТФ ИНГГ) СО РАН – разработка методологии управления геохимическим балансом природно-антропогенных водных экосистем Западной Сибири в различных природных и антропогенных условиях на основе концепции трансформации антропогенных объектов в природно-антропогенные, а природно-антропогенных – в природные.

#### Объект и методика исследования

Западная Сибирь – огромный регион, границы которого разными авторами часто понимаются неодинаково. Далее под Западной Сибирью будет пониматься территория, соответствующая по естественно-историческому районированию бывшего СССР (приводится по [26]) физико-географическим странам: Западно-Сибирская низменность (полностью), Саяно-Алтайская горная страна (Алтайская провинция), Казахская складчатая страна (в границах водосбора р. Иртыша и его притоков), горная страна Урал (исток ряда притоков рек Оби и Иртыша). В пределах этой территории выделяются физико-географические страны с вертикальной зональностью и зоны тундры, лесотундры, лесов (тайги), лесостепи и степи. Ее большая часть совпадает с границами бассейна р. Оби (обычно дополнительно выделяют участки верхнего, среднего и нижнего течения Оби и отдельно – водосбор Иртыша; верхний – от истоков рек Катунь и Бий/Чулышмана до устья Томи; средний – от устья Томи (включая водосбор Томи) до устья Иртыша, нижний – ниже по течению от устья Иртыша), а на северо-западе – с бассейнами рек Таз, Пур и водосборами левобережных притоков р. Енисей.

Важной особенностью равнинной части этой территории являются интенсивная нефтегазодобыча, в процессе которой ежедневно сжигается 6–7 млрд м<sup>3</sup> попутного газа, размещается огромное количество отходов бурения и происходит не менее одной аварии с потерей в среднем 2 т нефти, причем общие потери углеводородов достигают 7–20 % от суммарной добычи [27, 28]. Другая важная особенность – исключительно высокая заболоченность водосборов с продолжающимся приростом торфяной залежи со скоростью примерно 1 мм/год [29, 30]. В водосборах Томи, Чулыма и на участке верхнего течения Оби в огромных количествах добывается и перерабатывается уголь, черные и цветные металлы, строительные материалы [28]. Все вместе это определяет современное эколого-геохимическое состояние поверхностных водных объектов в Западной Сибири, характеризующееся распространением пресных (как правило, гидрокарбонатных кальциевых) вод с высоким содержанием ОВ и продуктов их трансформации, часто превышающим предельно допустимые концентрации (ПДК) для водных объектов хозяйственно-питьевого и рыбохозяйственного назначения [31]. С учетом этого основными объектами исследования выбраны гидрологически изученные малые и средние реки [31–33], сток которых формируется в типичных для каждой из зон природных условиях и с разной степенью антропогенной нагрузки.

Методы охраны водных объектов (как и окружающей среды в целом) условно можно разделить на группы по: 1) соотношению времени воздействия и ожидаемых результатов – методы предупреждения экологических проблем (внедрение ресурсосберегающих технологий; управление инвестиционным проектом строительства от инженерных изысканий до разработки нормативов допустимого воздействия и правил эксплуатации; экологического просвещения; инженерных методов создания пограничных и охраняемых систем) и методы ликвидации или смягчения последствий экологических проблем (очистка сточных вод, мелиорация и рекультивация, дноуглубительные и иные аналогичные работы); 2) характеру воздействия – прямые, косвенные; 3) субъекту управления – методы государственного управления и управления на уровне природопользователя.

С учетом указанных выше концепций (от антропогенных объектов к природным) и классификации методов охраны водных объектов для достижения цели исследования рассмотрены следующие взаимосвязанные задачи: А) в части информационного обоснования управляющих воздействий: 1) разработка и обоснование методики составления и анализа геохимического баланса водного объекта и его водосбора; 2) выявление связей между элементами геохимического и водного балансов в различных природных зонах Сибири; 3) исследование направленности геохимических процессов в водных объектах и их водосборах при изменениях климата и хозяйственной деятельности; В) в части планирования воздействий, сочетающих методы предупреждения и ликвидации негативных последствий: 4) разработка и обоснование методики оптимального выбора методов очистки сточных вод с учётом природных условий и характера хозяйственной деятельности; 5) разработка и обоснование методики оптимального выбора способов восстановления нарушенных водных экосистем с учётом природных условий и характера хозяйственной деятельности.

При этом ключевой подход к их решению заключался в: 1) оценке природных тенденций и антропогенного влияния на водные объекты; 2) построении комплекса математических моделей; 3) разработке мероприятий, позволяющих минимизировать антропогенное влияние; 4) оценке эффективности проектируемых мероприятий путем сравнения результатов наблюдений и моделирования. Оценка адекватности моделей данным наблюдений проводилась с использованием критерия  $NSE$  [34] и корреляционного отношения  $R^2$  [8], статистический анализ включал проверку на случайность, однородность, соответствие теоретических и эмпирических кривых распределения вероятностей, корреляционный и регрессионный анализ. Методика статистического анализа изложена в [32]. Расчеты выполнены в пакете MS Excel.

Источники информации – опубликованные материалы государственного мониторинга поверхностных водных объектов и недр [35, 36], а также данные научных исследований, выполненных в ТПУ, ТФ ИНГГ СО РАН, АО «Томскгеомониторинг» в

1994–2020 гг. под руководством или при непосредственном участии авторов [31, 32, 37, 38]. Обобщение геохимических данных из разных источников выполнялось при условии выполнения работ в аккредитованных лабораториях и сопоставимости использованных методик пробоотбора (за основу приняты требования [4, 39]) и методов определения химического состава (более подробная информация изложена в [32, 40]).

#### Результаты исследования и их обсуждение

*Методика составления и анализа геохимического баланса водного объекта и его водосбора.* Анализ баланса вещества и энергии – основа для принятия управленческих решений в области использования и охраны водных ресурсов. Практическая реализация этого подхода заключается в составлении и анализе уравнений водного и геохимического баланса водного объекта, его водосбора или водохозяйственного участка [20, 24]. Первый этап – составление уравнения водного баланса с количественной оценкой источников водного питания. Решение этой задачи возможно на уровнях: 1) основных видов инженерных изысканий, проектирования КОС и мероприятий по мелиорации или рекультивации земель; 2) специальных видов инженерных изысканий и научных исследований.

На первом уровне рассматривается упрощенная математическая модель годового водного баланса с сосредоточенными параметрами в виде (мм/год):

$$H_r + H_{sn} - E_{wp} - E_{sp} - Y_s - Y_g \approx \Delta U, \quad (1)$$

где  $H_r$  и  $H_{sn}$  – атмосферные осадки в виде дождя и снега, мм/год;  $E_{wp}$  и  $E_{sp}$  – испарение с поверхности водосбора за холодный и теплый периоды;  $Y_s$  и  $Y_g$  – поверхностная и подземная составляющие суммарного водного стока  $Y$ ;  $\Delta U$  – изменение влагозапасов в водосборе. Основные допущения: 1) процессы формирования элементов водного баланса принимаются условно стационарными в рамках действующей версии нормативного документа по строительной климатологии [41]; 2) относительная погрешность определения элементов водного баланса при наличии измерений принимается 5 %, при использовании расчетных методов – 20 %; 3) величина  $\Delta U$  принимается для заболоченных равнинных территорий лесной (таежной) зоны Западной Сибири с заболоченностью водосбора более 20 % – 1 мм/год (средняя скорость вертикального прироста торфяной залежи [29]), а на прочих территориях – 0 мм/год.

Построение математической модели может быть проведено по следующему алгоритму: 1) определяется категория реки (большая, средняя, малая) и гидрографические характеристики реки и в ее водосбора с учетом требований [39, 42]; 2) согласно [19, 43], определяется среднееголетнее значение слоя годового водного стока  $Y_y$  (мм/год) для геометрического центра водосбора; если нет наблюдений за стоком, отсутствуют карты изолиний стока или однородных районов, то при наличии данных о среднееголетнем атмосферном увлажнении за год  $H_y$  и годовой сумме положительных температур приземных слоев

атмосферного воздуха  $\Sigma T_{>0}$  возможно применение следующих уравнений [44, 45]:

$$Y_y \approx a_0 \cdot \eta^{a_1} \cdot (f_{fr} + 1)^{a_2} \cdot (f_{mr} + 1)^{a_3} \cdot H_y \times \exp\left(-\frac{E_{lim}}{H_y}\right) \cdot \left(1 + \frac{Cv_H^2 \cdot E_y^2}{2 \cdot H_y^2}\right), \quad (2)$$

где  $E_{lim}$  – испаряемость (мм/год);  $f_{fr}$  – лесистость водосбора, %;  $f_{mr}$  – заболоченность водосбора, %;  $Cv_H$  – коэффициент вариации слоя атмосферного увлажнения;  $\eta$  – функция средней высоты водосбора  $Z_b$  (если  $Z_b > 500$ , то  $\eta = Z_b - 500$ , иначе  $\eta = 1$ );  $a_0, a_1, a_2$  – эмпирические коэффициенты; 3) согласно [19, 43], определяются границы сезонов гидрологического года, внутригодовое распределение водного стока и рассчитывается суммарный годовой подземный сток как сумма значений месячного подземного стока; месячный слой подземного стока  $Y_{g,i}$  за  $i$ -й месяц в среднем за многолетний период определяется приближенно по условию (3), а при наличии данных совместных наблюдений за расходами воды (в реке), уровнями речных и подземных вод – по регрессионным зависимостям вида (4), по структуре аналогичным уравнению Дюпюна с учетом функции инфильтрации:

$$Y_{g,i} \approx \begin{cases} Y_{g,we} + (Y_{g,wb} - Y_{g,we}) \cdot \frac{(i - we)}{(wb - we)}, & i \in [wb; we]; \\ Y_i, & i \in [wb; we], \end{cases} \quad (3)$$

$$Y_{g,i} = a_4 + a_5 \cdot (Z_{g,i}^2 - Z_{r,i}^2) + a_6 \cdot Z_{g,i}, \quad (4)$$

где  $Y_i$  – слой общего речного стока (мм/мес);  $wb$  и  $we$  – начало и конец зимнего периода согласно [43];  $Y_{wb}$  и  $Y_{we}$  – слой общего речного стока в начале и конце зимнего периода (мм/мес);  $Z_{g,i}$  и  $Z_{r,i}$  – среднемесячные значения уровней подземных и речных вод [6, 32]; поверхностная составляющая годового стока определяется как разница суммарного и подземного стока:

$$Y_{s,y} = Y_y - Y_{g,y}; \quad (5)$$

4) с учетом требований [20, 41] принимаются данные об атмосферных осадках, полученные: 4.1) для одной метеостанции в пределах одной природной зоны и водосбора малой или средней реки – для ближайшей метеостанции, расположенной не далее 100 км от геометрического центра водосбора; сумма осадков в среднем за год условно однородного многолетнего периода  $H_{IV-III}$  (слой, мм/год) определяется как сумма осадков за теплый  $H_{IV-XI} = H_r$  и холодный  $H_{XI-III} = H_w$  периоды; влагозапасы в снежном покрове  $H_{sn}$  принимаются равными  $H_{XI-III}$  и величине годовой водоотдачи из снежного покрова  $H_{sm}$ ; по этому же источнику принимаются среднемесячные значения температуры приземных слоев атмосферного воздуха и парциального давления водяного пара; 4.2) для двух и более метеостанций в пределах двух и более природных зон и водосбора средней или большой реки – как средневзвешенное для площадей водосбора; 5) при условии размещения исследуемого водосбора в лесной зоне и использовании климатических данных, полученных в поле, в значения суммарных влагозапа-

сов в снежном покрове по водосбору  $H_{sn}$  вводятся соответствующие поправки; 6) рассчитывается испарение с поверхности суши за  $i$ -й месяц со снежного покрова  $E_{wp,i}$  (мм/мес) в холодный период по формуле П.П. Кузьмина:

$$E_{wp,i} = 0,34 \cdot d_{a,i} \cdot N_i, \quad (6)$$

где  $d_{a,i}$  – среднемесячный дефицит влажности атмосферного воздуха (гПа);  $N_i$  – количество дней в месяце; суммарное испарение за холодный период  $E_{wp}$  определяется как сумма месячных значений, вычисленных по формуле (6); при отсутствии данных об измеренных месячных значениях  $d_{a,i}$  они рассчитываются согласно [5, 46]; 7) рассчитывается испарение с поверхности суши за теплый период  $E_{sp,y}$  (мм/год) по уравнению (1); если по каким-либо объективным причинам, указанным в [19], не удалось определить слой водного стока, то определяется: 7.1) годовое испарение с поверхности водосбора  $E_y$ ; 7.2) испарение за теплый период как  $E_{sp,y} = E_y - E_{wp,y}$ ; 7.2) годовой водный сток – по уравнению (1); остальные величины определяются так же, как указано выше (3)–(6). На втором уровне возможны различные варианты расчета [3, 6, 7, 9, 19, 45].

Уравнения геохимического баланса составляются на основе уравнения водного баланса для взвешенных и растворенных веществ с целью оценки величины стока и аккумуляции вещества, определяющих их процессов, пространственно-временных закономерностей изменения в замыкающем створе и в пределах исследуемого водосбора. Для расчета элементов геохимического баланса предварительно проводится районирование территории согласно [39] с выделением: 1) типа (по растительности), класса (по преобладающим почвам) и рода (по геоморфологическим условиям; наиболее простой случай – водораздел и долина ландшафтов); 2) площади водосбора в истоках реки без выраженной русловой сети  $F_U$ ; 3) доли участков совмещения речной сети и тектонических нарушений. В пределах каждого ландшафта проводится опробование коренных отложений, почв, растительности, снежного покрова, жидких атмосферных осадков, подземных и поверхностных вод, донных отложений поверхностных водных объектов с учетом рекомендаций [39]. При этом пробы подземных и поверхностных вод, донных отложений также отбираются на перспективных с точки зрения выявления геохимических аномалий участках, в том числе на: 1) территории водосбора в истоках реки без выраженной русловой сети и на территории с хорошо выраженной речной сетью; 2) участках максимальной сопряженности речной сети и тектонических нарушений с оценкой показателя  $\psi = P(rf) - P(r) \cdot P(f)$ , где  $P(r)$  – густота речной сети – отношение суммарной длины водотоков к площади водосбора  $F$ ,  $P(f)$  – отношение суммарной длины тектонических нарушений в пределах водосбора к его площади,  $P(rf)$  – отношение суммарной длины водотоков, совпадающих с тектоническими нарушениями (с учетом погрешности определения по карте) к площади водосбора; 3) малоприточных участках с относительно резким измене-

нием уклонов водной поверхности (выходы рек с горных районов на предгорную равнину, обширные участки с русловой многорукавностью). На указанных участках проводится отбор не менее 2–3 проб поверхностных вод, 2–3 проб донных отложений, 2–3 проб подземных вод. При проведении поисковых работ оценка геохимического состояния компонентов окружающей среды может быть выполнена только на указанных выше перспективных участках, что позволяет сократить затраты, по сравнению с используемой в настоящее время методикой, примерно на 20 % [47].

Величина выноса веществ  $G$  (взвешенных или растворенных) рассчитывалась путем умножения срочных значений концентрации вещества (в поверхностных водах –  $C_{Qs}$ , в подземных –  $C_{Qg}$ ) на расход воды (поверхностной составляющей –  $Q_s$ , подземной –  $Q_g$ ) и последующего определения статистических параметров [23], при отсутствии данных сопряженных наблюдений – как произведение средних значений концентрации вещества и расхода воды (объема атмосферных осадков). При этом уравнение геохимического баланса имеет следующий вид (т/год):

$$G_{Xr} + G_{Xs} - G_{Qs} - G_{Qg} \pm A \approx \Delta G, \quad (7)$$

где  $G_{Xr} \approx F \cdot C_r \cdot (H_r - E_{sp})$  и  $G_{Xs} \approx F \cdot C_{sn} \cdot (H_{sm} - E_{wp})$  – поступление исследуемого вещества с дождевыми и снеговыми осадками за вычетом испарения;  $F$  – площадь водосбора;  $C_r$  и  $C_{sn}$  – концентрации вещества в дождевых и снеготалых водах;  $G_{Qs}$  и  $G_{Qg}$  – вынос вещества с поверхностными и подземными водами;  $A$  – антропогенное влияние за счет сосредоточенного ( $A_{wsr}$ ) и диффузного ( $A_{wsd}$ ) поступления сточных вод за вычетом водозабора  $A_{wd}$ ;  $\Delta G$  – разница между приходами и выносом вещества из водосбора с учетом невязки. На основе анализа полученного уравнения геохимического баланса может быть проведена дифференциация веществ по генезису посредством оценки величины  $\varepsilon$  по уравнению (8) с учетом погрешностей определения по измерениям (5 %) и расчетом (20 %): менее 5 % – природного происхождения; больше или равно 5 % и меньше или равно 20 % – преимущественно природного происхождения; более 20 % – природно-антропогенного происхождения [32]:

$$\varepsilon = 100 \cdot (A_{wsr} + A_{wsd}) / (G_{Qs} + G_{Qg}). \quad (8)$$

В качестве примера рассмотрим среднепогодный геохимический баланс р. Ушайки в г. Томске (элемент речной системы: Ушайка–Томь–Обь; таблица). Эта река протекает по территориям Томского района и г. Томска – административного центра Томской области. Росгидромет, природоохранные органы Томской области, АО «Томскгеомониторинг» и ТПУ проводят наблюдения за качеством воды этой реки в устье ( $F=744 \text{ км}^2$ ), а ранее специалистами Росгидромета выполнялись измерения расходов воды на границе г. Томска в п. Степановки ( $F=713 \text{ км}^2$ ). Среднепогодный расход воды  $Q_{a,Cm}$  за 1975–1989 гг. в этом створе составил  $4,35 \text{ м}^3/\text{с}$ . Пересчетом по модулю стока получено среднее годовое суммарное значение в устье  $Q_{a,y}=4,54 \text{ м}^3/\text{с}$  (192,4 мм) и среднее (за год) значение подземной составляющей  $Q_{a,y}=0,7 \text{ м}^3/\text{с}$ . Ат-

мосферные осадки в Томске, согласно [41], составляют: в холодный период – 379 мм; в теплый – 180 мм. Испарение со снежного покрова по уравнению (6) составляет 22,7 мм.

Средний объем сброса сточных вод принят в размере  $10,301 \text{ млн м}^3$  (13,8 мм), объем забора воды (из реки без учета забора подземных вод из палеогенового горизонта) –  $0,322 \text{ млн м}^3$  (0,4 мм). Соответственно, испарение за год составляет 380 мм, а за теплый период – 357,3 мм. Масса и состав сброса ЗВ приняты по данным, приведенным в обзорах по экологическому состоянию [37], при этом масса ЗВ в забранной речной воде определена пропорционально поверхностной (84,6 %) и подземной (15,4 %) составляющей стока. Химический состав атмосферных осадков принят по [32]. Диффузные источники определены исходя из плотности населения (человек/км<sup>2</sup>) в г. Томске – 3034,8, в Томском районе – 8,87 (общее население в водосборе Ушайки – 100403 человека) и удельных показателей загрязнения согласно [21, 48]. Расчет диффузного поступления углерода  $OB_{C_{орг}}$  и сухого остатка (СО) проведен по региональным зависимостям от биохимического потребления кислорода (БПК<sub>5</sub>) и содержания хлоридов:  $C_{орг}=0,78 \cdot БПК_5 + 11,33$ ;  $R^2=0,89$ ;  $CO=1,66 \cdot Cl + 433,00$ ;  $R^2=0,96$ , где  $R^2$  – квадрат корреляционного отношения.

Анализ полученных результатов (таблица) позволяет предположить, что рассмотренные вещества по генезису могут быть разделены следующим образом: природно-антропогенные – растворенные соли по сухому остатку, хлориды, азот аммонийный, фосфаты, ОВ; преимущественно природные – сульфаты, нитриты, Fe, углеводороды; преимущественно природные – нитраты. Очевидно, что в р. Ушайку поступает большое количество взвешенных веществ и растворенных солей (их поступление может быть связано с противогололедной обработкой дорог), ОВ и продуктов их разложения, причем в основном неорганизованным способом с территории города. Следовательно, существует острая потребность в сборе и очистке снеготалого и дождевого стока с городской территории от взвешенных веществ, ОВ и продуктов их трансформации.

Связи между элементами геохимического и теплового балансов в различных природных зонах. В рамках выявления указанных взаимосвязей принят ряд допущений. Во-первых, предположим, что изменение концентрации вещества  $C$  в воде в зависимости от расхода воды  $Q$  в первом приближении описывается уравнением:

$$\frac{dC}{dQ} = \frac{k_C}{k_Q} \cdot \frac{C}{Q}, \quad (9)$$

где  $k_C$  и  $k_Q$  – значения удельной скорости изменения концентрации вещества и расхода воды соответственно. Если предположить, что отношение  $k_C/k_Q$  представлено в виде нелинейной функции (10), то результат интегрирования (9) – уравнение (11):

$$\frac{k_C}{k_Q} = a_7 + a_8 \cdot \left(\frac{Q}{Q_a}\right)^{a_9}, \quad (10)$$

$$\frac{c}{C_a} = \left(\frac{Q}{Q_a}\right)^{a_7} \cdot \exp\left(\frac{a_8}{a_9} \cdot \left(\left(\frac{Q}{Q_a}\right)^{a_9} - 1\right)\right), \quad (11)$$

где  $a_7, a_8, a_9$  – эмпирические коэффициенты;  $C/C_a$  и  $Q/Q_a$  – модульные коэффициенты концентрации и расхода воды;  $C_a$  и  $Q_a$  – математическое ожидание концентрации вещества и расхода воды, причем величина  $C_a$  аппроксимируется средним геометрическим значением  $C_g$  и рассматривается как фоновое значение  $C_b$  (геохимический фон), которое отражает условно равновесное состояние системы «вода–

порода» в статистически однородных условиях  $C_{Eq}$ . Геохимический фон тем выше, чем: 1) меньше интенсивность водообмена; 2) больше относительная площадь водосбора без выраженной русловой сети ( $F_U/F$ ); 3) теснее связь между размещением речной сети и тектонических нарушений (больше величина  $P(r.f) - P(r) \cdot P(f)$ ). Стандартное отклонение  $\sigma(C)$  возрастает при увеличении геохимического фона  $C_a$  и коэффициента вариации расходов воды  $Cv(Q)$ :

$$\sigma(C) \approx |a_7 + a_8| \cdot C_a \cdot Cv(Q). \quad (12)$$

**Таблица.** Среднегодовалый геохимический баланс водосбора р. Ушайки

**Table.** Average long-term geochemical balance of the river Ushayka basin

Показатель Indicator	$G_{Xr}$	$G_{Xs}$	$G_{Qs}$	$G_{Qg}$	$A_{wsr}$	$A_{wsd}$	$A_{wd}$	$\Delta G$	$\varepsilon, \%$
	т/год/tons/year								
Сухой остаток Total dissolved substances	821,8	2703,4	32523,1	12691,0	1118,2	16415,7	260,2	-24415,2	38,8
Хлориды/Chlorides	51,7	280,9	1395,0	695,4	132,4	329,8	11,2	-1306,8	22,1
Сульфаты/Sulphates	129,2	269,2	2654,2	509,9	56,7	161,2	21,2	-2569,0	6,9
Нитраты/Nitrates	0,2	114,7	342,0	383,9	25,8	–	2,7	-588,0	3,6
Нитриты/Nitrites	15,5	3,5	20,6	3,8	1,5	–	0,2	-4,0	6,2
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	15,4	67,4	200,6	28,8	15,6	293,2	1,6	160,6	134,6
P	0,7	5,3	7,9	6,4	1,3	40,3	0,1	33,3	290,6
Fe	1,8	10,5	57,5	4,7	6,0	–	0,5	-44,5	9,6
C <sub>орг.</sub> /Carbon of organic substances	24,2	175,5	975,1	240,4	16,3	1915,9	7,8	908,6	159,0
Нефтепродукты/Mineral oil	0,8	5,9	47,3	9,9	6,1	–	0,4	-44,9	10,6

Соответственно, на основе анализа структуры уравнения (11) можно предположить, что основные особенности химического состава вод формируются на стадиях формирования склонового, подповерхностного и подземного стока (на стадии руслового стока изменения химического состава вод также происходят, но уже в меньшей степени). Кроме того, изменчивость химического состава вод и повышенные концентрации ряда веществ будут чаще наблюдаться в условиях многолетней и внутригодовой изменчивости стока [33]. В свою очередь, с учетом уравнения (2), водный сток нелинейно зависит от климатических условий. В общем случае ожидается увеличение его изменчивости при продолжении наблюдаемого смещения границ гидрологических сезонов и некотором увеличении средней температуры атмосферного воздуха [45].

Во-вторых, предположим, что для совместного описания сорбции, растворения и осаждения в водном объекте может быть использовано уравнение (13):

$$\frac{dC}{dt} = \varphi_{ds} + \varphi_{srb} = k_{p0} \cdot (k_{p1} \cdot C_{Eq} - C) + k_s(S - k_c \cdot C) = \varphi_0 - k_r \cdot C, \quad (13)$$

$$k_r = k_{p0} + k_s \cdot k_m \cdot (S_m - S), \quad (14)$$

где  $t$  – координата времени;  $\varphi_{ds}$  и  $\varphi_{srb}$  – функции, описывающие процессы растворения–осаждения и сорбции–десорбции;  $\varphi_0$  – функция, слабо зависящая от времени и расхода воды  $Q$  в момент времени  $t$ ;  $C$  и  $S$  – концентрация исследуемого вещества в речных (болотных, подземных) водах и донных отложениях (водовмещающих минеральных грунтах и торфах);  $C_{Eq}$  – концентрация вещества в речных водах, соответствующая локальному равновесию в системе «вода–порода» и аппроксимируемая средним геометрическим

$C_g$  с учетом поправки на отклонение от равновесия из-за колебаний водности;  $S_m$  – максимальная сорбционная способность донных отложений;  $k_{p0}, k_{p1}, k_s, k_m$  – эмпирические коэффициенты. Тогда при допущении  $k_{rQ} = \frac{k_r}{k_Q} \approx const$  решением (13) является уравнение (15), описывающее отклонение некоторого устойчивого состояния при среднегодовом расходе воды  $Q_a$ :

$$C = C_e + (C_0 - C_e) \left(\frac{Q}{Q_a}\right)^{-k_{rQ}}, \quad (15)$$

$$C_e = \frac{k_s S + k_{p0} k_{p1} C_{Eq}}{k_r} = \frac{S + \frac{k_{p0}}{k_s} k_{p1} C_{Eq}}{\frac{k_{p0}}{k_s} + k_m (S_m - S)}, \quad (16)$$

$$S_e = \frac{k_s k_m S_m C + k_{p0} C - k_{p0} k_{p1} C_{Eq}}{k_s + k_s k_m C} = \frac{k_m S_m C + \frac{k_{p0}}{k_s} (C - k_{p1} C_{Eq})}{1 + k_m C}, \quad (17)$$

$$S_m = S_{m0} \cdot pH^{k_{pH}} \cdot \Pi(C_j^{k_j}), \quad (18)$$

где  $C_0$  – концентрация вещества в начальный момент времени, принимаемая равной  $C_g$ ;  $C_j$  – концентрация  $j$ -го вещества, влияющего на величину максимальной сорбционной способности  $S_m$ ;  $S_{m0}, k_j, k_{pH}$  – эмпирические коэффициенты; вид функции (18) принят с учетом [49];  $C_e$  и  $S_e$  – решения (13) при  $\frac{dC}{dt} = 0$  [50]. Близкие по виду решения могут быть получены и при упрощении стационарного уравнения диффузии с источниками вещества вида (13).

В результате анализа структуры модели (14)–(18) и результатов моделирования можно сделать вывод о том, что в целом уровень содержания вещества в речных, подземных и болотных водах определяется наличием доступного для взаимодействия вещества, сорбционной способности наносов, подстилающих и водовмещающих отложений, условно равновесной концентрацией вещества в одной среде, а также удельными скоростями растворения–осаждения и сорбции–десорбции в условиях рассматриваемого природно-территориального комплекса [50]. Практическое использование указанных выше связей между элементами водного геохимического балансов может заключаться в интерполяции пропусков и аппроксимации рядов геохимических наблюдений, а также в подборе объектов-аналогов, выбор которых проводится с учетом структуры уравнений (2), (11)–(18). В частности, у исследуемого объекта и аналога должны быть сопоставимы: при определении характеристик водного стока – лесистость, заболоченность, средняя высота водосбора, средние многолетние значения температура воздуха, парциального давления водяного пара и атмосферных осадков; при определении геохимических характеристик – норма и коэффициент вариации водного стока, минеральный и гранулометрический состав донных отложений, тип преобладающих русловых процессов, заболоченность водосбора.

*Количественные оценки направленности геохимических процессов и форм миграции химических элементов в водных объектах и их водосборах при изменениях климата и хозяйственной деятельности.* В связи с вводом в эксплуатацию в конце 1950-х гг. Новосибирского гидроузла произошло определенное снижение максимальных и увеличением минимальных уровней и расходов воды р. Оби на участке до устья р. Томи (значительная зарегулированность стока также характерна для р. Иртыша). На участках среднего и нижнего течения Оби влияние регулирования стока постепенно снижается. В целом годовой сток большинства притоков р. Оби в течение XX в. оставался статистически постоянным, но в ряде случаев отмечено некоторое увеличение стока зимней межени и смещение сроков наступления весеннего половодья на более ранние даты [32, 37].

В условиях избыточного увлажнения это приводит к опережающему увеличению влагозапасов водосборов относительно роста подземного стока и, как следствие, повышению уровней подземных вод верхней гидродинамической зоны в таежной зоне (на территории Томской области среднее значение такого повышения за период после 1994 г., по сравнению с периодом с 1960-х гг., составляет 0,31 м). В свою очередь, это может вызвать дополнительное увеличение подземной составляющей речного стока в условиях нисходящего режима взаимодействия подземных и поверхностных вод. По результатам математического моделирования также сделан вывод о том, что после 1994 г. на участке среднего течения р. Оби также произошло уменьшение льдистости почвогрунтов в конце зимнего периода, увеличение их влажности в

апреле–мае, увеличение условно жидких атмосферных осадков и водоотдачи в апреле [45]. С учетом погрешностей определения гидрохимических показателей, относительного малого количества ежегодно отбираемых проб и колебаний сроков пробоотбора относительно фаз водного режима (как и собственно изменений этих границ) анализ многолетних изменений химического состава речных и подземных вод только по данным наблюдений мало эффективен.

Более объективными представляются результаты совместного анализа материалов наблюдений и связей между гидрологическими и геохимическими показателями. Использование данного подхода позволило сделать следующие выводы:

- 1) в течение периода с 1970 г. наблюдаются статистически неизменные среднемноголетние значения минерализации вод основных притоков р. Оби, но в долгосрочной перспективе, вследствие увеличения подземной составляющей (с более высокой минерализацией), возможно их некоторое увеличение; в таежной зоне в период с конца 1970-х гг. выявлено уменьшение дисперсии содержаний главных ионов в подземных водах верхней гидродинамической зоны в долинах больших рек и увеличение концентраций макрокомпонентов и их дисперсии – на участках с замедленным водообменом и интенсивным заболачиванием водосборов; статистически значимые однонаправленные изменения химического состава болотных вод не отмечены, но установлены различия внутриболотных экосистем в реакции на колебания атмосферного увлажнения [32, 40, 51];
- 2) в целом геохимический фон рек, болот и подземных вод, рассчитанный и как среднее геометрическое, и по [52], характеризуется превышением ПДК по величине ПО, бихроматной окисляемости (БО), рН, содержаниям Fe, Mn, Al, Cu,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ , фенолов, нефтепродуктов хотя бы в одну из фаз водного режима в годы разной водности с вероятностью более 25 % [31, 32, 37]; нарушения геохимического фона на рассматриваемой территории неизбежны вследствие значительных внутригодовых изменений водного стока, определяющих в соответствии с (11), (12) значительный разброс и геохимических показателей;
- 3) с учетом структуры уравнения (2) и при сохранении тенденций к потеплению (с учетом уравнений (2), (11), (12)) вероятно увеличение дисперсии содержаний главных ионов и ряда микроэлементов, что согласуется с выводами, полученными для других регионов мира [53]; уровень содержания ОВ вследствие сильной заболоченности региона весьма высок в настоящее время и сохранится в долгосрочной перспективе с учетом прогрессирующего заболачивания водосборов многих притоков р. Оби (болота в долинах рек распространены не только в таежной зоне, но в лесостепной и горных районах);
- 4) влияние антропогенных факторов на эколого-геохимическое состояние речных, подземных и болотных вод в Западной Сибири проявляется в

- основном в формировании или увеличении интенсивности стока органических микропримесей типично антропогенного происхождения (например, алканы с четным количеством атомов углерода, полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), хлорорганические соединения), легко-окисляемых ОБ по величине БПК<sub>5</sub>, неорганических соединений азота (в основном  $\text{NH}_4^+$  и  $\text{NO}_2^-$ ; высокие концентрации  $\text{NO}_3^-$  встречаются очень редко, в основном в местах несанкционированного размещения отходов или при нарушениях условий хранения химикатов) и связана, прежде всего, с выбросами ЗВ в атмосферный воздух и их диффузным поступлением с седиментных и производственных территорий; содержания  $\text{Cl}^-$  обычно значительно меньше ПДК, но их значения в 2–3 раза больше фоновых с большой вероятностью свидетельствуют о загрязнении вод [31, 32, 54]; антропогенное воздействие проявляется также в дополнительной аккумуляции в водных объектах взвешенных, коллоидных и растворенных форм некоторых металлов, которые в условиях отсутствия антропогенной нагрузки с большей вероятностью образовали бы минеральные формы [40];
- 5) уровень содержания вещества в поверхностных и подземных водах в целом определяется наличием доступного для взаимодействия вещества, сорбционной способностью подстилающих и водовмещающих отложений, условно равновесной концентрацией вещества в одной среде, а также удельными скоростями растворения–осаждения и сорбции–десорбции, характерных для рассматриваемых природно-территориальных комплексов; рост концентраций растворенных неорганических веществ в водах больших и средних рек ограничен относительно низкой растворимостью ряда соединений макрокомпонентов и сорбцией на частицах наносов и донных отложений [38, 50, 55];
  - 6) связи между химическим составом вод, подстилающих и водовмещающих грунтов существенно нелинейны и зависят от абсолютных и относительных характеристик интенсивности водообмена, заболоченности водосборных территорий и pH водной среды; абсолютное и относительное приращение концентраций в воде обычно меньше, чем соответствующее приращение концентраций в грунтах, что в целом обеспечивает устойчивость химического состава вод при малых и средних антропогенных нагрузках на водные объекты; высокие концентрации ряда химических элементов в воде могут быть связаны не только с наличием природных геохимических аномалий или загрязнением, но и с приближением фактической сорбции к максимально возможным значениям [50];
  - 7) распределение ряда химических элементов в водных и кислотных вытяжках из торфов, органоминеральных отложений (ОМО) и минерального грунта верхового болота (восточный участок Васюганского болота) в целом удовлетворительно объясняется функционированием в торфяной залежи двух природных барьеров, приуроченных к относительно резкому изменению фильтрационных свойств грунтов: верхнего (согласно терминологии [1] – окислительного, восстановительного, сульфидного и сорбционного гидроксидного), расположенного примерно в верхней части инертного горизонта; нижнего – щелочного карбонатного и гидrolитического, сорбционного гидроксидного, глинистого и карбонатного – в придонных слоях залежи; важную роль в формировании указанных барьеров играет болотная микрофлора [40];
  - 8) наиболее вероятный механизм перераспределения и трансформации вещества в речном водосборе в условиях Северной Евразии выглядит следующим образом: 8.1) при выпадении дождей и таянии снега активизируются водно-эрозионные процессы, в результате которых на спаде паводков и половодья на поверхности водосбора и в русловой сети аккумулируется значительное количество твердого вещества; 8.2) вследствие механических разрушений увеличивается суммарная площадь твердых частиц и, следовательно, площадь контакта с атмосферным воздухом, речными водами и верховодкой; соответственно, усиливается выщелачивание и растворение твердых частиц; 8.3) дополнительное выщелачивание и растворение твердых частиц может быть связано с поступлением ОБ в речную сеть с поверхностным стоком; 8.4) при увеличении температур атмосферного воздуха активизируются процессы фотосинтеза, сопряженные с временной аккумуляцией соединений C, P, N, Si, причем важным источником вещества являются продукты водно-эрозионных процессов предыдущих этапов геохимического цикла; 8.5) при отмирании наземных и водных растений часть аккумулированных ранее веществ участвует в формировании почвенного покрова, часть выносится с водным стоком или поступает в атмосферный воздух; 8.6) и в том, и в другом случае эти вещества с большой вероятностью мигрируют в форме, отличающейся от исходной; в некоторых случаях происходит концентрирование веществ, например, осаждение гидроксидов  $\text{Fe}^{3+}$ , гуматов Ca, Mg и ряда других металлов, фосфатов редкоземельных элементов [56].
- Методика оптимального выбора методов очистки сточных вод с учётом природных условий и характера хозяйственной деятельности.* С учетом определений [57], одной из важнейших составляющих охраны вод является очистка сточных вод/стоков – обработка сточных вод с целью разрушения или удаления из них определенных веществ. Очистка сточных вод предполагает использование методов механической, химической и биологической очистки и обеззараживания очищенных сточных вод. Согласно [57, 58], под механической очисткой понимаются технологические процессы очистки сточных вод механическими и физическими методами, под химической очисткой – процессы с применением реагентов, под биологической очисткой – процессы, основанные на способности биологических организмов разлагать ЗВ, под обеззараживанием сточных вод – обработка сточных

вод с целью удаления из них патогенных и санитарно-показательных микроорганизмов.

К сооружениям механической очистки, позволяющим выделить из стоков до 60 % взвешенных веществ, относятся решетки, сита, песколовки, отстойники и фильтры различных конструкций. Химическая очистка сточных вод включает нейтрализацию, окисление, восстановление, реагентные методы выделения ЗВ в виде малорастворимых и нерастворимых соединений. В ряде случаев выделяют физико-химические методы, применяемые при обработке производственных стоков и включающие в себя коагуляцию и флокуляцию, сорбцию, ионный обмен, экстракцию, различные электрохимические методы, мембранные методы (обратный осмос, ультрафильтрация). Биологическая очистка основана на функционировании биоты, которая минерализует и трансформирует растворенные ОВ, являющиеся источником их питания. Обычно сооружения биологической очистки разделяют на две группы – с искусственной и естественной (или близкой к ней) аэрацией. В последнем случае достаточно широкое распространение получили биологические пруды с высшей водной растительностью и поля орошения и фильтрации, в том числе поля орошения на торфяниках. Дезинфекция сточных вод является заключительным этапом их обработки перед сбросом в водный объект, но не последним в процессе в части охраны окружающей среды, поскольку требуется утилизация и размещение осадка (отходов производства), образующегося в процессе очистки и дезинфекции стоков [15–17, 48]. Выбор методов очистки сточных вод проводится с учетом: 1) характера и интенсивности источников поступления ЗВ в водные объекты; 2) возможности использования очищенных стоков и отходов очистки; 3) природных условий функционирования КОС; 4) возможности достижения в приемнике очищенных стоков установленных нормативов [14, 24, 48].

Ранее проведенный анализ работы КОС на территории Томской области [37] показал, что большая их часть (86 %) не обеспечивает достижение нормативных показателей качества сточных вод, причем наименьшая эффективность очистки наблюдается для: 1) соединений N и P; 2) Si, Fe и ОВ. Это свидетельствует о необходимости дополнительной доочистки стоков от продуктов разложения ОВ и учета природной специфики рассматриваемой территории, для которой характерна чрезвычайно высокая заболоченность, а следовательно, и высокое содержание ОВ природного генезиса,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ , Si, соединений Fe, Mn и ряда других элементов. Также можно сделать вывод о том, что в настоящее время тратятся непропорционально большие (относительно достигаемых результатов) средства на очистку хозяйственно-бытовых сточных вод от веществ, дефицит которых является фактором, ограничивающим развитие лесных фитоценозов на значительной части территории Томской области и ряда других регионов. Следовательно, в некоторых случаях целесообразно (с учетом прогрессирующей заболоченности) рассматривать возможность подачи очищенных сточных вод в боло-

та, использования болот или их участков для очистки хозяйственно-бытовых и ливневых сточных вод малых населённых пунктов и вахтовых посёлков, использования торфов как сорбентов и/или среды для функционирования микробиоценоза в целях очистки стоков от ОВ [59–61]. Аналогичные выводы можно сделать и по другим территориям Западной Сибири с учетом широкого распространения болот в речных долинах даже в лесостепной зоне.

Но при этом необходимо отметить, что результирующая оценка эффективности очистки стоков выполняется на основе условия:

$$\sum_{\text{ПДК}_j} \frac{C_{k,j}}{\text{ПДК}_j} = \sum_{\text{ПДК}_j} \frac{C_{b,j}}{\text{ПДК}_j} + \sum \frac{(C_{ws,j} - C_{b,j})}{n \cdot \text{ПДК}_j} \leq 1, \quad (19)$$

$$C_{k,j} = C_{b,j} + \frac{(C_{ws,j} - C_{b,j})}{n(k)}, \quad (20)$$

$$n(k) = \frac{C_{ws,j} - C_{b,j}}{C_{k,j} - C_{b,j}}, \quad (21)$$

где  $C_{k,j}$ ,  $\text{ПДК}_j$ ,  $C_{b,j}$ ,  $C_{ws,j}$  – концентрации  $j$ -го вещества фактическая (в контрольном створе), предельно допустимая, фоновая (в фоновом створе) и в очищенных сточных водах;  $n(k)$  – кратность разбавления в контрольном створе на расстоянии  $k$  от выпуска сточных вод. Очевидно, что при фоновой концентрации  $C_{b,j} \geq \text{ПДК}_j$  любые мероприятия не позволяют выполнить требование (19), (20), расчеты  $n$  (21) фактически ограничены случаем  $C_{k,j} > C_{b,j}$ , а при  $C_{ws,j} < C_{b,j}$  возможны случаи, когда отведение нормативно-чистых вод будет приводить к нарушению фонового состояния водного объекта, например, «промывке» болота, что неизбежно приведет к его разрушению и, следовательно, нарушению требований [62, ст. 57, п. 2]. Кроме того, даже при  $C_{ws,j} > C_{b,j}$ ,  $C_{k,j} > C_{b,j}$ ,  $C_{b,j} < \text{ПДК}_j$  условие (19) для  $M$  веществ выполняется только, если концентрация каждого вещества примерно в  $M$  раз меньше ПДК, что с учетом чувствительности используемых методов анализа для всего перечня нормируемых показателей фактически не достижимо. Принимая во внимание указанные ограничения, часть из которых может быть решена только на законодательном уровне, представляются целесообразными следующие рекомендации по проектированию КОС в Западной Сибири.

1. На первом этапе выполняется составление уравнений водного и геохимического балансов. При отсутствии данных наблюдений проводится анализ геохимического баланса водосбора объекта-аналога, выбранного с учетом структуры уравнений (2), (11), (12), (14)–(18). Если поступление неочищенных сточных вод менее 5 % стока, то строительство КОС нецелесообразно (если, конечно, речь не идет о сбросе микроорганизмов и токсичных веществ 1–2 класса опасности), но необходимо соблюдение требований [62] к водоохраным зонам (ВЗ) водного объекта – приемника стоков. В последнем случае процедура выделения ВЗ прямо указана в [62], но имеет место неопределенность в оценке береговой линии (границы водного объекта) при отсутствии данных наблюдений. Например, для рек и озер она опре-

- деляется «по среднемноголетнему уровню вод в период, когда они не покрыты льдом» [62, ст. 5, п. 4]. Однако, согласно [19, п. 5.45], «перенос уровней воды по продольному профилю водной поверхности производят в пределах небольших по длине речных участков (1–3 км) с учетом зависимости уклона от уровня в условиях установившегося потока», что определяет необходимость огромных затрат при оценке береговой линии поверхностных водных объектов в Западной Сибири (значительный объем затрат приходится на топогеодезические работы в поймах шириной от 1 до 18–20 км). Кроме того, практически утрачивается смысл выделения поймы – части дна речной долины, сложной наносами и периодически заливаемой в половодье и паводки [42, п. 161]. Выход из этой ситуации видится в соблюдении требований [62] к пойме, граница которой определяется условно по максимальному уровню воды обеспеченностью 10 % – расчетной обеспеченности для временных гидротехнических сооружений (ГТС) IV класса и ГТС IV класса, защищающих территории оздоровительно-рекреационного и санитарно-защитного назначения.
2. В ряде случаев (при обеспечении защиты подземных и поверхностных вод и соблюдении требований к зонам санитарной охраны) возможно строительство отстойника – усреднителя, функционирование которого происходит с учетом испарения стоков в теплый период года и вымораживания (со снижением концентрации ЗВ) в холодный [63–65]; последний фактор имеет важное значение на территориях распространения многолетней мерзлоты и/или перемерзания и пересыхания водотоков.
  3. Ключевыми задачами очистки стоков в условиях Западной Сибири являются: 3.1) осаждение взвешенных веществ как важного фактора снижения концентраций токсичных микроэлементов (Pb, Zn и др.); 3.2) уменьшение концентраций ОВ и биогенных веществ – продуктов трансформации ОВ [37]. Механическая очистка обеспечивает не только осаждение взвешенных частиц, но и соосаждение целого ряда токсичных элементов. Судя по материалам статистического анализа данных наблюдений и моделирования процессов взаимодействия речных вод и донных отложений, болотных вод и торфов [40, 50], связи между содержаниями Fe и ряда микроэлементов в поверхностных водах и донных отложениях или торфах удовлетворительно описываются уравнениями вида (14)–(18). Соответственно, на этапе механической очистки требуется контроль значений  $k_{rQ}$ ,  $S_{m0}$ ,  $k_{pH}$ , набора  $C_j$  и соотношения  $(S_m - S)$ . В частности, целесообразно обеспечить предварительную аэрацию стоков (перед или при подаче в отстойник), слабощелочную и щелочную среду в отстойнике, подбор материала дна отстойника с максимальными значениями  $S_{m0}$  и минимальную скорость движения сточных вод (в отстойнике) для увеличения интенсивности соосаждения растворенных, коллоидных и взвешенных форм токсичных элементов. В некоторых случаях отмечена зависимость  $S_m$  и от коэффициента шероховатости русла, в значительной степени связанного с гранулометрическим составом донных отложений.
  4. Как в целом для всего процесса очистки, так и при механической очистке размеры сооружений рассчитываются согласно [48], но в конечном случае определяются условием (19), в том числе величиной  $n(k)$ , зависящей в общем случае от соотношения расходов (объемов) сточных и поверхностных вод, условий перемешивания сточных вод и линейных размеров сооружений. В частности, расчет длины отстойника может быть уточнен (по сравнению с расчетом по [48]) путем использования регрессионных зависимостей, полученных на действующих сооружениях, метода расчета кратности разбавления в водоемах по М.А. Руффелю [24] или аналитических решений упрощенного стационарного уравнения диффузии [59].
  5. Равнинная территория Западной Сибири очень сильно заболочена. Заболочены и долины рек не только в таежной, но и в лесостепной зоне, причем речные долины очень часто достаточно широкие (более 2–3 км, а долина Оби – до 10–15 км и более), с большим количеством локальных понижений, дно которых сложено грунтами с низкими фильтрационными свойствами (слой суглинков и глин над толщей песков и галечника); с учетом этого в ряде случаев возможны и даже целесообразны варианты размещения отстойников в таких понижениях на границе с долинными болотами, при которых после необходимой инженерной подготовки (с целью предотвращения затопления объектов КОС и ликвидации гидравлической связи их с поверхностными и подземными водами) возводится система «сбор стоков – отстойник – блок дезинфекции – биопруд с аборигенной болотной растительностью – выпуск очищенных сточных вод»; аналогичные системы могут быть созданы и на границе водораздельных болот (или внутри болот на границе суходолов).
  6. Биологическую очистку стоков крупных населенных пунктов целесообразно проводить на сооружениях с искусственной аэрацией. Но для очистки талых вод снегоотвалов и поверхностного стока с городских территорий, доочистки (после биологических сооружений с искусственной аэрацией) и/или биологической очистки хозяйственно-бытовых сточных вод в слабо населенных районах целесообразно использовать сооружения с естественной аэрацией – биопруды, поля фильтрации и орошения [48, 60, 63, 66]. На заболоченных территориях Западной Сибири такие сооружения могут быть представлены биологическими прудами с торфяным субстратом и болотной растительностью, специально подготовленными (обвалованными, выбранными с учетом наличия водоупорных подстилающих пород, с искусственной кольматацией и гидроизоляцией грунтов основания сооружений) участками торфяных болот либо участками с минеральным грунтом, на которые

предварительно вносится торфяной грунт. Образующийся в процессе очистки стоков осадок может использоваться при рекультивации нарушенных земель в качестве органического удобрения [14, 67, 68]. После завершения эксплуатации КОС нарушенные земли подлежат рекультивации и в дальнейшем используются для лесохозяйственной деятельности; в целом в этом случае технология очистки стоков (преимущественно хозяйственно-бытовых) реализуется за счет сорбции ЗВ на частицах торфа, их усвоения растительностью и минерализации ОВ в процессе образования осадка [59, 60, 69].

7. Таким образом, оптимальная (по сочетанию эффективности очистки и соответствующих затрат) структура очистки сточных вод имеет вид: сбор стоков (в том числе, с вымораживанием и испарением) → механическая очистка (согласно [63], желательна – в многоступенчатых отстойниках) → биологическая очистка (в больших населенных пунктах – в сооружениях с искусственной аэрацией, в малых – в сооружениях с искусственной или естественной аэрацией; в последнем случае желательна многоступенчатая очистка и использование местных видов гидрофильной растительности) → доочистка от продуктов трансформации ОВ (в том числе, в сооружениях с естественной аэрацией) → дезинфекция → отстойник (в том числе, с вымораживанием и испарением) → сброс в водный объект или оборотную систему водоснабжения. Отстойники и сооружения с естественной аэрацией целесообразно совместить с естественными понижениями рельефа при условии инженерной защиты территории (обвалование, канализация дождевых и снеготалых вод, укрепление и гидроизоляция дна и берегов).

На стадии разработки нормативов допустимых сбросов (НДС) ЗВ и микроорганизмов необходимо выполнить расчет элементов геохимического баланса. Если НДС определен и утвержден в соответствии с действующим законодательством, а сброс очищенных сточных вод не превышает 5 % от стока водного объекта – приемника в замыкающем створе, то влияние сброса можно считать допустимым и локальным.

*Методика оптимального выбора способов восстановления нарушенных водных экосистем с учётом природных условий и характера хозяйственной деятельности.* Значительные по площади территории в Западной Сибири заняты промышленными объектами и полигонами отходов, которые по завершению эксплуатации, в соответствии с требованиями [70], должны быть рекультивированы. Под рекультивацией, согласно [71], понимается комплекс работ, направленных на восстановление продуктивности и хозяйственной ценности нарушенных и загрязненных земель, а также на улучшение условий окружающей среды. Эти работы обычно проводятся в два этапа (технический и биологический) с учетом природных и социально-экономических условий и состояния нарушенных земель.

В Западной Сибири, как уже указывалось выше, ключевой особенностью природных условий является очень сильная заболоченность территории, в том числе распространение верховых болот [30, 32]. При загрязнении таких болот в процессе добычи и транспортировки углеводородов процедура рекультивации обычно включает выравнивание поверхности, внесение удобрений и микробиологических препаратов, засев травянистыми (не болотными) растениями. В результате исходная экосистема обычно не восстанавливается, а происходит формирование достаточно устойчивой экосистемы, сходной с экосистемой низинного болота [32, 69]. Таким образом, эффективность восстановления загрязненных низинных болот указанным выше способом – достаточно спорный вопрос. При этом также отметим, что хозяйственная деятельность на заболоченных территориях в целом стимулирует болотообразование (прежде всего, низинных болот) за счет снижения интенсивности водообмена на объектах инфраструктуры и добычи углеводородов [32].

Анализ данных наблюдений и результатов моделирования распространения ЗВ в болотах Томской области показал, что: 1) в случае верховых болот заметное увеличение минерализации болотных вод обычно ограничено полосой до 200 м, но при этом вероятны структурные изменения болотных экосистем на участках протяженностью до 500 м; 2) низинные болота, по сравнению с верховыми, более устойчивы к воздействию систематического сброса сточных вод; 3) по глубине торфяной залежи заметное изменение химического состава болотных вод обычно приурочено к верхнему слою до 0,5–1,0 м с наибольшим проникновением (до 1,5–2,0 м и более) соленоватых и соленых сточных вод; разовые поступления нефти часто приводят к загрязнению торфяной залежи на меньшую глубину [69, 72–74].

Предположим, что в некоторой точке произошел аварийный сброс нефти с плотностью  $0,8 \text{ т/м}^3$ . Тогда при коэффициенте фильтрации  $0,0005\text{--}0,004 \text{ см/с}$  и угле  $0,005\text{--}0,008 \text{ м/м}$  (принято по [75]) ее распространение в деятельном слое торфяной залежи глубиной  $0,5 \text{ м}$  из центра круга радиусом  $200 \text{ м}$  (указанная выше протяженность заметного загрязнения болотных вод) до границы круга с фоновыми значениями углеводородов будет происходить, как минимум, несколько лет, а масса нефти, ограниченная конусом максимального распространения, составит  $16755 \text{ т}$ . При коэффициенте скорости самоочистки около  $0,3 \text{ сут}^{-1}$  (принято по [21]) за время фильтрации нефти в торфяном болоте произойдет снижение ее концентрации в болотных водах до фонового уровня даже в центре круга. С учетом даже такого грубого приближения (но подтвержденного наблюдениями и результатами моделирования [72, 74]) можно сделать вывод о том, что при разовом аварийном сбросе на верховое болото нефти в размере до  $16\text{--}17 \text{ т}$  проведение его рекультивации нецелесообразно, поскольку, во-первых, рекультивация приведет не к восстановлению исходного состояния, а к созданию природно-антропогенного объекта, сходного с низинным боло-

том. Во-вторых, в течение 3–5 лет (срок, соответствующий действию нормативов допустимого воздействия на компоненты окружающей среды) состояние загрязненного верхового болота вернется к исходному за счет процессов самоочищения.

При более значительном разливе нефти (в том числе многократном в течение 3–5-летнего периода) как на верховых, так и на низинных или переходных болотах, либо при авариях в системе поддержания пластового давления (ППД) рекультивация, безусловно, нужна [69]. Но при ее проведении на техническом этапе следует стремиться не к полному выравниванию поверхности, а к имитации исходного болотного микроландшафта. В частности, как было показано в [76], для функционирования выпуклых верховых болот важно, чтобы сохранялась возможность «канализации» отходов жизнедеятельности болотной микрофлоры и токсичных веществ (в восточной части Васюганского болота –  $\text{NO}_2^-$  и Al). Внесение питательного субстрата (например, соединений Ca и P) также целесообразно проводить неравномерно, например, в пределах грядово-мочажинного комплекса (ГМК) – в виде гряд, расположенных перпендикулярно вектору распространения болотных вод. При рекультивации болот, загрязненных в результате аварий в системе ППД, желательнее засеивать восстанавливаемый участок не луговыми травянистыми растениями, а видами растительности, характерными для низинных болот лесостепи и южной тайги. Такие виды изначально приспособлены к достаточно резким колебаниям минерализации водопритока (от ультрапресных снеготалых вод в весенний период до солоноватых подземных вод, поступающих в притеррасные понижения в зимний).

В целом рекультивация нарушенных земель в любых природных зонах Западной Сибири должна проводиться в последовательности: 1) выявление характерных природных условий; 2) восстановление нарушенных земель для заданного вида землепользования при [68, 69, 77]: 2.1) условии, что невозможно самовосстановление в течение 3–5 лет; 2.2) максимальном приближении к местным условиям и с максимально возможным использованием местных материалов и видов растительности; 3) организация водоотведения с рекультивируемого участка для предотвращения эрозионных процессов, а также не предусмотренного проектом рекультивации затопления и/или подтопления; 4) мониторинг состояния компонентов окружающей среды в центральной части участка и в створах фактического или возможного выноса с него. По результатам инженерных изысканий, выполненных до проведения работ, повлекших нарушение земель, и мониторинга рекультивированного участка необходимо выполнить расчет элементов геохимического баланса. Если значения элементов геохимического баланса до нарушения земель и после их рекультивации отличаются не более чем на 20 %, участок может считаться восстановленным. В случае отсутствия исходной информации рекомендуется сравнение с геохимическим балансом ненарушенного участка с аналогичными природными условиями.

### Заключение

В результате исследования предложена методология управления геохимическим балансом водосборной территории, заключающаяся в: 1) оценке состояния водных объектов, тенденций его изменения и антропогенного влияния; 2) построении комплекса математических моделей, описывающих формирование водного стока и химического состава вод при минимуме исходной информации; 3) разработке мероприятий, позволяющих минимизировать антропогенное влияние на водные объекты на основе выбора наиболее эффективных способов очистки сточных вод и внедрения водоохраных технологий с учетом региональных условий (заболоченность равнинной территории и долин больших рек) и максимальным использованием местных материалов; 4) оценке эффективности водоохраных мероприятий путем сравнения результатов наблюдений и моделирования.

Разработан алгоритм определения элементов водного и геохимического баланса водосбора (1), (7). Для оценки элементов уравнений баланса и определения параметров водоохраных мероприятий рассмотрены модели (1), (11), (12), (14)–(18), описывающие связи между химическим составом поверхностных и подземных вод, подстилающих и водовмещающих грунтов и интенсивностью водообмена. На основе анализа геохимического баланса водосборов и указанных моделей охарактеризована направленность геохимических процессов в водных экосистемах Западной Сибири и сформулированы ключевые аспекты выбора методов очистки сточных вод и рекультивации нарушенных земель.

Начальным этапом проектирования КОС и рекреационных работ должны быть составление и анализ водного и геохимического баланса водосборной территории. Строительство очистных сооружений целесообразно, если сброс неочищенных сточных вод составляет более 5 % от стока в замыкающем створе водосбора, либо сточные воды содержат опасные микроорганизмы и токсичные вещества 1–2 классов опасности. В случае принятия решения о строительстве КОС оптимальная (по сочетанию эффективности очистки и соответствующим затратам) структура очистки сточных вод предполагает широкое использование отстойников и сооружений биологической очистки с естественной аэрацией, которые желательнее совместить с естественными понижениями рельефа в долинах рек или внутри болот на границе суходолов при условии инженерной защиты территории (обвалование, канализация дождевых и снеготалых вод, укрепление и гидроизоляция дна и берегов). В случае нецелесообразности строительства КОС рекомендуется соблюдение требований к ВЗ для части речной долины, затапливаемой при максимальных уровнях воды обеспеченностью 10 %.

Рекультивацию нарушенных земель целесообразно проводить при невозможности самовосстановления в течение 3–5 лет и при условии максимального приближения к местным природным условиям. Рекультивация загрязненного участка верхового болота

(в Западной Сибири) при аварийном сбросе нефтепродуктов массой до 16–17 т неэффективна. Завершающим этапом строительства КОС и рекультивации нарушенных земель является повторное составление и анализ геохимического баланса водосбора (в случае очистных условий – одновременно с разработкой нормативов допустимых сбросов). Если сброс очищенных сточных вод не превышает 5 % стока в замыкающем створе, то влияние сброса можно считать

допустимым и локальным. Если значения элементов геохимического баланса до нарушения земель (при отсутствии исходной информации – на фоновом участке-аналоге) и после их рекультивации отличаются не более чем на 20 %, то участок может считаться восстановленным.

*Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 18-55-80015, 17-05-00042.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. – М.: Наука, 2004. – 677 с.
2. Loucks D.P., Van Beek E. Water resources systems planning and management. An Introduction to Methods, Models and Applications. – Turin: UNESCO Publishing, printed by Ages Arti Grafiche, 2005. – 679 p.
3. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование тепло- и массообмена поверхности суши с атмосферой. – М.: Наука, 2010. – 327 с.
4. Manual on Stream Gauging. V. I. Fieldwork. WMO. No. 1044. – Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2010. – 252 p.
5. Manual on Stream Gauging. V. II. Computation of Discharge. WMO. No. 1044. – Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2010. – 198 p.
6. Hendriks M.R. Introduction to physical hydrology. – Oxford, New York: Oxford University Press, 2010. – 331 p.
7. Mujumdar P.P., Nagesh Kumar D. Floods in a changing climate. Hydrologic modelling. – New York: Cambridge University Press, 2012. – 177 p.
8. Benedini M., Tsakiris G. Water quality modelling for rivers and streams. – Dordrecht: Springer, 2013. – 288 p.
9. СТО ГГИ 52.08.37-2015. Влагозапасы и промерзание почв, испарение с почвы и водной поверхности при региональном изменении климата. Рекомендации по расчету и прогнозу средних многолетних изменений. – СПб.: ART-XPRESS, 2015. – 40 с.
10. Никаноров А.М. Гидрохимия и методы исследования качества вод суши. МПР РФ, Росгидромет. – Ростов-на-Дону: ФГБУ «ГХИ», ИВП РАН, 2017. – 572 с.
11. Раткович Д.Я. Актуальные проблемы водообеспечения. – М.: Наука, 2003. – 352 с.
12. Danilov-Danilyan V.I., Khranovich I.L. A system of mathematical models underlying water use and disposal strategies // Water Resources. – 2018. – V. 45. – № 2. – P. 289–296.
13. Venitsianov E.V. Modern problems of water protection in Russia // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – V. 321. – P. 1–8. 012033. DOI: 10.1088/1755-1315/321/1/012033.
14. Справочник по современным технологиям очистки природных и сточных вод и оборудованию. – Copenhagen: Ministry of Environment and Energy, Danish Environment Protection Agency, Printed by Schultz Grafisk, 2001. – 253 с.
15. ИТС 8-2015. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Очистка сточных вод при производстве продукции (товаров), выполнении работ и оказании услуг на крупных предприятиях. – М.: Росстандарт, 2015. – 77 с.
16. ИТС 10-2015. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов. – М.: Росстандарт, 2015. – 359 с.
17. ИТС 15-2016. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Утилизация и обезвреживание отходов (кроме обезвреживания термическим способом (сжигание отходов)). – М.: Росстандарт, 2016. – 139 с.
18. Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH) – a community perspective / G. Blöschl, G. Carr, J. Salinas, B. Széles, M.H. Barendrecht, K. Breinl, D. Duethmann, H. Müller-Thomy, R. Tong, M.F.P. Bierkens, R. van Beek, R.J. van der Ent, A. Chambel, C. Cudennec, G. Destouni, Z. Kalantari, A. Fiori, E. Volpi, J.W. Kirchner, S.T. Allen et al. // Hydrological Sciences Journal. – 2019. – V. 64. – № 10. – P. 1141–1158.
19. СП 33-101-2003. Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М.: Госстрой России, 2004. – 72 с.
20. Методика расчета водохозяйственного баланса водных объектов. – М.: МПР России, 2007. – 41 с.
21. Справочник по гидрохимии / под ред. А.В. Никанорова. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 391 с.
22. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh groundwater in the main landscape zones of the Earth // Geochemistry International. – 2008. – V. 46. – № 13. – P. 1285–1398.
23. РД 52.24.748-2010. Усовершенствованная методика определения выноса (переноса) загрязняющих веществ с речным стоком. Росгидромет. – Ростов-на-Дону: ГУ «ГХИ», 2010. – 65 с.
24. Методика разработки нормативов допустимых сбросов веществ и микроорганизмов в водные объекты для водопользователей (с изменениями от 31.07.2018 г.). – М.: МПР России, 2018. – 35 с.
25. Моисеенко Т.И. Биодоступность и экотоксичность металлов в водных системах: критические уровни загрязнения // Геохимия. – 2019. – Т. 64. – № 7. – С. 675–688. DOI: 10.31857/S0016-7525647675-688.
26. Давыдова М.И., Раковская Э.М., Тушинский Г.К. Физическая география СССР. – Т. 1. – М.: Просвещение, 1989. – 240 с.
27. Солнцева Н.П. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. – М.: МГУ, 1998. – 376 с.
28. Адам А.М. Оценка экологического состояния территории Западной Сибири в целях обеспечения экологической безопасности в контексте устойчивого природопользования // Охрана природы: сборник статей. – Томск: НТЛ, 2005. – С. 1–12.
29. Пологова Н.Н., Лапшина Е.Д. Накопление углерода в торфяных залежах Большого Васюганского болота // Большое Васюганское болото. – Томск: ИОА СО РАН, 2002. – С. 174–186.
30. Eurasian mires of the southern Taiga belt: modern features and response to Holocene Palaeoclimate / T. Minayeva, W. Bleuten, A. Sirin, E.D. Lapshina // Wetlands and Natural Resource Management. Ecological Studies. V. 190 / Eds. J.T.A. Verhoeven, B. Beltman, R. Bobbink, D.F. Whigham. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. – P. 315–341.
31. Эколого-геохимическое состояние поверхностных водных объектов в таежной зоне Западной Сибири и некоторые вопросы нормирования антропогенной нагрузки / О.Г. Савичев, М.Л. Марков, Т.М. Потапова, О.В. Задонская // Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития: Труды III Всерос. конф. – СПб.: Химиздат, 2019. – С. 754–757.
32. Савичев О.Г. Водные ресурсы Томской области. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2010. – 248 с.
33. Savichev O.G., Zemtsov V.A., Pasechnik E.Y. Hydrologic conditions for chemical composition of the Siberian river waters // Aktru: IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – № 232. – P. 1–6. DOI: 10.1088/1755-1315/232/1/012012.
34. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. P. I. A discussion of principles // Journal of Hydrology. – 1970. – № 10 (3). – P. 282–290.
35. Водный кадастр. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество. 2017 год. – СПб.: Росгидромет, 2018. – 153 с.
36. Состояние геологической среды (недр) на территории Сибирского федерального округа в 2017 г. Информационный бюллетень. / под ред. В.А. Лыготина. – Томск: Филиал «Сибир-

- ский региональный центр ГМСН», ФГБУ «Гидроспецгеология», 2018. – Вып. 14. – 178 с.
37. Лыготин В.А., Савичев О.Г., Нигороженко В.Я. Состояние поверхностных водных объектов, водохозяйственных систем и сооружений на территории Томской области в 2000–2005 гг. – Томск: ОАО «Томскгеомониторинг», «АГРАФ-ПРЕСС», 2006. – 88 с.
  38. Гусева Н.В. Механизмы формирования химического состава природных вод в различных ландшафтно-климатических зонах горно-складчатых областей центральной Евразии: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск, 2018. – 43 с.
  39. Требования к производству и результатам многоцелевого геохимического картирования масштаба 1:200000 / отв. ред. Э.К. Буренков. – М.: ИМГРЭ, 2002. – 92 с.
  40. Geochemical barriers in oligotrophic peat bog (Western Siberia) / O. Savichev, E. Soldatova, M. Rudmin, A. Mazurov // *Applied Geochemistry*. – 2020. – V. 113. – P. 1–11. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2019.104519.
  41. СП 131.13330.2018. Строительная климатология. – М.: Стандартинформ, 2019. – 153 с.
  42. ГОСТ 19179-73. Гидрология суши. Термины и определения. – М.: Госстандарт СССР, 1988. – 47 с.
  43. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений. – СПб.: Нестор-История, 2009. – 193 с.
  44. Моисеева Ю.А. Изменения подземного стока таежной зоны Западной Сибири в голоцене: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2018. – 22 с.
  45. Савичев О.Г., Лыготин В.А., Моисеева Ю.А. Условия изменения уровней подземных вод верхней гидродинамической зоны на территории томской области // *Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геоэкология*. – 2018. – № 6. – С. 31–40. DOI: 10.1134/S0869780318060054.
  46. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements / R.G. Allen, L.S. Pereira, D. Raes, M. Smith // *FAO Irrigation and drainage. Water Resources, Development and Management Service FAO*. – 1998. – № 56. – P. 1–276.
  47. Improved method for hydrochemical exploration of mineral resources / Nguyen Van Luyen, O.G. Savichev, V.A. Domarenko, Quach Duc Tin // *Vietnam Journal of Earth Sciences*. – 2017. – № 39 (2). – P. 167–180. DOI: 10.15625/0866-7187/39/2/9703.
  48. СП 32.13330.2012. Канализация. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.03-85. – М.: Минрегион России, 2011. – 84 с.
  49. Levy J., Chesters G. Simulation of atrazine and metabolite transport and fate in a sandy-till aquifer // *Journal of contaminant hydrology*. – 1995. – № 20. – P. 67–88.
  50. Савичев О.Г. Исследование взаимосвязей между химическим составом вод и донных отложений рек Сибири // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 5. – С. 178–188. DOI: 10.18799/24131830/2019/5/280.
  51. Камнева О.А. Многолетние изменения гидрогеологических условий Среднеобского бассейна: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2012. – 20 с.
  52. РД 52.24.622-2017. Порядок проведения расчета условных фоновых концентраций химических веществ в воде водных объектов для установления нормативов сбросов сточных вод. Дата введения 14.06.2017 г. – М.: Ростов-на-Дону: Росгидромет, ФГБУ «ГХИ», 2017. – 96 с.
  53. Climate change impact on residual contaminants under sustainable remediation / A. Libera, F.P.J. de Barros, V. Faybishenko, C. Eddy-Dilek, M. Denham, K. Lipnikov, D. Moulton, V. Maco, H. Wainwright // *Journal of Contaminant Hydrology*. – 2019. – V. 226. – P. 1–12. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2019.103518.
  54. Влияние высокоминерализованных вод на почвенно-растительный покров в районах нефтедобычи / А.Е. Березин, В.А. Базанов, Т.А. Минеева, Л.А. Березина // *Вестник Томского государственного университета*. – 2008. – № 306. – С. 142–148.
  55. Solubility, mobility, and bioaccumulation of trace elements: abiotic processes in the rhizosphere / B. Robinson, N. Bolan, S. Mahimairaja, B. Clothier // *Trace elements in the environment: biogeochemistry, biotechnology, and bioremediation* / Ed. by M.N.V. Prasad, Ravi Naidu, Kenneth S. Sajwan. – New York, USA: Taylor & Francis Group, 2006. – P. 97–110.
  56. Домаренко В.А., Савичев О.Г., Улаева С.С. Геохимический баланс водосбора малой реки Ильбокич (бассейн Ангары, Средняя Сибирь) // *Разведка и охрана недр*. – 2019. – № 7. – С. 35–42.
  57. ГОСТ 17.1.1.01-77. Охрана природы. Гидросфера. Использование и охрана вод. Основные термины и определения. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2001. – 30 с.
  58. ГОСТ 25150-82. Канализация. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1994. – 13 с.
  59. Parameter calculation technique for the waste treatment facilities using naturally-aerated blocks in the bog ecosystems / K.V. Akhmed-Ogly, O.G. Savichev, O.G. Tokarenko, E.Yu. Pashchnik, M.V. Reshetko, N.G. Nalivajko, M.V. Vlasova // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. – 2014. – V. 21. – P. 1–6. DOI: 10.1088/1755-1315/21/1/012021.
  60. Процуос О.А., Михайлов А.В. Опыт применения технологии торфяной фильтрации для очистки поверхностных сточных вод // *Водоснабжение и санитарная техника*. – 2019. – № 3. – С. 34–39.
  61. Corzo A., Sanabria O. Adaptation of vegetation in high-rate constructed wetland using artificial carriers for bacterial growth: Assessment using phytopathological indicators // *Journal of Water Process Engineering*. – 2019. – V. 32. – P. 1–8. DOI: 10.1016/j.jwpe.2019.100974.
  62. Водный кодекс Российской Федерации. От 03.06.2004 № 74-ФЗ. С изменениями на 03.08.2018 г. – М.: Кремль, 2018. – 48 с.
  63. Жуков А.И., Монгайт И.Л., Родзиллер И.Д. Методы очистки производственных сточных вод. – М.: Стройиздат, 1977. – 204 с.
  64. Сосновский А.В. Применение природного холода для очистки и опреснения солёных вод // *Сантехника, отопление, кондиционирование*. – 2018. – № 6 (198). – С. 38–41.
  65. Randall D.G., Nathoo J. Resource recovery by freezing: a thermodynamic comparison between a reverse osmosis brine, sea water and stored urine // *Journal of Contaminant Hydrology*. – 2018. – № 26. – P. 242–249. DOI: 10.1016/j.jwpe.2018.10.020.
  66. Polyakova O.S., Semyonov S.Yu. Reconstruction experience of the wastewater treatment plant (Kargasok village, Tomsk region, Russia) using «constructed wetlands» technology // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – V. 400. – P. 1–4. DOI: 10.1088/1755-1315/400/1/012020.
  67. Кофман В.Я. Современные способы удаления азота из сточных вод (обзор) // *Водоснабжение и санитарная техника*. – 2019. – № 5. – С. 44–52.
  68. Kuznetsova I.V., Timofeeva S.S. Green technologies in land recultivation for coal mining enterprises // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. – 2020. – V. 408. – P. 1–6. DOI: 10.1088/1755-1315/408/1/012075.
  69. Березин А.Е., Паршина Н.В. Щадящие методы рекультивации земель на заболоченных территориях // *Почвы в биосфере. Матер. Всерос. научн. конф. / отв. ред. А.И. Сысо*. – Новосибирск: ИПА СО РАН, 2018. – С. 303–307.
  70. Российская Федерация. Законы. Об охране окружающей среды: федер. закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ (с изменениями на 29.07.2018). – М.: Кремль, 2018. – 77 с.
  71. ГОСТ 17.5.1.01-83. Охрана природы. Рекультивация земель. Термины и определения. Дата введения 1984-07-01 // *Охрана природы. Земли: Сб. ГОСТов*. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002. – 8 с.
  72. Прогноз изменения макрокомпонентного состава болотных вод при добыче железных руд в Томской области / О.Г. Савичев, А.К. Мазуров, Н.В. Гусева, В.А. Домаренко, А.А. Хвачевская // *География и природные ресурсы*. – 2016. – № 1. – С. 94–102.
  73. Ecosystem recovery and natural degradation of spilled crude oil in peat bog ecosystems of West Siberia / W. Bleuten, E. Lapshina, W. Ivens, V. Shinkarenko, E. Wiersma // *International Peat Journal*. – 1999. – № 9. – P. 73–82.
  74. Влияние шламовых амбаров на геохимическое состояние болотных экосистем в бассейне реки Васюган / В.А. Базанов, О.Г. Савичев, Д.В. Волостнов, Б.А. Егоров, А.О. Крутовский, Е.Г. Язиков // *Известия Томского политехнического университета*. – 2004. – Т. 307. – № 2. – С. 72–75.
  75. Иванов К.Е. Водобмен в болотных ландшафтах. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 280 с.

76. Гидрогеохимические условия формирования олиготрофных болотных экосистем / О.Г. Савичев, А.К. Мазуров, И.П. Семилетов, В.А. Базанов, Н.В. Гусева, А.А. Хвашевская, Н.Г. Наливайко // Известия РАН. Серия географическая. – 2016. – № 5. – С. 60–69. DOI: 10.15356/0373-2444-2016-5-60-69.
77. Bradshaw R.H.M., Sykes M.T. Ecosystem dynamics. From the past to the future. – Chichester, West Sussex, UK: John Wiley & Sons, Ltd., 2014. – 321 p.

*Поступила 17.02.2020 г.*

#### **Информация об авторах**

**Савичев О.Г.**, доктор географических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Гусева Н.В.**, доктор геолого-минералогических наук, заведующая кафедрой – руководитель отделения геологии на правах кафедры Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 502.2: 556.18

## METHODOLOGY OF MANAGEMENT OF RIVER BASINS GEOCHEMICAL BALANCE IN WESTERN SIBERIA

Oleg G. Savichev<sup>1</sup>,  
OSavichev@mail.ru

Natalya V. Guseva<sup>1</sup>,  
Guseva24@yandex.ru

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenina Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**Relevance** of the research is determined by a plenty of unresolved issues on estimation of water bodies condition and their long-term forecast, normalization of anthropogenous influences, sewage treatment and restoration of water bodies.

**The aim** of the research is to develop a methodology for management of geochemical balance of water ecological systems in Western Siberia in various natural and anthropogenous conditions.

**Methods:** landscape and geochemical, geographical and hydrological, statistical methods, methods of mathematical modelling of a water flow and chemical composition of waters.

**Results and conclusions.** The authors have proposed the methodology of management of river basin geochemical balance. It consists in: 1) estimation of of water bodies condition, tendencies of its change and anthropogenous influence; 2) construction of a complex of mathematical models describing water runoff formation and chemical composition of waters; 3) development of the actions, which allow minimizing anthropogenous influence on water bodies; 4) estimation of water-security actions efficiency by comparison of results of observations and simulating. The authors developed the algorithm for defining the elements of geochemical balance of river basins and characterized the orientation of geochemical processes in water bodies in Western Siberia. The key aspects of a choice of methods of sewage treatment and restoration of the broken areas are formulated. It is shown that construction of treatment facilities is reasonable if dump of the crude sewage makes more than 5 % from a runoff in closing section. The optimum structure of sewage treatment assumes wide use of sediment basins and constructions of biological clearing with natural aeration which are desirable for combining with natural downturn of a relief in river valleys or inside bogs for condition of engineering protection of territory. Restoration can be considered effective if the difference between values of elements of balance before infringement and after restoration does not exceed 20 %.

### Key words:

Water and geochemical balance, river basins, management of geochemical balance, Western Siberia, boggy territories.

The research was financially supported by the RFBR grants no. 18-55-80015, 17-05-00042, 18-00-01493.

### REFERENCES

- Kraynov S.R., Ryzhenko B.N., Shvets V.M. *Geokhimiya podzemnykh vod: teoreticheskie, prikladnye i ekologicheskie aspekty* [Geochemistry of ground waters: theoretical, applied and environmental aspects]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 677 p.
- Loucks D.P., Van Beek E. *Water resources systems planning and management. An introduction to methods, models and applications*. Turin, UNESCO Publishing, printed by Ages Arti Grafiche, 2005. 679 p.
- Gusev E.M., Nasonova O.N. *Modelirovanie teplo- i massoobmena poverkhnosti sushy s atmosferoy* [Modelling of heat and mass transfer of the land surface to the atmosphere]. Moscow, Nauka Publ., 2010. 327 p.
- Manual on Stream Gauging*. Vol. I. Fieldwork. WMO-No. 1044. Geneva, Switzerland, World Meteorological Organization, 2010. 252 p.
- Manual on Stream Gauging*. Vol. II. Computation of Discharge. WMO-No. 1044. Geneva, Switzerland, World Meteorological Organization, 2010. 198 p.
- Hendriks M.R. *Introduction to physical hydrology*. Oxford, New York, Oxford University Press, 2010. 331 p.
- Mujumdar P.P., Nagesh Kumar D. *Floods in a changing climate. Hydrologic modelling*. New York, Cambridge University Press, 2012. 177 p.
- Benedini M., Tsakiris G. *Water quality modelling for rivers and streams*. Dordrecht, Springer, 2013. 288 p.
- STO HSI 52.08.37-2015. *Vlagozapasy i promerzaniye pochvy, isparenije s pochvy i vodnoy poverkhnosti pri regionalnom izmenenii klimata. Rekomendatsii po raschetu i prognozu srednikh mnogoletnikh izmeneniy* [Moisture and soil freezing, evaporation from soil and water surface with regional climate change. Recommendations for calculating and forecasting average multi-year changes]. St-Petersburg, ART-XPRESS, 2015. 40 p.
- Nikanorov A.M. *Gidrokimiya i metody issledovaniya kachestva vod sushi* [Hydrochemistry and land water quality research methods]. Rostov-on-Don, FSBO «HCSI», IWP RAS, 2017. 572 p.
- Ratkovich D.Ya. *Aktualnye problemy vodoobespecheniya* [Actual problems of water supply]. Moscow, Nauka Publ., 2003. 352 p.
- Danilov-Danilyan V.I., Khranovich I.L. A system of mathematical models underlying water use and disposal strategies. *Water Resources*, 2018, vol. 45, no. 2, pp. 289–296.
- Venitsianov E.V. Modern problems of water protection in Russia. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 321, pp. 1–8. DOI: 10.1088/1755-1315/321/1/012033.
- Spravochnik po sovremennym tekhnologiyam ochistki prirodnykh i stochnykh vod i oborudovaniyu* [Handbook of modern technologies for the treatment of natural and waste water and equipment]. Copenhagen, Ministry of Environment and Energy, Danish Environment Protection Agency, Printed by Schultz Grafisk, 2001. 253 p.
- ITS 8-2015. *Informatsionno-tekhnicheskiy spravochnik po nailuchshim dostupnym tekhnologiyam. Ochistka stochnykh vod pri proizvodstve produktii (tovarov), vypolnenii rabot i okazanii uslug na krupnykh predpriyatiyakh. Wastewater treatment in manufacture* [Information and technical reference on the best available technologies. Wastewater treatment in the production of products, work and services in large enterprises. Wastewater treatment in manufacture of products, performance of works and provision of services in large enterprises]. Moscow, Rosstandart Publ., 2015. 77 p.
- ITS 10-2015. *Informatsionno-tekhnicheskiy spravochnik po nailuchshim dostupnym tekhnologiyam. Ochistka stochnykh vod s ispolzovaniem tsentralizovannykh sistem vodootvedeniya poseleniy, gorodskikh okrugov* [Information and technical reference on the best available technologies. Wastewater treatment using centralized drainage systems of settlements, urban districts]. Moscow, Rosstandart Publ., 2015. 359 p.

17. ITS 15-2016. *Informatsionno-tekhnicheskiiy spravochnik po nailuchshim dostupnyim tekhnologiyam. Utilizatsiya i obezvrezhivaniye otkhodov (krome obezvrezhivaniya termicheskim sposobom (szhiganiye otkhodov). Recycling and disposal of waste (except for thermal disposal of waste (waste incineration))* [Information and technical reference on the best available technologies. Recycling and disposal of waste (except for thermal disposal of waste (waste incineration)]. Moscow, Rosstandart Publ., 2016. 139 p.
18. Blöschl G., Carr G., Salinas J., Széles B., Barendrecht M.H., Breinl K., Duethmann D., Müller-Thomy H., Tong R., Bierkens M.F.P., van Beek R., van der Ent R.J., Chambel A., Cudennec C., Destouni G., Kalantari Z., Fiori A., Volpi E., Kirchner J.W., Allen S.T. Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH) – a community perspective. *Hydrological Sciences Journal*, 2019, vol. 64, no. 10, pp. 1141–1158.
19. SP 33-101-2003. *Svod pravil po proyektirovaniyu i stroitelstvu. Opredelenie osnovnykh raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik* [Code of rules for design and construction. Determination of the main calculated hydrological characteristics]. Moscow, Gosstroy of Russia Publ., 2004. 72 p.
20. *Metodika rascheta vodokhozyaystvennogo balansa vodnykh obektov* [Methodology for calculating the water balance of water bodies]. Moscow, MPR of Russia Publ., 2007. 41 p.
21. *Spravochnik po gidrokhimii* [Handbook of hydrochemistry]. Ed. by A.V. Nikanorov. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1989. 391 p.
22. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh groundwater in the main landscape zones of the Earth. *Geochemistry International*, 2008, vol. 46, no. 13, pp. 1285–1398.
23. RD 52.24.748-2010. *Usovershenstvovannaya metodika opredeleniya vynosa (perenos) zagryaznyayushchikh veshchestv s rechnym stokom* [An improved methodology for determining the removal (transfer) of pollutants with river runoff]. Rostov-on-Don, Roshydromet, FSBO «GHI», 2010. 65 p.
24. *Metodika razrabotki normativov dopustimyykh sbrosov veshchestv i mikroorganizmov v vodnyye obekty dlya vodopolzovateley* [Methodology for developing standards for permissible discharges of substances and microorganisms into water bodies for water users]. 31.07.2018. № 342. Moscow, Ministry of Nature Resources of Russia Publ., 2018. 35 p.
25. Moiseenko T.I. Bioavailability and ecotoxicity of metals in aqueous systems: critical levels of pollution. *Geochemistry*, 2019, vol. 64, no. 7, pp. 675–688. In Rus. DOI: 10.31857/S0016-7525647675-688.
26. Davydova M.I., Rakovskaya E.M., Tushinskiy G.K. *Fizicheskaya geografiya SSSR* [Physical geography of the USSR]. Moscow, Prosveshcheniye Publ., 1989. Vol. 1, 240 p.
27. Solntseva N.P. *Dobycha nefi i geokhimiya prirodnykh landshaftov* [Oil production and geochemistry of natural landscapes]. Moscow, Moscow State University Publ., 1998. 376 p.
28. Adam A.M. Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya territorii Zapadnoy Sibiri v tselyakh obespecheniya ekologicheskoy bezopasnosti v kontekste ustoychivogo prirodopolzovaniya [Assessment of the ecological state of the territory of Western Siberia in order to ensure environmental safety in the context of sustainable nature management]. *Okhrana prirody* [Nature Protection]. Tomsk, NTL Publ., 2005. pp. 1–12.
29. Pologova N.N., Lapshina E.D. Nakoplenie ugleroda v torfyanykh zalezakh Bolshogo Vasuganskogo bolota [Carbon accumulation in peat bog deposits of the Great Vasyugan]. *Bolshoe Vasuganskoe boloto. Sovremennoe sostoyanie i protsessy razvitiya* [Big Vasyugan bog. Current status and development]. Tomsk, Institute of Atmospheric Optics SB RAS Publ., 2002. pp. 174–179.
30. Minayeva T., Bleuten W., Sirin A., Lapshina E.D. Eurasian mires of the southern Taiga belt: modern features and response to Holocene Palaeoclimate. *Wetlands and Natural Resource Management. Ecological Studies*. Eds. J.T.A. Verhoeven, B. Beltman, R. Bobbink, D.F. Whigham. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2006. Vol. 190, pp. 315–341.
31. Savichev O.G., Markov M.L., Potapova T.M., Zadonskaya O.V. Ekologo-geokhicheskoe sostoyanie poverkhnostnykh vodnykh obektov v taezhnoy zone zapadnoy Sibiri i nekotorye voprosy normirovaniya antropogennoy nagruzki [The ecological and geochemical state of surface water bodies in the taiga zone of western Siberia and some issues of normalizing the anthropogenic load]. *Gidrometeorologiya i ekologiya: dostizheniya i perspektivy razvitiya. Trudy III Vserossiyskoy konferentsii* [Proceedings of the III Russian Conference. Hydrometeorology and Ecology: Achievements and Development Prospects]. St. Petersburg, Khimizdat Publ., 2019. pp. 754–757.
32. Savichev O.G. *Vodnye resursy Tomskoy oblasti* [Water resources of the Tomsk region]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2010. 248 p.
33. Savichev O.G., Zemtsov V.A., Pasechnik E.Y. Hydrologic conditions for chemical composition of the Siberian river waters. *Aktru: IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 232, pp. 1–6. DOI: 10.1088/1755-1315/232/1/012012.
34. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. P. I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 1970, no. 10 (3), pp. 282–290.
35. *Vodny kadastr. Resursy poverkhnostnykh i podzemnykh vod, ikh ispolzovaniye i kachestvo. 2017 god* [Water cadastre. Surface and groundwater resources, their use and quality. 2017 year]. St. Petersburg, Roshydromet Publ., 2018. 153 p.
36. *Sostoyanie geologicheskoy sredy (nedr) na territorii Sibirskogo federalnogo okruga v 2017 g.* Informatsionnyy byulleten [A condition of the geological environment (subsoil) in the territory of Siberian Federal District in 2017]. Ed. by V.A. Lgotin. Tomsk, Filial «Sibirskiy regionalnyy tsentr GMSN», FGBU «Gidrospegeologiya» Publ., 2018. Iss. 14, 178 p.
37. Lgotin V.A., Savichev O.G., Nigorozhenko V.Ya. *Sostoyanie poverkhnostnykh vodnykh obektov, vodokhozyaystvennykh sistem i sooruzheniy na territorii Tomskoy oblasti v 2000–2005 gg.* [The state of surface water bodies, water management systems and structures in the Tomsk region in 2000–2005]. Tomsk, OJSC Tomskgeomonitoring, AGRAP-PRESS, 2006. 88 p.
38. Guseva N.V. *Mekhanizmy formirovaniya khimicheskogo sostava prirodnykh vod v razlichnykh landshafno-klimaticheskikh zonakh gorno-skladchatykh oblastey tsentralnoy Evrazii.* Avtoreferat Diss. Dokt. nauk [The mechanisms of formation of the chemical composition of natural waters in various landscape and climatic zones of mountain-folded areas of central Eurasia. Dr. Diss. Abstract]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2018. 43 p.
39. *Trebovaniya k proizvodstvu i rezul'tatam mnogotselovogo geokhicheskogo kartirovaniya masshtaba 1:200000* [Requirements to production and results of multi-purpose geochemical mapping of scale 1:200000]. Ed. by E.K. Bkurenkov. Moscow, IMGRE Publ., 2002. 92 p.
40. Savichev O., Soldatova E., Rudmin M., Mazurov A. Geochemical barriers in oligotrophic peat bog (Western Siberia). *Applied Geochemistry*, 2020, vol. 113, pp. 1–11. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2019.104519.
41. SP 33-101-2003. *Opredelenie osnovnykh gidrologicheskikh kharakteristik* [Rulebook 33-101-2003. Definition of the main hydrological characteristics]. Moscow, Gosstroy Rossii Publ., 2004. 72 p.
42. GOST 19179-73. *Gidrologiya sushi. Terminy i opredeleniya* [Hydrology of sush. Terms and Definitions]. Moscow, Gosstandart of the USSR Publ., 1988. 47 p.
43. *Metodicheskie rekomendatsii po opredeleniyu raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik pri otsutstvii dannykh gidrometricheskikh nablyudeny* [Methodological recommendations for determining the estimated hydrological characteristics in the absence of hydrometric observations]. St. Petersburg, Nestor-Istoriya Publ., 2009. 193 p.
44. Moiseyeva Yu.A. *Izmeneniya podzemnogo stoka tayezhnoy zony Zapadnoy Sibiri v golotsene.* Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Changes in the underground runoff of the taiga zone of Western Siberia in the Holocene. Can. Diss. Abstract]. Tomsk, 2018. 22 p.
45. Savichev O.G., Lgotin V.A., Moiseyeva Yu.A. Conditions for changing groundwater levels of the upper hydrodynamic zone in the Tomsk region. *Geoecology, engineering geology, hydrogeology, geocryology*, 2018, no. 6, pp. 31–40. DOI: 10.1134/S0869780318060054. In Rus.
46. Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and drainage. Water Resources, Development and Management Service FAO*, 1998, no. 56, pp. 1–276.
47. Nguyen Van Luyen, Savichev O.G., Domarenko V.A., Quach Duc Tin. Improved method for hydrochemical exploration of mineral resources. *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 2017, no. 39 (2), pp. 167–180. DOI: 10.15625/0866-7187/39/2/9703.
48. SP 32.13330.2012. *Kanalizatsiya. Naruzhnye seti i sooruzheniya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.04.03-85* [Sewage. Pipe-

- lines and wastewater treatment plants. Updated version of SNiP 2.04.03-85]. Moscow, Ministry of Regional Development of Russia Publ., 2011. 84 p.
49. Levy J., Chesters G. Simulation of atrazine and metabolite transport and fate in a sandy-till aquifer. *Journal of contaminant hydrology*, 1995, no. 20, pp. 67–88.
  50. Savichev O.G. Investigation of the relationship between the chemical composition of water and bottom sediments of Siberian rivers. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 5, pp. 178–188. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2019/5/280.
  51. Kamneva O.A. *Mnogoletnie izmeneniya gidrogeologicheskikh usloviy Sredneobskogo basseyna*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Long-term changes in the hydrogeological conditions of the Central Ob basin. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2012. 20 p.
  52. RD 52.24.622-2017. *Poryadok provedeniya rascheta uslovykh fonovykh kontsentratsiy khimicheskikh veshchestv v vode vodnykh obyektov dlya ustanovleniya normativov sbrosov stochnykh vod* [Procedure for calculating the background concentrations of chemicals in the water of water bodies in order to establish standards for wastewater discharges]. Moscow, Rostov-on-Don, Rosgidromet, FGBU «SCHI» Publ., 2017. 96 p.
  53. Libera A., De Barros F.P.J., Faybishenko B., Eddy-Dilek C., Denham M., Lipnikov K., Moulton D., Maco B., Wainwright H. Climate change impact on residual contaminants under sustainable remediation. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2019, vol. 226, pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2019.103518.
  54. Berezin A.E., Bazanov V.A., Mineeva T.A., Berezina L.A. The effect of highly mineralized waters on the soil and vegetation cover in oil production areas. *Tomsk State University Bulletin*, 2008, no. 306, pp. 142–148. In Rus.
  55. Robinson B., Bolan N., Mahimairaja S., Clothier B. Solubility, mobility, and bioaccumulation of trace elements: abiotic processes in the rhizosphere. *Trace elements in the environment: biogeochemistry, biotechnology, and bioremediation*. Ed. by M.N.V. Prasad, Ravi Naidu, Kenneth S. Sajwan. New York, USA, Taylor & Francis Group, 2006. pp. 97–110.
  56. Domarenko V.A., Savichev O.G., Ulayeva S.S. Geochemical balance of the catchment of the small Ilbokich river (Angara basin, Central Siberia). *Exploration and protection of mineral resources*, 2019, no. 7, pp. 35–42. In Rus.
  57. GOST 17.1.1.01-77. *Okhrana prirody. Gidrosfera. Ispolzovaniye i okhrana vod. Osnovnye terminy i opredeleniya*. [Nature protection. Hydrosphere. Utilization of water and water protection. Basic terms and definitions]. Moscow, IPK Izdatelstvo standartov Publ., 2001. 30 p.
  58. GOST 25150-82. *Kanalizatsiya. Terminy i opredeleniya*. [Sewerage. Terms and Definitions. Sewerage. Terms and definitions]. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 1994. 13 p.
  59. Akhmed-Ogly K.V., Savichev O.G., Tokarenko O.G., Pasechnik E.Yu., Reshetko M.V., Nalivajko N.G., Vlasova M.V. Parameter calculation technique for the waste treatment facilities using naturally-aerated blocks in the bog ecosystems. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2014, vol. 21, pp. 1–6. DOI: 10.1088/1755-1315/21/1/012021.
  60. Prodous O.A., Mikhaylov A.V. The experience of using peat filtration technology for surface wastewater treatment. *Water supply and sanitary equipment*, 2019, no. 3, pp. 34–39. In Rus.
  61. Corzo A., Sanabria O. Adaptation of vegetation in high-rate constructed wetland using artificial carriers for bacterial growth: assessment using phytopathological indicators. *Journal of Water Process Engineering*, 2019, no. 32, pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.jwpe.2019.100974.
  62. *Vodnyy kodeks Rossiyskoy Federatsii* [Water code of the Russian Federation]. Dated 03.06.2004, no. 74-FZ. At 08/03/2018. Moscow, Kremlin, 2018. 48 p.
  63. Zhukov A.I., Mongayt I.L., Rodziller I.D. *Metody ochistki proizvodstvennykh stochnykh vod* [Wastewater treatment methods]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1977. 204 p.
  64. Sosnovskiy A.V. The use of natural cold for cleaning and desalination of salt water. *Plumbing, heating, air conditioning*, 2018, no. 6 (198), pp. 38–41. In Rus.
  65. Randall D.G., Nathoo J. Resource recovery by freezing: a thermodynamic comparison between a reverse osmosis brine, sea water and stored urine. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2018, vol. 26, pp. 242–249. DOI: 10.1016/j.jwpe.2018.10.020.
  66. Polyakova O.S., Semyonov S.Yu. Reconstruction experience of the wastewater treatment plant (Kargasok village, Tomsk region, Russia) using «constructed wetlands» technology. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 400, pp. 1–4. DOI: 10.1088/1755-1315/400/1/012020.
  67. Kofman V.Ya. Modern methods of nitrogen removal from wastewater (review). *Water supply and sanitary equipment*, 2019, no. 5, pp. 44–52. In Rus.
  68. Kuznetsova I.V., Timofeeva S.S. Green technologies in land reclamation for coal mining enterprises. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, no. 408, pp. 1–6. DOI: 10.1088/1755-1315/408/1/012075.
  69. Berezin A.E., Parshina N.V. Shchadyashchie metody rekultivatsii zemel na zabolochennykh territoriyakh [Mild land reclamation methods in wetlands]. *Pochvy v biosfere. Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii* [Soils in the biosphere. Materials of the All-Russian Scientific Conference]. Ed. by A.I. Syso. Novosibirsk, Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS Publ., 2018. pp. 303–307.
  70. *Rossiyskaya Federatsiya. Zakony. Ob okhrane okruzhayushchey sredy: feder. zakon ot 10.01.2002 № 7-FZ, s izmeneniyami na 29.07.2017* [Russian Federation. The laws. On Environmental Protection: Feder. Law of January 10, 2002 No. 7-FZ. (as amended on 07/29/2017)]. Moscow, Kremlin, 2018. 77 p.
  71. GOST 17.5.1.01-83. *Okhrana prirody. Rekultivatsiya zemel. Terminy i opredeleniya* [Protection of nature. Land reclamation. Terms and definitions]. Date of introduction 1984-07-01. Moscow, IPK Publ. House of Standards, 2002. 8 p.
  72. Savichev O.G., Mazurov A.K., Guseva N.V., Domarenko V.A., Khvashchevskaya A.A. Forecast of changes in the macrocomponent composition of wetland waters during iron ore mining in the Tomsk Region. *Geography and Natural Resources*, 2016, no. 1, pp. 94–102. In Rus.
  73. Bleuten W., Lapshina E., Ivens W., Shinkarenko V., Wiersma E. Ecosystem recovery and natural degradation of spilled crude oil in peat bog ecosystems of West Siberia. *International Peat Journal*, 1999, no. 9, pp. 73–82.
  74. Bazanov V.A., Savichev O.G., Volostnov D.V., Egorov B.A., Krutovoy A.O., Yazikov E.G. Effect of sludge pits on the geochemical state of wetland ecosystems in the Vasyugan River Basin. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2004, vol. 307, no. 2, pp. 72–75.
  75. Ivanov K.E. *Vodoobmen v bolotnykh landschaftakh* [Water exchange in mire landscapes]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1975. 280 p.
  76. Savichev O.G., Mazurov A.K., Semiletov I.P., Bazanov V.A., Guseva N.V., Khvashchevskaya A.A., Nalivayko N.G. Hydrogeochemical conditions of formation of oligotrophic bog ecosystems. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 2016, no. 5, pp. 60–69. In Rus. Available at: <http://dx.doi.org/10.15356/0373-2444-2016-5-60-69> (accessed 23 August 2019).
  77. Bradshaw R.H.M., Sykes M.T. *Ecosystem Dynamics. From the past to the future*. Chichester, West Sussex, UK, John Wiley & Sons, Ltd., 2014. 321 p.

Received: 17 February 2020.

#### Information about the authors

Oleg G. Savichev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Natalya V. Guseva, Dr. Sc., professor, head of the department, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 550.832, 550.834.05

## ИЗУЧЕНИЕ ЗОН АНОМАЛЬНОГО ПЛАСТОВОГО ДАВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ АНАЛИЗА АТТРИБУТОВ СЕЙСМИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Орехов Александр Николаевич<sup>1</sup>,  
orekhovan@mail.tomsknet.ru

Аmani Мангуа Марк М<sup>1</sup>,  
mangouam@yahoo.fr

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

*Бурение глубоких скважин во многих районах мира, особенно в трещинно-кавернозных коллекторах сталкивается с рядом проблем, часть из которых имеет геологическую природу, а часть – техническую. В частности, осложнения могут вызывать аномально высокие пластовые давления. В настоящее время зафиксирован рост числа скважин (в том числе и аварийных) с установленным аномально высоким пластовым давлением. По этой причине актуальность исследований в области прогноза зон с аномально высоким пластовым давлением, в частности для предотвращения аварийных ситуаций, возросла.*

*Повышенное внимание к изучению зон аномально высокого пластового давления и формированию механизма их прогноза начало уделяться в последней трети 20-го столетия. Изучалась геологическая природа и механизмы возникновения этих зон, пространственные закономерности их локализации. Кроме того, были предложены способы прогноза их появления, которые можно было бы использовать при проектировании скважин и в процессе бурения.*

*Авторами приведен анализ известной геологической информации о формировании и пространственной приуроченности зон аномально высокого пластового давления. Кроме того, показано, что с зонами аномально высоких пластовых давлений могут быть связаны значительные изменения сейсмических атрибутов.*

*Обобщенный анализ приведенных данных позволяет нам сказать, что зоны аномально высокого пластового давления достаточно широко распространены в осадочном чехле, в том числе и на участке нашего исследования. Существующая проблема связи аномально высокого пластового давления с сейсмическими атрибутами далека от окончательного решения.*

*Правильный прогноз оценки пластовых давлений дает возможность вести бурение в оптимальных режимах.*

*Задача прогнозирования зон аномально высокого пластового давления, дренирующих толщи коллекторов на этом месторождении насущна и актуальна, поскольку в настоящее время его разбуривание продолжается по сети эксплуатационных скважин*

**Цель:** использование сейсмические атрибуты для контроля и уточнения динамической модели резервуара; выявление зон аномально высокого пластового давления в разрезах месторождения углеводородов по данным сейсморазведки (сейсмическим атрибутам).

**Объекты:** породы со сложным строением пустотного пространства, обусловленным повышенными трещиноватостью и кавернозностью, которые образовались за счет тектонических дислокаций в осадочном чехле.

**Методы:** теоретическое и экспериментально обоснование связи зон аномально высокого пластового давления и сейсмических данных.

**Результаты.** Были построены карты вероятностей распределения пластового давления по площади в межскважинном пространстве на изучаемое месторождение.

### Ключевые слова:

Сейсмические атрибуты, геофизические исследования скважин, аномально высокие пластовые давления, анализ затухания амплитуд, куб псевдоакустического импеданса, средняя энергия, первая производная, атрибут преобразования Гильберта, мгновенная фаза, мгновенная частота, мгновенная амплитуда, мгновенное качество.

### Введение

Аномально высокие пластовые давления (АВПД) широко распространены на месторождениях углеводородов в трещинно-кавернозных коллекторах [1–3]. Наличие АВПД увеличивает естественную энергетику пластов, улучшает их коллекторские свойства. С другой стороны, неучет АВПД может привести к аварийным ситуациям при бурении [4–6].

Выход из этого положения заключается в создании системы методов, позволяющих прогнозировать и оценивать величину АВПД до их вскрытия и на этой основе проектировать конструкцию скважины, регулировать плотность промывочной жидкости в процессе бурения, обеспечивая минимально допустимую репрессию на пласт.

В зависимости от времени получения информации методы прогнозирования и оценки АВПД можно подразделить на следующие группы:

- 1) до начала бурения;
- 2) в процессе бурения;
- 3) после бурения скважин.

К первой группе относятся методы разведочной геофизики (преимущественно сейсморазведка) и геолого-геофизические наблюдения за процессом уплотнения толщи осадочных пород [7–9].

Исследователями [10] ранее было предложено несколько гипотез, так или иначе связывающих природу возникновения АВПД с нагрузками, обусловленными вышележащими породами. Однако существует и другая возможность – когда появление АВПД связано с

тектонической активностью Земли. Также возможно сочетание обеих причин.

Генезис аномально высоких давлений в течение геологического времени контролировался условиями седиментации на палеоконтинентальных шельфе и склоне, формой и литологией осадков, региональным и локальным сбросообразованием, захоронением и уплотнением, а также последующей структурной деформацией. Как было отмечено нами выше, природа возникновения АВПД разнообразна и, как правило, многофакторна. К основным причинам их появления можно отнести *пезометрический уровень флюидов, особенности структуры коллектора, подъем давления в коллекторе, скорость седиментации и условия осадконакопления, палеодавления, тектонические движения.*

#### **Закономерности формирования аномально высоких пластовых давлений**

В 1938 г. В.К. Иллинг впервые предположил [11], что основной причиной формирования АВПД является уплотнение глин под действием силы тяжести, если при этом происходит и отток флюида. В таком случае величина АВПД будет определяться скоростью осадконакопления и временем захоронения сформированных осадков.

Позднее Дж. Дикинсон (1953 г.) [11], М.К. Хьюберт и У. Раб (1959 г.) [11] развили предположения В.К. Иллинга, показав, что в таком случае возникновение АВПД связано именно с быстрым формированием глин, при котором флюид не может быть полностью отжат из глинистой толщи и оказывается внутри неё под повышенным давлением за счёт её веса. Ещё более детально этот механизм возникновения АВПД изучал Г.А. Бабалян (1953 г.) [11]. В своих работах [11] он показал, если пласт глин ещё не полностью уплотнён, но уже экранирован, то повышенные давления могут возникать при следующих условиях:

- при полном экранировании коллектора. Экранами могут выступать глинистые пласты, тектонические нарушения и др. В этом случае миграции флюида нет и всё давление, сформированное массой перекрывающей толщи, будет полностью передано на флюид;
- при уменьшении скорости миграции флюида до такой степени, что рост давления, связанного с перекрывающими отложениями, существенно больше спада давления, связанного с фильтрацией флюида из коллектора;
- при малом уровне миграции флюида из плохо проницаемой залежи, даже если она экранирована.

И.М. Губкиным зоны аномально высокого пластового давления изучались в Азербайджане [12]. Им было установлено, что процесс их формирования имеет определённые закономерности. Они приурочены главным образом к диапировым складкам и имеют акчагыльский возраст. Они образовались вследствие миграции глинистых толщ, характеризующихся повышенной пластичностью, из областей с повышенным давлением в области с пониженным давлением, проходя при этом через более молодые отложения. В ходе этого процесса к наиболее нарушенным ча-

стям разреза (ядра складок) выдавливались жидкие и газообразные флюиды. Если при этом скорость миграции флюидов из ядер складок была меньше скорости миграции в ядра складок, то в них происходило накопление флюида, сопряжённое с резким повышением давления. Если давление превышало критические значения, то происходил его выброс (извержение) с формированием факелов и грязевых потоков.

Справедливости ради надо отметить, что эта гипотеза (формирование АВПД в процессе латеральной миграции флюида синхронно с процессом осадконакопления) хотя и хорошо объясняет имеющиеся факты, доказательств не имеет. По нашему мнению, наиболее вероятным можно считать предположение о формировании АВПД под покровками в условиях прекратившегося осадконакопления (в той части разреза, где формируется АВПД).

По данным И.М. Губкина, процесс осадконакопления в исследуемом регионе (Апшеронская область) носил ритмичный характер, что и отразилось в разрезе осадочных пород. Он связывал эту ритмичность с ритмичностью колебательных движений Каспийской впадины в целом [12]. Несомненно, что всё вышесказанное будет характерно и для других складчатых областей.

О связи флюидонакопления с особенностями тектонического развития говорит и очевидная пространственная связь крупных и очень крупных месторождений с глобальными разломами. В их присутствии пласты становятся более крутопадающими. Одновременно происходит увеличение мощности области потенциальной нефтеносности. Для подобного типа месторождений в большинстве случаев характерна резко повышенная трещиноватость с разнонаправленными тектоническими сдвигами, чаще всего сбросового характера при их ступении в сводовой части положительных структур. Там амплитуда смещений максимальна. При этом к их периферии она уменьшается. Множественные нарушения, как правило, характеризуются небольшой амплитудой и являются поперечными. С поднятиями подобного типа связаны месторождения Каспийского региона и Персидского залива.

Продольные же нарушения с амплитудами до 1500–3000 м и более формируют блоковую (мозаичную) структуру залежей. Часто они сопряжены с мелкими сбросами и зонами дробления. Структуры такого типа известны в пределах Грозненского района, в Мексиканском заливе, во Вьетнаме, в Алжире и ряде других регионов.

*Для большинства рассмотренных гипотез характерной особенностью проявления АВПД является их тектоническая и неотектоническая активность [13–15]. Появление АВПД в этом случае связывается с разгрузкой давления по тектоническим нарушениям, сопровождаемой выходом флюида на поверхность.*

*Выявление зон АВПД.* Для решения этой задачи, важность которой обоснована нами выше, требуется набор геологических данных, включающих в себя информацию о геологическом строении разреза, наличии или отсутствии зон АВПД в пределах смеж-

ных площадей, а также данные об особенностях распределения пластовых давлений в разрезе изучаемой территории. Наличие этой информации позволяет выполнять прогноз АВПД с достаточной для практических целей точностью [16].

Прогнозировать существование зон АВПД с высокой точностью можно, очевидно, при условии знания геологического строения залежи, формирования зон АВПД в аналогичных близлежащих структурах, а также знания закономерности распределения пластовых давлений по разрезу осадочного чехла.

**Выявление зон АВПД по данным ГИС.** Анализ физических основ формирования АВПД позволяет утверждать, что оптимальной средой, в которой их выявление максимально достоверно, являющейся не коллекторы, а глины по причине того, что на петрофизическую характеристику коллекторов в существенной степени влияют: степень катагенеза органического вещества, его содержание в пластах, а также их флюидонасыщенность и пористость. В то же время, по мнению ряда авторов [17–19], наибольшей интенсивностью воздействия на вторичные петрофизические изменения отличаются геохимические наложено-эпигенетические процессы, такие как вторичные каолинизация и карбонатизация.

Для зон АВПД характерно понижение сопротивления, плотности, скорости упругих волн, повышение водородосодержания. В основе всех методик прогноза АВПД лежит изучение изменения геофизических и петрофизических характеристик глин с глубиной их залегания. Известно, что глины с глубиной уплотняются. Это приводит к увеличению их удельного электрического сопротивления, скорости пробега упругой волны, уменьшению водородосодержания и т. д. Вместе с тем глинистые покрывки залежей с АВПД практически всегда разуплотнены, что сопровождается уменьшением их удельного электрического сопротивления ( $V_{ЭС}$ ) и интервальной скорости ( $V_{инт}$ ) и отклонением от нормального закона изменения с глубиной других геофизических характеристик. По степени отклонения параметров от их «нормальных» для данной глубины значений судят о возможной величине пластового давления в нижезалегających коллекторах. В ряде случаев для них характерно понижение естественной радиоактивности и потенциалов самопроизвольной поляризации (ПС). Соответственно, для уверенного выделения этих зон необходимо использовать комплекс в составе: каротаж сопротивлений (КС), боковой каротаж (БК), гамма-гамма-каротаж (ГГКп), радиоактивности (гамма-каротаж ГК), потенциалов самопроизвольной (ПС), нейтронный (НК) и акустический (АК) каротаж. [20, 21].

**Опыт исследования зон АВПД по данным ГИС на эталонных объектах.** В качестве объектов исследования (эталонных объектов) нами были использованы материалы ГИС по двум различным месторождениям – Y и X. Оба расположены в пределах Томской области. Месторождения нефтегазоконденсатные. Характерным является различие в стратиграфической приуроченности флюидосодержащего интервала.

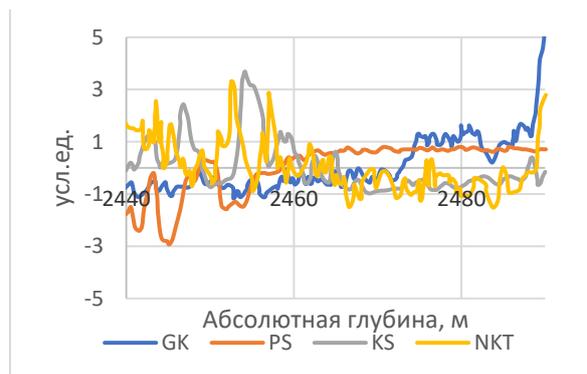


Рис. 1. Месторождение Y: интервал исследования 2440–2490 м

Fig. 1. Y field: exploration interval 2440–2490 m

На месторождении Y пласты-коллектора расположены на всю мощность юрских отложений и в коре выветривания доюрского комплекса (пласт М), где и сосредоточены основные запасы.

На месторождении X промышленно значимым является горизонт Ю<sub>1</sub>, расположенный непосредственно под Баженовской свитой, которая является региональным флюидоупором и, кроме того, нефтематеринской породой.

#### Месторождение Y

Исследование проводилось в скважине № 5 Y месторождения, интервал исследования расположен ниже баженовской свиты на глубине 2500–2550 м, представлен георгиевской и частью васюганской свиты. По нормированным значениям показаний геофизических методов (а именно КС, ГК, ПС, ГГКп и НК) были построены зависимости от глубины (рис. 2).

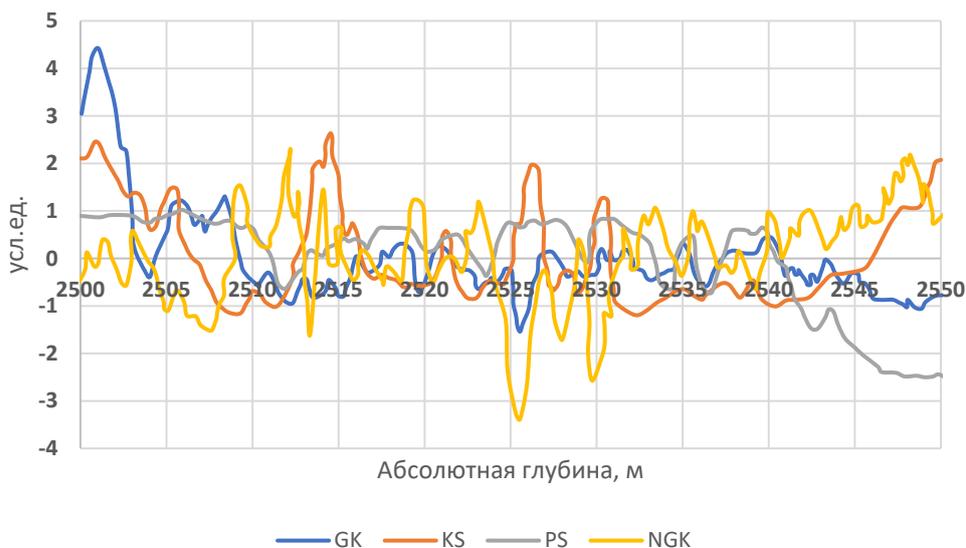
Дальнейшие исследования проводились в интервале глубин 2440–2490 м, расположенном выше баженовской свиты, он соответствует низам куломзинской свиты. До глубины 2460 м наблюдается расхождение кривых (рис. 1), однако это обусловлено изменениями литологического состава. В неизменной части разреза зоны АВПД отсутствуют (или не могут быть выделены).

Таким образом, на месторождении Y зоны АВПД не выделяются. Их типоморфные признаки отсутствуют как в перекрывающих глинистых образованиях куломзинской свиты, так и в подстилающих баженовскую свиту аргиллитах васюганской свиты. Предположительно, зон АВПД нет и в баженовской свите.

В соответствии с принятой моделью выделение зон АВПД по данным ГИС, в данном интервале исследования зоны АВПД отсутствуют или же не могут быть выделены.

#### Месторождение X

На месторождении X нами анализировались данные только по аргиллитам куломзинской свиты. Причиной этого являются широко проявленные изменения геофизических характеристик верхней части баженовской свиты. Эти изменения вызваны пластами горизонта Ю<sub>1</sub>.



**Рис. 2.** Месторождение Y: интервал исследования 2500–2550 м  
**Fig. 2.** Y field: exploration interval 2500–2550 m



**Рис. 3.** Куломзинская свита месторождения X  
**Fig. 3.** Kulomzinsk formation of X field

Результаты выявления зон АВПД в куломзинских аргиллитах приведены на рис. 3. Очевидно, что по данным ГИС в анализируемом разрезе хорошо видна контрастная зона АВПД мощностью более 20 м. Также необходимо отметить следующее.

1. Структура распределения физических параметров весьма сложная. Поэтому для их анализа необходимо использовать только нормализованные данные. Также очевидно, что исключение из комплекса данных результатов каких-либо методов приводит к значительному снижению достоверности прогноза. По этой причине возможно, что достаточно часто ранее при анализе данных ГИС эти зоны не выделялись в силу недостаточности информации.

2. С зонами АВПД пространственно ассоциируют зоны карбонатизации. Это области нарушений взаимоотношений между геофизическими параметрами: повышение электрического сопротивления, понижение водородосодержания, радиоактивности и ПС. По изменению ГК и ПС карбонатизация схожа с АВПД, поскольку и тот и другой процесс изменяют базовые глинистые характеристики, по изменению электрического сопротивления и водородосодержания – резко противоположные процессы. Изучение причин возникновения этой пространственной связи требует масштабных и всесторонних исследований.

#### **Обнаружение зон АВПД по данным сейсморазведки: атрибутивный анализ сейсмических данных**

Значения пластового давления в зонах АВПД, как и глубина залегания их кровли, сегодня достаточно уверенно прогнозируются по сейсморазведочным данным [22–25]. По существу, это единственный существующий сегодня метод с доказанной результативностью. Причём к его несомненным достоинствам относится возможность прогноза зон АВПД на этапе проектирования скважин, что позволяет существенно уменьшить вероятность появления аварийных ситуаций, связанных с АВПД.

*Краткая сейсмогеологическая характеристика изучаемого месторождения.* Х газоконденсатное месторождение (ГКМ), изученное в пределах одноименного лицензионного участка, отличается, с одной стороны, гигантскими запасами углеводородного сырья, а с другой – сложным для разведки и эксплуатации геологическим строением. Наличие в осадочном чехле тектонических дислокаций является причиной рапопроявлений и аномальных пластовых давлений флюидных систем рапа/газ в средней части разреза.

#### **Физико-геологическое обоснование прогнозирования зон АВПД по сейсмическим атрибутам**

Как было показано выше, основной причиной возникновения зон АВПД главным образом служит явление уплотнения глин в процессе осадконакопления. Соответственно, для их успешного прогнозирования необходимо изучение закономерностей изменения свойств пород в ходе процесса уплотнения. При этом очевидно, что наиболее достоверным индикатором будут являться чистые глины, в силу их особой чувствительности к наличию зон АВПД, что проявляется в изменении скорости пробега упругих волн [26, 27]. В силу этого данные сейсморазведки широко используются для этих целей, хотя изменение скоростей может быть связано с литологической изменчивостью пород, наличием нефти, и другими причинами.

Таким образом, основными критериями прогноза АВПД [28, 29] являются *аномально повышенные значения коэффициента Пуассона, температуры и пористости и аномально пониженные значения объёмной плотности, эффективного напряжения и интервальных скоростей.*

*Относительный акустический импеданс (Relative Acoustic Impedance – RAI).* Атрибут отображает видимый акустический контраст, указывающий на последовательные границы, поверхности несогласия, неоднородности. Также он может указывать на пористость или содержание и состояние флюида в коллекторе.

Акустический импеданс чувствителен к низким значениям пористости. Он может быть использован для моделирования зон с достаточно высокой [30, 31] пористостью. Это связано с наличием трещинно-кавернозных коллекторов. Как было сказано выше, зона АВПД выделяется достаточно уверенно таким свойством коллекторов, как высокая пористость. Выполнена интерпретация материалов сейсморазведки

3D МОГТ, где ставилась задача прогнозирования зон АВПД. На рис. 4. приведен горизонтальный срез куба RAI по горизонту Ю<sub>1</sub>. В юрском интервале, в глинистых сланцах (баженовская свита), зона АВПД связана с вторичной пористостью. Там же за счет наличия коллекторов трещиноватых типов наблюдается высокая дифференциация атрибута в продуктивном интервале.

*Пороговое значение амплитуды (Threshold value).* Атрибут рассчитывает процент дискретов, удовлетворяющих выбранному геологическому условию. Например, амплитуды могут анализироваться на основе критериев, определённых для коллекторов трещинно-кавернозных типов. Амплитуды в сейсмических данных могут анализироваться с использованием заданных пороговых значений. Часто они обозначают изменение *пористости или состояние флюида.* Мощность по кривым рассчитывается с использованием срезов пористости, насыщенности и толщины, которые влияют на сейсмический сигнал. Сейсмические данные при определённых условиях позволяют получать общую пористость и общую мощность. На практике можно рассчитать RAI по нуль фазовым данным и затем использовать полученные пределы для улучшения корреляции между сейсмическими атрибутами и эффективной *мощностью, насыщенностью и т. п. и пластовым давлением.*

Над зоной АВПД тренды свойств глин остаются практически такими же, как тренды в случае мягкого появления аномального давления, но ниже они значительно различаются. В случае мягкого появления АВПД значения плотности под зоной АВПД характеризуются более или менее прогнозируемым трендом, тогда как в случае жесткого появления значения плотности могут увеличиваться, уменьшаться или оставаться постоянными. Помимо этого, скорость значительно снижается, когда аномальное давление появляется в рамках жесткого сценария.

*Анализ атрибута затухания амплитуды  $t^*$  (Attenuation)* – запатентованный сейсмический атрибут для выявления трещиноватых зон в сейсмическом кубе, основан на затухании частот в окне. Затухание связано с плотностью трещин и вертикальной толщиной трещиноватой зоны [32, 33]. Трещины подавляют высокие частоты, таким образом, сопоставление частот выше и ниже трещиноватой зоны фиксирует локальный сдвиг по отношению к низкой частоте. Теория гласит, что поглощение частот будет происходить следующим образом: для высоких частот в трещинах, наполненных газом, а для низких частот в трещинах, наполненных флюидом.

На рис. 5 можно наблюдать хорошую корреляцию атрибута *затухание амплитуды  $t^*$*  с наблюдаемой зоной повышения трещиноватости. Происхождение АВПД чаще всего не может быть объяснено какой-либо одной причиной и чаще всего является многофакторным. Например, анализ сочетания вторичной пористости с уменьшением плотности может позволить более уверенно производить интерпретацию аномалии АВПД.

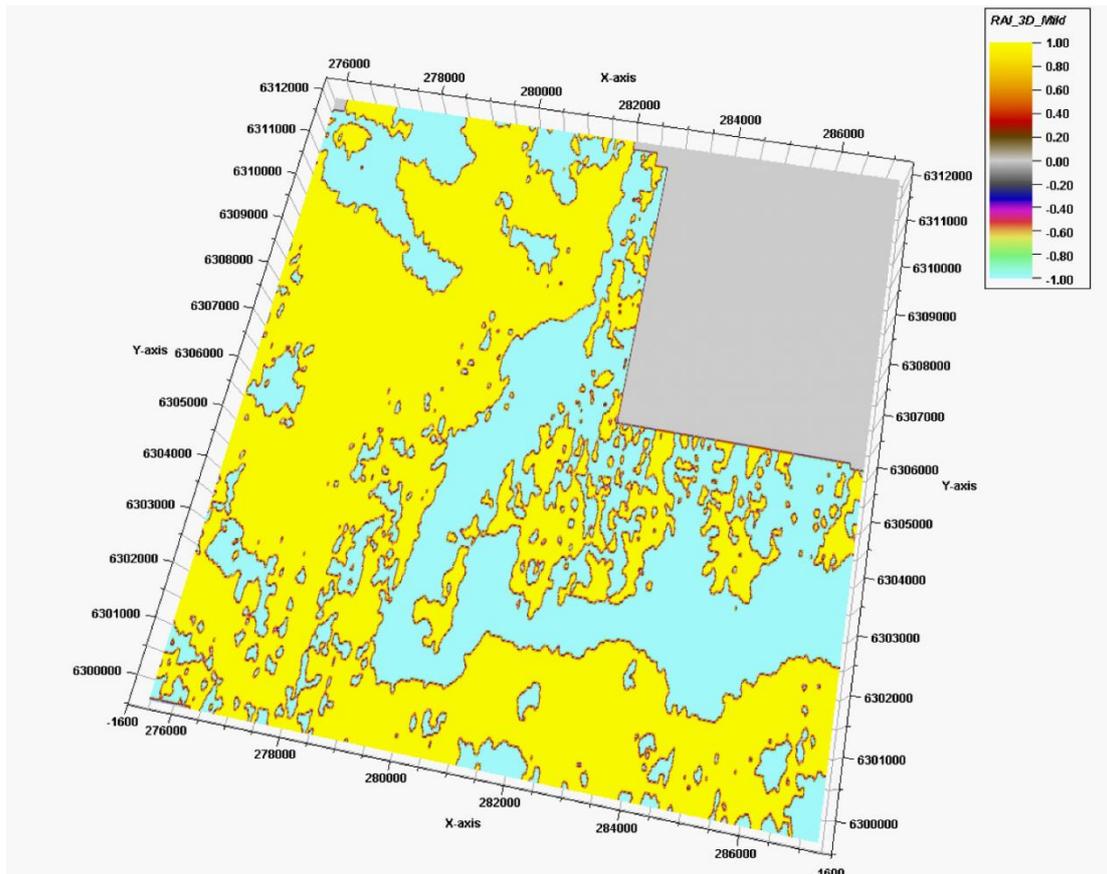


Рис. 4. Горизонтальный срез куба RAI по горизонту Ю<sub>1</sub>, юрский интервал месторождения X  
Fig. 4. Slice of the RAI cube along the horizon J<sub>1</sub>, Jurassic interval of the X field

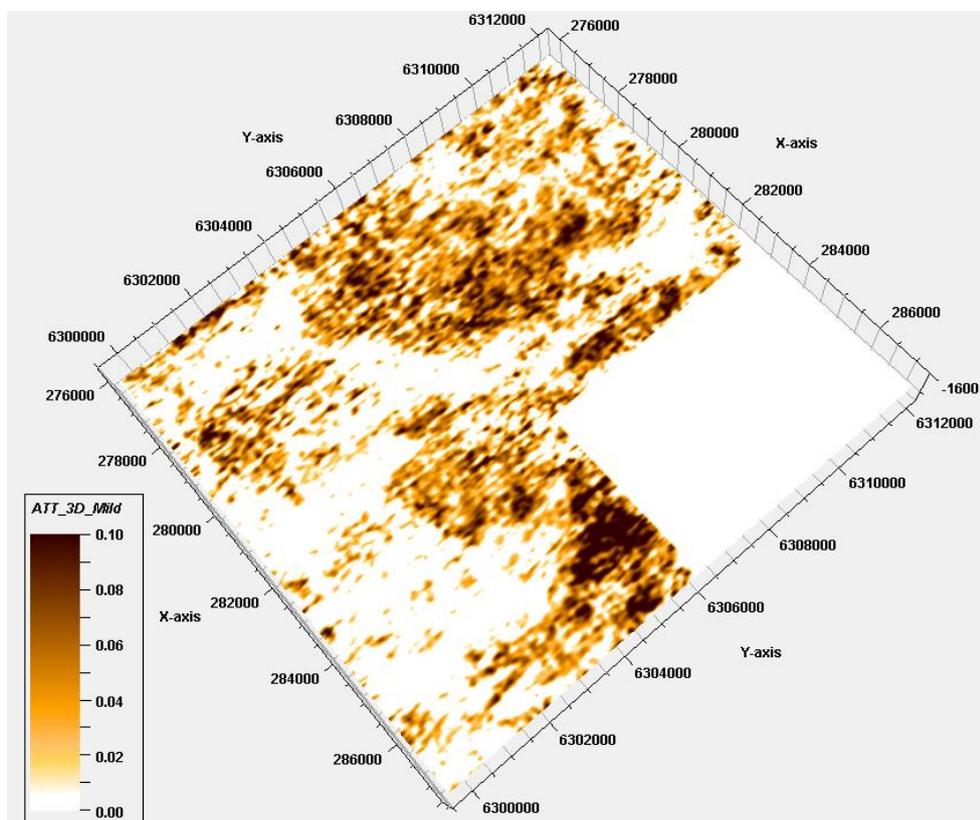


Рис. 5. Горизонтальный срез куба t\* по горизонту Ю<sub>1</sub>, юрский интервал месторождения X  
Fig. 5. Slice of the t\* cube along the horizon J<sub>1</sub>, Jurassic interval interval of the X field

Локальные изменения интервальных скоростей имеют очевидную связь с зонами АВПД и приурочены к основным структурным поднятиям. Зона АВПД имеет региональное распространение, и в сводах структур наблюдаются подъемы аномальных изобар, изменения с глубиной скоростей ОГТ. Анализ сейсмических интервальных скоростей является основой для инженеров-буровиков при составлении программ расчета веса бурового раствора (С.Е. Хоттман и Р.К. Джонсон, 1965 г. [34]; Е.С. Пеннбейкер, 1968 г. [35]; Н.С. Дутта и Ф.К. Левин, 1987 г. [36]). Это очень упрощенная связь интервальной скорости с эффективным давлением, которая требует лишь небольшой настройки под реальные полевые условия. Ожидаемые свойства пород ниже характерных для зоны АВПД зависят не только от эффективного давления, но также и от факторов окружающей среды, вызывающих АВПД.

Часто для этого используется информация о характере изменения с глубиной скоростей ОГТ [37], которые пересчитываются в зависимости от интервальных скоростей с глубиной. Если градиент увеличения интервальных скоростей уменьшается или становится отрицательным (интервальная скорость уменьшается с глубиной), то по этому признаку и прогнозируют местоположение кровли АВПД.

*Атрибут преобразования Гильберта.* Сейсмические атрибуты – это информация, рассчитанная по сейсмической трассе. Сейсмические данные могут быть разделены на компоненты, такие как: энергия, частота, амплитуда и фаза. М.Т. Танер и Р.Е. Шериф (1976) вводят понятие атрибутов комплексной трассы для сейсмической записи [38]. Наиболее информативные из них следующие:

*Мгновенная частота (Instantaneous Frequency)* – это оценка изменения мгновенной фазы. Результатом расчета этого атрибута является мгновенная центральная или средняя частота спектра. Мгновенная частота не зависит от фазы и амплитуды и может быть полезна при определении коллекторских свойств пород, для выделения зон трещиноватости и изменения мощности, а также латеральных изменений в литологии. Мгновенная частота по сравнению с исходными амплитудами имеет более высокое разрешение, что может быть полезно при выделении небольших локальных изменений.

*Мгновенная фаза (Instantaneous Phase)* – это достаточно сложная функция, которая с одинаковым успехом выделяет слабые и сильные отражения. Мгновенная фаза – это хороший индикатор неразрывностей, разломов, пластов, последовательных границ и т. п.

*Мгновенное качество (Instantaneous Quality).* При прохождении через нижние горизонты амплитуда и форма сейсмической волны изменяются. Эти изменения содержат важную информацию о строении среды. Изменения вызваны такими факторами, как геометрическое расхождение фронта волны, коэффициентами отражения/прохождения, которое происходит на неоднородностях, и потери энергии вследствие неупругих процессов или внутреннего трения во время прохождения волны.

В идеально однородной среде амплитуда акустической волны при прохождении затухает с расстоянием и определяется как дробь  $1/r$ , где  $r$  – это расстояние, обусловленное геометрическим расхождением. Это затухание амплитуды обратно пропорционально расстоянию. Неупругость среды дополнительно ослабляет амплитуду волны вследствие неупругого затухания.

Скорость затухания показывает, насколько затухает амплитуда вследствие неупругости. Мгновенный фактор качества может служить признаком наличия флюида и его состояния и используется для оценки поглощающих свойств резервуара. Этот атрибут может быть использован для выделения газовых залежей и зон трещиноватости и зон АВПД.

На рис. 6 показан горизонтальный срез куба мгновенного фактора качества. Можно обратить внимание на корреляцию аномалий этого параметра с тектоническими нарушениями – эти изменения связаны с многими факторами, которые могут быть признаками АВПД. Этот атрибут хорошо согласуется с изменением формы сейсмического сигнала атрибутов, поэтому можно более уверенно выделить зоны с АВПД.

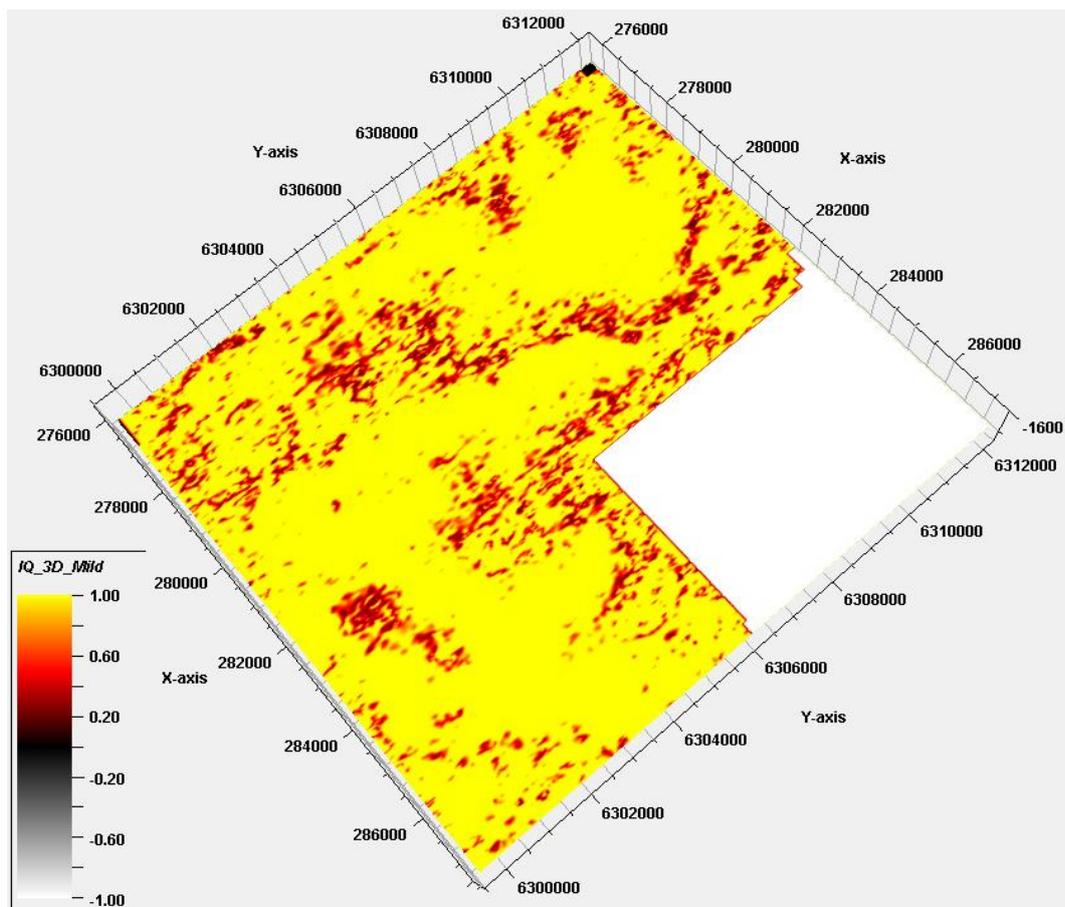
#### Заключение

Геологическое строение разреза нефтегазовых регионов Западной Сибири вполне благоприятно для прогнозирования зон АВПД. Считается, что появление зон с повышенным пластовым давлением является положительным признаком при оценке потенциала территории на углеводородное сырьё. А сами эти зоны возникают как следствие влияния комплекса факторов.

Происходящий сегодня в Западной Сибири переход к изучению доюрского фундамента предполагает усложнение горно-геологических условий и, как следствие, условий бурения и рост аварийности скважин за счёт увеличения числа вскрываемых глинистых покрышек, находящихся в напряжённом состоянии.

Повышение эффективности прогноза появления зон АВПД позволит избежать существенных технических, экономических и экологических проблем, которые могут возникать в случае аварий, вызванных неконтролируемым попаданием скважины в зону АВПД. Наличие такого прогноза позволяет вскрывать пласт «на равновесии», что позволит если не исключить полностью, то существенно снизить аварийность при бурении.

Ещё одним большим плюсом прогнозирования зон АВПД является возможность повышения качества оценки коллекторских свойств. Залежи в трещинно-кавернозных коллекторах характеризуются аномально высокими пластовыми давлениями. Бурение скважин, вскрывающих залежи углеводородов с АВПД, сопряжено с технологическими трудностями, поэтому информации о наличии зон АВПД необходимо иметь заранее для выбора оптимальной плотности бурового раствора с целью исключения его аварийного выброса или поглощения.



**Рис. 6.** Мгновенный Фактор Качества по горизонту  $J_1$ , юрский интервал месторождения X  
**Fig. 6.** Slice of the Instantaneous Quality cube along the horizon  $J_1$ , Jurassic interval of the X field

Основные результаты проведенных исследований сводятся к следующему. По результатам геофизических исследований скважин могут быть выделены зоны АВПД при нормализации показаний бокового каротажа, нейтронного гамма-каротажа, гамма-каротажа и каротажа потенциалов самопроизвольной поляризации. АВПД по данным геофизических исследований скважин является наиболее точным инструментом в условиях ограниченности данных. Применение интерполяции параметров между неравномерно кучно расположенными скважинами является грубым инструментом для такого изменчивого по латерали разреза.

Нами предложен алгоритм прогноза зон АВПД залежей углеводородов на основе анализ сейсмоза-

дочных данных. В рассмотренном примере для определения значимости аномалий амплитуд необходима локальная калибровка практических методов исследования по скважинам и априорная информация, которая часто отсутствует из-за малого количества скважин.

Данные сейсмозащитки позволяют решать задачи прогнозирования зон АВПД, но область применения этих зависимостей ограничена исследуемой территорией и поэтому хотелось бы заранее предупредить, что требующие дальнейшего обсуждения результаты не только в значительной степени зависят от литологии, но также сильно зависят от локальных условий и не должны экстраполироваться на другие регионы без перекалибровки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Медведев А.И., Минеев А.В. Бурение скважин. основные технические проблемы и методы их решения // Научное обозрение. – 2017. – № 12. – С. 16–18.
2. Леонтьев Д.С., Касов А.М., Цедрик Н.С. Технология ликвидации конуса газа в нефтедобывающей скважине // Булатовские чтения. – 2017. – Т. 2. – С. 142–147.
3. Поспелков М.С., Трусов А.И. Оперативная оценка аномально высоких пластовых давлений на месторождениях Надым-Пуртазовского региона // Каротажник. – 2017. – № 11 (281). – С. 126–133.
4. Chilingarian G.V., Serebryakov V.A., Robertson J.O. Jr. Origin and prediction of abnormal formation pressures. – USA: Elsevier, 2002. – 390 p.
5. Хисматуллин Р.М. Анализ прогнозирования аномально-высоких пластовых давлений на примере Ямбургского НКМ // Новые технологии – нефтегазовому региону: материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Новый Уренгой, 2017. – С. 81–83.
6. Долгов С.В. Проблемы бурения в условиях высокой пластовой температуры и аномально высоких пластовых давлений // Бурение скважин в осложненных условиях: Тезисы докладов III Международной научно-практической конференции. – СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2018. – С. 37–39.
7. Fertel W.H. Abnormal formation pressures: implication to exploration, drilling and production of oil and gas resources. – Amsterdam; Oxford; New York: Elsevier, 1976. – 382 p.

8. О механизмах возникновения зон с аномально высоким пластовым давлением и методах их прогнозирования в неразрабатываемых пластах на примере Приобского месторождения / А.И. Исламов, Р.П. Фасхутдинов, Д.Ю. Колупаев, С.А. Верещагин // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 10. – С. 54–59.
9. Коротаев Б.А., Васёха М.В., Онуфрик А.М. Способ оценки пластового давления при разведочном бурении // Вестник Мурманского государственного технического университета. – 2017. – Т. 20. – № 1-1. – С. 104–110.
10. Swarbrick R.E., Osborne M.J. Mechanisms that generate abnormal pressures: an overview // AAPG memoir. – 1998. – № 70. – P. 13–34.
11. Бабаян Г.А. О факторах, обуславливающих аномально высокие начальные давления в пластах // Тр. нефт. экспед., Баку. – 1953. – № 1. – С. 87–93.
12. Губкин И.М. Мировые запасы нефти // Международный геологический конгресс. СССР. Труды 17-й сессии. – М.: ГОНТИ, 1939. – Т. 1. – С. 167–179.
13. Головачев Э.М. О Закономерностях проявления и способах прогноза величины АВПД в осадочных толщах акваторий // Булатовские чтения. – 2017. – Т. 1. – С. 51–55.
14. Slavin V.I., Smirnova E.M. Abnormally high formation pressures: origin, prediction, hydrocarbon field development, and ecological problems // AAPG memoir. – 1998. – № 70. – С. 105–114.
15. Курмангалиев С.Б., Бражник А.Ю., Толстикова В.Е. Закономерность формирования аномально высоких пластовых давлений // Современные условия взаимодействия науки и техники: Сборник статей Международной научно-практической конференции / Отв. ред. А.А. Сукиасян. – Омск, 2017. – С. 17–19.
16. Prediction of abnormally high formation pressures (AHFP) in petroliferous salt-bearing sections / V.I. Zilberman, V.A. Serebryakov, M.V. Gorfunkel, G.V. Chilingar // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2001. – V. 29. – № 1. – P. 17–27.
17. Мельник И.А. Определение интенсивности вторичных геохимических процессов на основе статистической интерпретации материалов ГИС // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2012. – № 11. – С. 35–41.
18. Качинская И.В. Влияние литолого-минералогического состава и постседиментационных процессов на фильтрационно-емкостные свойства терригенных коллекторов на примере месторождений нефти и газа Восточной и Западной Сибири: автореферат диссертации. ... канд. геол.-минерал. наук. – Тюмень, 2013. – 16 с.
19. A kaolinitic weathering crust in Tomsk, west Siberia: interpretation in the context of weathering crusts in Russia and elsewhere / M.V. Shaldybin, M.J. Wilson, E.S. Kondrashova, I.V. Ryckova, M.A. Rudmin, L. Wilson, Y.M. Lopushnyak, P.B. Molokov, A.V. Muslimova // Catena. – 2019. – V. 181. – P. 104056–104059.
20. Аксельрод С.М. Интегрированные геофизические исследования в процессе бурения с целью прогноза порового давления и геологического разреза впереди долота (по материалам зарубежных публикаций) // Каротажник. – 2017. – № 1 (271). – С. 69–104.
21. Александров Б.Л., Моллаев З.Х., Шилов Г.Я. Повышение эффективности геологоразведочных работ и снижение геологических рисков при поисках нефти и газа на территории Сибири и арктического шельфа // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 3. – С. 8–12.
22. Прогноз по данным сейсмических исследований аварийных и экологически опасных ситуаций бурения глубоких скважин / О.Л. Кузнецов, И.А. Чиркин, А.А. Радван, А. Исмаил, С.М. Карнаухов, Е.Г. Ризанов // Сейсмические технологии: материалы научно-практической конференции. – М.: ООО «Центр анализа сейсмических данных МГУ имени М.В. Ломоносова», 2017. – С. 69–72.
23. Симачков А.Ю. Аномальное поведение сейсмических волн в зонах АВПД на территории западной Сибири // Состояние, тенденции и проблемы развития нефтегазового потенциала Западной Сибири: Материалы международной академической конференции / отв. ред. С.И. Грачёв. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2018. – С. 23–29.
24. Chopra S., Rao M.R. Surface seismic data identifies shallow high-pressure drilling hazards // World Oil. – 1995. – V. 216. – № 1. – P. 47–49.
25. К вопросу прогноза зон аномально высоких пластовых давлений в разрезе баренцево-карского шельфа с учетом данных бурения и сейсморазведки / В.Н. Бородкин, О.А. Смирнов, А.П. Курчиков, А.В. Лукашов, А.С. Недосекин, А.В. Погрецкий, А.С. Смирнов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2019. – № 4 (328). – С. 12–19.
26. Abnormal formation pressures in the west Siberian mega-basin, Russia / V.M. Matusevich, G.P. Myasnikova, E.M. Maximov, A.M. Volkov, N.F. Chistiakova, V.G. Kanalin, M. Pupilli // Petroleum Geoscience. – 1997. – V. 3. – № 3. – P. 269–283.
27. Gorbunov P.A. Reservoir pressures of the northern part of West Siberia and their main features // Новые технологии – нефтегазовому региону: материалы международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2017. – С. 291–294.
28. Prediction of pore pressures based on the depth-velocity model for the Bolshekhetskaya trough / M.A. Obukhova, I.K. Kouznetsov, M.K. Sazikin, D.V. Mitkalev, A.A. Kachkin // Geomodel: 17<sup>th</sup> Scientific-practical conference on oil and gas geological exploration and development. – Gelendzhik, Russia, 2015. – P. 483–487.
29. Experimental study and field application of fiber dynamic diversion in west china ultra-deep fractured gas reservoir / H. Fu, Y. Yan, Y. Xu, T. Liang, Y. Liu, B. Guan, X. Wang, D. Weng, J. Feng // 52<sup>nd</sup> U.S. rock mechanics/geomechanics symposium. – Seattle, Washington, 2018. – P. 1–8.
30. Meijuan Jiang, Spikes K.T. Rock-physics and seismic-inversion based reservoir characterization of the Haynesville Shale // Journal of Geophysics and Engineering. – June 2016. – V. 13. – Iss. 3. – P. 220–233.
31. Reservoir characterization applying seismic inversion technique and seismic attributes for Komombo basin / A.A.A. Othman, H.F. Ewida, M.M. Ali Fathi, M.M.A.A. Embaby // Austin J Earth Sci. – 2017. – V. 3 (1). – P. 1–6.
32. Ilyas Juzer Najmuddin. Austin chalk fracture mapping using frequency data derived from seismic data: PhD thesis. – Texas, 2003. – 69 p.
33. Method and system, and program storage device for analyzing compressional 2D seismic data to identify zones of open natural fractures within rock formations: U.S. Patent. US 6,941,228 B2. – Sep. 6 2005. – 27 p.
34. Hottman C.E., Johnson R.K. Estimation of formation pressures from log derived shale properties // J. Pet Technol. – 1965. – № 17. – P. 717–722.
35. Pennebaker E.S. Seismic data indicate depth, magnitude of abnormal pressures // World Oil. – June 1968. – P. 73–78.
36. Dutta N.C. Geopressure prediction using seismic data: current status and the road ahead geopressure // Geophysics. – 2002. – V. 67. – Iss. 6. – P. 1692–2041.
37. Аристархов А.В., Керусов И.Н., Соколова М.С. Прогноз порового давления на основе сейсмических скоростей для целей бурения поисково-разведочных скважин // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2019. – № 2. – С. 47–57.
38. Taner M.T., Sheriff R.E. Application of amplitude, frequency and other attributes to stratigraphic and hydrocarbon determination // AAPG Memoir. – 1977. – № 26. – P. 301–328.

Поступила 23.03.2020 г.

#### Информация об авторах

**Орехов А.Н.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Аmani Мангуа Марк М.**, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

УДК 550.832, 550.834.05

## STUDYING THE ABNORMAL FORMATION PRESSURE ZONES BY ANALYZING SEISMIC FIELD ATTRIBUTES ON THE EXAMPLE OF WESTERN SIBERIA DEPOSITS

Alexander N. Orekhov<sup>1</sup>,  
orekhovan@mail.tomsknet.ru

Amani Mangoua Marc M<sup>1</sup>,  
mangouam@yahoo.fr

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

Deep wells drilling in many parts of the world, especially in fractured cavernous reservoirs, faces a number of difficulties, both of technical and geological nature such as, the manifestations of abnormally high formation pressure. With the increase in the number of wells with abnormally high formation pressure, and the number of cases of emergency situations, it became absolutely necessary to study this problem in order to prevent negative consequences.

The proper study of abnormally high formation pressure started in the late 70-s to the 90-s of the last century. The geological features, patterns, mechanisms for formation of abnormally high formation pressure were studied and various techniques and methods for assessment of reservoir pressures both before and during well drilling were developed.

This article analyzes geological information on the development and distribution of abnormal pressures. It is shown that zones of abnormally high formation pressures can be associated with significant changes in the seismic field, that is, seismic attributes.

The generalized analysis of presented data allows determining that the zones of abnormally high formation pressure are quite widespread in the sedimentary cover, including in the area of the study. The existing problem of the connection of abnormally high formation pressure with seismic attributes is far from the final solution.

A correct forecast of formation pressure assessment makes it possible to conduct drilling in optimal conditions.

The task of the prediction of abnormally high formation pressure zones draining reservoir strata in this field is relevant and urgent, since at present it is being drilled through a network of production wells.

**The aim** of the research is the use of seismic attributes to control the development and refinement of a dynamic tank model; identification of abnormally high formation pressure zones in the sections of the hydrocarbon field according to seismic data (seismic attributes).

**Objects:** rocks with a complex structure of the void space due to intense cavernosity and fracturing formed at the expense of tectonic dislocations in the sedimentary cover.

**Methodology:** theoretical and experimental justification of the connection of abnormally high formation pressure zones and seismic data.

**Results.** The authors have constructed the maps of reservoir pressure distribution across the area in the interwell space for gas condensate field under study.

### Key words:

Seismic attributes, well logging, abnormally high formation pressure, analysis of amplitude attenuation, pseudo-acoustic impedance cube, average energy, first derivative, Gilbert transform attribute, instantaneous phase, instantaneous frequency, instantaneous amplitude, instantaneous quality.

### REFERENCES

1. Medvedev A.I., Mineev A.V. Burenie skvazhin. Osnovnye tekhnicheskie problemy i metody ih resheniya [Drilling of wells. Main technical problems and methods for their solution]. *Scientific Review*, 2017, no. 12, pp. 16–18.
2. Leontyev D.S., Kasov A.M., Zedrik N.S. Tekhnologiya likvidatsii konusa gaza v neftedobyvayushchey skvazhine [Technology of liquidation of the gas cons in the oil-welling well]. *Bulat readings*, 2017, vol. 2, pp. 142–147.
3. Pospelkov M.S., Trusov A.I. Operativnaya otsenka anomalno vysokikh plastovyykh davleniy na mestorozhdeniyakh Nadym-Pur-Tazovskogo regiona [Fast estimation of abnormally high formation pressures in the fields of Nadym-Pur-Taz]. *The Logger*, 2017, no. 11 (281), pp. 126–133.
4. Chilingarian G.V., Serebryakov V.A., Robertson J.O. Jr. *Origin and prediction of abnormal formation pressures*. USA, Elsevier, 2002. 390 p.
5. Khismatullin R.M. Analiz prognozirovaniya anomalno-vysokikh plastovyykh davleniy na primere Yamburgskogo NGKM [Analysis of prediction of abnormally high reservoir pressures on the example of the Yamburg NGKM]. *Novye tekhnologii – neftegazovomu region. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [New technologies – to the oil and gas region. Materials of the International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists]. New Urengoy, 2017. pp. 81–83.
6. Dolgov S.V. Problemy bureniya v usloviyakh vysokoy plastovoy temperatury i anomalno vysokikh plastovyykh davleniy [Problems of drilling in conditions of high reservoir temperature and abnormally high reservoir pressures]. *Burenie skvazhin v oslozhnennykh usloviyakh. Tezisy dokladov III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Drilling wells in difficult conditions. Abstracts of the III International Scientific and Practical Conference]. St. Petersburg, St. Petersburg Mining University, 2018. – P. 37–39.
7. Fertel W.H. *Abnormal formation pressures: implication to exploration, drilling and production of oil and gas resources*. Amsterdam, Oxford, New York, Elsevier, 1976. 382 p.
8. Islamov A.I., Faskhutdinov R.R., Kolupaev D.Yu., Vereshchagin S.A. O mekhanizmkh vozniknoveniya zon s anomalno vysokim plastovym davleniem i metodakh ikh prognozirovaniya v nerazrabatyvaemykh plastakh na primere priobskogo mestorozhdeniya [On the mechanisms of the formation of zones with abnormally high rock pressure and methods for predicting them in undeveloped rock systems, Priobskoe field case study]. *Oil industry*, 2018, no. 10, pp. 54–59.
9. Korotaev B.A., Vasyokha M.V., Onufrik A.M. Reservoir pressure evolution model during exploration drilling. *Bulletin of the Murmansk State Technical University*, 2017, vol. 20, no. 1-1, C. 104–110. In Rus.
10. Swarbrick R.E., Osborne M.J. Mechanisms that generate abnormal pressures: an overview. *American Association of Petroleum Geologists memoir*, 1998, no. 70, pp. 13–34.

11. Babalyan G.A. O faktorakh, obuslavlivayushchikh anomalno vysokie nachalnye davleniya v plastakh [About factors causing abnormally high initial pressures in the reservoirs]. *Trudy neftyanoy ekspeditsii*, Baku, 1953, no. 1, pp. 87–93.
12. Gubkin I.M. Mirovye zapasy nefiti [World oil reserves]. *Mezhdunarodnyy geologicheskyy kongress. SSSR. Trudy 17y sessii* [International Geological Congress. USSR. Proceedings of the 17<sup>th</sup> session]. Moscow, GONTI Publ., 1939. Vol. 1, pp. 167–179.
13. Golovachev E.M. O zakonmernostyakh proyavleniya i sposobakh prognoza velichiny AVPD v osadochnykh tolshchakh akvatoriy [On the laws of manifestation and the ways to forecast the magnitude of pore pressure prediction in sedimentary strata the waters]. *Bulat readings*, 2017, vol. 1, pp. 51–55.
14. Slavin V.I., Smirnova E.M. Abnormally high formation pressures: origin, prediction, hydrocarbon field development, and ecological problems. *American Association of Petroleum Geologists memoir*, 1998, no. 70, pp. 105–114.
15. Kurmangaliev S.B., Brazhnik A.Yu., Tolstikova V.E. Zakonomernost formirovaniya anomalno vysokikh plastovykh davleniy [The pattern of formation of abnormally high reservoir pressures]. *Sovremennye usloviya vzaimodeystviya nauki i tekhniki. Sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modern conditions of interaction between science and technology. Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference]. Executive editor A.A. Sukiasyan. Omsk, 2017. pp. 17–19.
16. Zilberman V.I., Serebryakov V.A., Gorfunkel M.V., Chilingar G.V. Prediction of abnormally high formation pressures (AHFP) in petroliferous salt-bearing sections. *Journal of petroleum science and engineering*, 2001, vol. 29, no. 1, pp. 17–27.
17. Melnik I.A. Opredelenie intensivnosti vtorychnykh geokhimicheskikh protsessov na osnove statisticheskoy interpretatsii materialov GIS [Determining the intensity of secondary geochemical processes based on a statistical interpretation of well log materials]. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2012, no. 11, pp. 35–41.
18. Kachinskas I.V. Vliyaniye litologo-mineralogicheskogo sostava i postsedimentatsionnykh protsessov na filtratsionno-emkostnyye svoystva terrigenykh kollektorov na primere mestorozhdeniy nefiti i gaza Vostochnoy i Zapadnoy Sibiri. Dis. Kand. nauk [The influence of the lithological and mineralogical composition and post-sedimentation processes on the filtration-capacitive properties of terrigenous reservoirs by the example of oil and gas fields in Eastern and Western Siberia. Cand. Diss.]. Tyumen, 2013. 16 p
19. Shal'dybin M.V., Wilson M.J., Kondrashova E.S., Rychkova I.V., Rudmin M.A., Wilson L., Lopushnyak Y.M., Molokov P.B., Muslimova A.V. A kaolinitic weathering crust in Tomsk, west Siberia: interpretation in the context of weathering crusts in Russia and elsewhere. *Catena*, 2019, vol. 181, pp. 104056–104059.
20. Akselrod S.M. Integrirovannyye geofizicheskie issledovaniya v protsesse bureniya s tselyu prognoza porovogo davleniya i geologicheskogo razreza vpered i dolota (po materialam zarubezhnykh publikatsiy) [Integral logging while drilling to forecast pore pressure and geologic characteristics of the rock in front of the bit (based on foreign publications)]. *The Logger*, 2017, no. 1 (271), pp. 69–104.
21. Aleksandrov B.L., Mollaev Z.Kh., Shilov G.I. Povysheniye effektivnosti geologo-razvedochnykh rabot i snizheniye geologicheskikh riskov pri poiskakh nefiti i gaza na territorii Sibiri i arkticheskogo shelfa [Enhancement of geological exploration efficiency and its risk mitigation during oil exploration in the territory of Siberia and Arctic shelf]. *Oil industry*, 2018, no. 3, pp. 8–12.
22. Kuznetsov O.L., Chirkin I.A., Radvan A.A., Ismail A., Karnaukhov S.M., Rizanov E.G. Prognoz po dannym seysmicheskikh issledovaniy avariynykh i ekologicheskikh opasnykh situatsiy bureniya glubokikh skvazhin [Forecast according to seismic studies of emergency and environmentally hazardous situations of drilling deep wells]. *Seysmicheskie tekhnologii. Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Seismic technologies. Materials of the scientific-practical conference]. Moscow, Center for Seismic Data Analysis, Lomonosov Moscow State University, 2017. pp. 69–72.
23. Simachkov A.Yu. Anomalnoye povedeniye seysmicheskikh voln v zonakh AVPD na territorii zapadnoy Sibiri [Anomalous behavior of seismic waves in areas of AHFP in the territory of Western Siberia]. *Sostoyaniye, tendentsii i problemy razvitiya neftegazovogo potentsiala Zapadnoy Sibiri. Materialy mezhdunarodnoy akademicheskoy konferentsii* [State, trends and problems of development of the oil and gas potential of Western Siberia. Materials of the international academic conference]. Ed. by S.I. Grachev. Tyumen, Tyumen Industrial University, 2018. pp. 23–29.
24. Chopra S., Rao M.R. Surface seismic data identifies shallow high-pressure drilling hazards. *World Oil*, 1995, vol. 216, no. 1, pp. 47–49.
25. Borodkin V.N., Smirnov O.A., Kurchikov A.R., Lukashov A.V., Nedosekin A.S., Pogretsky A.V., Smirnov A.S. K voprosu prognoza zon anomalno vysokikh plastovykh davleniy v razreze barentsevo-karskogo shelfa s uchedom dannyykh bureniya i seysmorazvedki [On the issue of predicting the anomaly-high-formation pressure zones in the Barents-Kara shelf with account of drilling and seismic survey data]. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2019, no. 4 (328), pp. 12–19.
26. Matushevich V.M., Myasnikova G.P., Maximov E.M., Volkov A.M., Chistiakova N.F., Kanalin V.G., Pupilli M. Abnormal formation pressures in the west Siberian mega-basin, Russia. *Petroleum Geoscience*, 1997, vol. 3, no. 3, pp. 269–283.
27. Gorbunov P.A. Reservoir pressures of the northern part of west Siberia and their main features. *Novyye tekhnologii – neftegazovomu region. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [New technologies – to the oil and gas region. Materials of the international scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists]. Tyumen, Tyumen Industrial University, 2017. pp. 291–294.
28. Obukhova M.A., Kouznetsov I.K., Sazikin M.K., Mitkalev D.V., Kachkin A.A. Prediction of pore pressures based on the depth-velocity model for the Bolshekhetskaya trough. *Geomodel 2015. 17<sup>th</sup> scientific-practical conference on oil and gas geological exploration and development*. Gelendzhik, Russia, 2015. pp. 483–487.
29. Fu H., Yan Y., Xu Y., Liang T., Liu Y., Guan B., Wang X., Weng D., Feng J. Experimental study and field application of fiber dynamic diversion in west china ultra-deep fractured gas reservoir. *52<sup>nd</sup> U.S. rock mechanics/geomechanics symposium*. Seattle, Washington, 2018. pp. 1–8.
30. Jiang, Meijuan, Spikes K.T. Rock-physics and seismic-inversion based reservoir characterization of the Haynesville Shale. *Journal of Geophysics and Engineering*, June 2016, vol. 13, Iss. 3, pp. 220–233.
31. Othman A.A.A., Ewida H.F., Fathi M.M. Ali, Embaby M.M.A.A. Reservoir characterization applying seismic inversion technique and seismic attributes for Komombo basin. *Austin J Earth Sci.*, 2017, vol. 3 (1), pp. 1–6.
32. Ilyas Juzer Najmuddin. *Austin chalk fracture mapping using frequency data derived from seismic data*. PhD thesis. Texas, 2003. 69 p.
33. Toelle B.E. *Method and system, and program storage device for analyzing compressional 2D seismic data to identify zones of open natural fractures within rock formations*: U.S. Patent. US 6,941,228 B2. Sep. 6 2005. 27 p.
34. Hottman C.E., Johnson R.K. Estimation of formation pressures from log derived shale properties. *J. Pet Technol.*, 1965, no. 17, pp. 717–722.
35. Pennebaker E.S. Seismic data indicate depth, magnitude of abnormal pressures. *World Oil*, June 1968, pp. 73–78.
36. Dutta N.C. Geopressure prediction using seismic data: current status and the road ahead geopressure. *Geophysics*, 2002, vol. 67, Iss. 6, pp. 1692–2041.
37. Aristarkhov A.V., Kerasov I.N., Sokolova M.S. Prognoz porovogo davleniya na osnove seysmicheskikh skorostey dlya tseley bureniya poiskovo-razvedochnykh skvazhin [Pore pressure prediction based on seismic velocity data for exploration drilling]. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2019, no. 2, pp. 47–57.
38. Taner M.T., Sheriff R.E. Application of amplitude, frequency and other attributes to stratigraphic and hydrocarbon determination. *AAPG Memoir*, 1977, no. 26, pp. 301–328.

Received: 23 March 2020.

#### Information about the authors

**Alexander N. Orekhov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Amani Mangoua Marc M**, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 544.47, 54.058

## ОЧИСТКА ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ ОТ CO<sub>2</sub> В СРЕДЕ ТРИФТОРУКСУСНОЙ КИСЛОТЫ ПРИ ДОБЫЧЕ НЕФТИ И ГАЗА

Иванова Мария Сергеевна<sup>1</sup>,  
ims.06@mail.ru

Вишнецкая Марина Викторовна<sup>2</sup>,  
mvvishnetskaya@mail.ru

Томский Кирилл Олегович<sup>1</sup>,  
kirilltom@mail.ru

<sup>1</sup> Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова в г. Мирном, Россия, 678174, г. Мирный, ул. Ойунского, 14.

<sup>2</sup> Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина, Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр., 65.

**Актуальность** проблемы выбросов в атмосферу диоксида углерода в настоящее время не подвергается сомнению. Крупными источниками выбросов в атмосферу диоксида углерода являются объекты горной и нефтегазовой промышленности. Одной из особенностей диоксида углерода является его химически устойчивая молекула, которая может сохраняться в неизменном виде в атмосфере длительное время. Наиболее рациональным решением утилизации диоксида углерода из продуктов горения углеводородов является его поглощение с получением новых продуктов, которые могут найти применение в химической промышленности. Основными недостатками существующих на сегодняшний день способов удаления диоксида углерода являются невысокая конверсия очищаемых газов, высокая стоимость проведения процесса, а также реализуемость процесса при больших количествах очищаемых газов в отходящих.

**Цель:** определение оптимальных параметров каталитического улавливания CO<sub>2</sub> из отходящих газов горной и нефтегазовой промышленности в растворах трифторуксусной кислоты.

**Объекты:** диоксид углерода, растворы трифторуксусной кислоты различной концентрации, концентрированная трифторуксусная кислота.

**Методы.** Очистка продуктов горения углеводородов от CO<sub>2</sub> проводилась путем пропускания его через раствор трифторуксусной кислоты, отработанная кислота регенерировалась кислородом воздуха. Исследовались абсорбционные способности растворов трифторуксусной кислоты в зависимости от концентраций растворов и значения pH. Абсорбцию CO<sub>2</sub> в растворах трифторуксусной кислоты определяли при стандартных условиях. Непоглотившийся CO<sub>2</sub> абсорбировали раствором щелочи, кислотность которого постоянно фиксировали потенциометром. Количество абсорбированного диоксида углерода определяли потенциометрическим титрованием содержащего ловушки.

**Результаты.** Показано, что каталитическая очистка дымовых газов от CO<sub>2</sub> при использовании растворов трифторуксусной кислоты протекает при стандартных условиях с полным улавливанием диоксида углерода.

### Ключевые слова:

Экология, промышленные газы, каталитическая очистка от CO<sub>2</sub>, трифторуксусная кислота, катализатор.

### Введение

Несомненно, на сегодняшний день выбросы диоксида углерода в окружающую среду считаются одной из самых важных проблем нефтегазовой отрасли. Одной из главных причин возникновения парникового эффекта, приводящего к потеплению климата повсеместно, считается образование продуктов горения углеводородных топлив, в основном диоксида углерода [1–3]. Для удаления диоксида углерода из продуктов горения углеводородов сегодня известны много различных технологий, работающих на химических, физико-химических и химических принципах [4–8]. Существующие на сегодняшний день методы улавливания диоксида углерода обладают рядом недостатков, основными из которых являются: образование большого количества неиспользуемых отходов, использование значительного количества технологических элементов при очистке. Существенным недостатком сорбционных методов очистки (абсорбционных и адсорбционных) выбросных газов является

необходимость многократной регенерации поглощающих растворов или частичной замены твердого сорбента, что значительно усложняет технологическую схему, увеличивает капитальные вложения и затраты на эксплуатацию. Наиболее интересными методами очистки отходящих дымовых газов являются каталитические методы. Преимуществами данной группы методов являются: высокая степень очистки, компактность, небольшая металлоемкость, высокая производительность, легкость автоматического управления. Недостатками каталитических методов очистки являются большие эксплуатационные расходы.

Каталитические технологии, используемые для улавливания нежелательных компонентов из отходящих дымовых газов, сегодня в мире занимают лидирующие позиции. Из них наиболее привлекательными являются технологии окисления, использующие в качестве окислителя экологически чистые реагенты, такие как молекулярный кислород. Сложность использования молекулярного кислорода в качестве

окислителя в подобных реакциях заключается в его активации, так как при стандартных условиях его реакционная способность крайне низка. Химическая реакция кислорода в синглетном состоянии почти со всеми соединениями происходит с незначительной скоростью. Поэтому окислительные каталитические реакции с кислородом протекают в многофазных системах при довольно жестких условиях по температуре с образованием катион-радикалов (O·, HO·) [9].

В качестве растворителя при протекании окислительных реакций распространено использование трифторуксусной кислоты (ТФК) [10–22], связанное с тем, что она способна растворять молекулярный кислород. В [22] было показано, что молекулярный кислород способен образовывать прочные комплексы с фторсодержащими соединениями (ФС).

В данной работе предлагается каталитический способ очистки отходящих дымовых газов, образующихся в результате горения углеводородных газов, от парникового газа – CO<sub>2</sub> – с применением растворов ТФК. Природный газ большинства месторождений России не содержит сернистых соединений. Основными веществами, выбрасываемыми в воздушный бассейн при сжигании газообразного углеводородного топлива, являются продукты полного сгорания – двуокись углерода и водяной пар. Преимуществом предлагаемого подхода является проведение процесса при стандартных давлении и температуре, а также использование достаточно неагрессивной среды растворов ТФК, не требующее больших эксплуатационных расходов.

#### Экспериментальные исследования

Очистку отходящих газов от диоксида углерода исследовали при стандартных параметрах температуры и давления (20 °С, 101,3 кПа) (рис. 1). Исследуемый газ с постоянной скоростью пропускали через емкость с раствором ТФК. Количество не вступившего в реакцию диоксида углерода определяли путем потенциометрического титрования раствора щелочи, в котором он улавливался. При этом показатель кислотности приемника газа постоянно контролировался.

В качестве титранта при проведении анализа использовался 1 М раствор соляной кислоты. При этом количество абсорбированного улавливаемого газа определяли по разнице между пропущенным количеством и результатом потенциометрического титрования.

#### Обсуждение результатов

Роль трифторуксусной кислоты заключается в образовании промежуточного карбоксильного радикала, продукт преобразования последнего представляет собой щавелевую кислоту [12].

ТФК в данных взаимодействиях является катализатором при наличии растворенного кислорода в нем. Расход кислорода при этом восполняется насыщением системы кислородом воздуха. Роль трифторуксусной кислоты в данном случае заключается не только в растворении кислорода, но и в приведении его из слабореакционной формы в активную форму. В данной работе было исследована роль концентрации трифторуксусной кислоты и pH среды на поглощение CO<sub>2</sub>.

При увеличении концентрации кислоты от 0,1 до 10,5 М количество поглотившегося диоксида углерода меняется незначительно (рис. 2). Заметное изменение абсорбированного диоксида углерода наблюдается при переходе к безводной кислоте.

Влияние кислотности среды на абсорбцию парникового газа показано на рис. 3. Как показывают полученные данные, наибольшая абсорбция наблюдается при значении кислотности равной 4,2. При уменьшении значения pH количество поглотившегося газа уменьшается, что наблюдается и при увеличении значения кислотности среды.

Данный способ очистки от CO<sub>2</sub> заключается в пропускании очищаемых газов через емкость, содержащую 5,0...10,5 М водного раствора трифторуксусной кислоты. После насыщения в отработанный раствор подается воздух для регенерации каталитических свойств, и отделяются образовавшиеся побочные продукты путем отстаивания, затем производится утилизация последних. В момент регенерации одного коллектора поток газа направляется на второй коллектор (рис. 4).

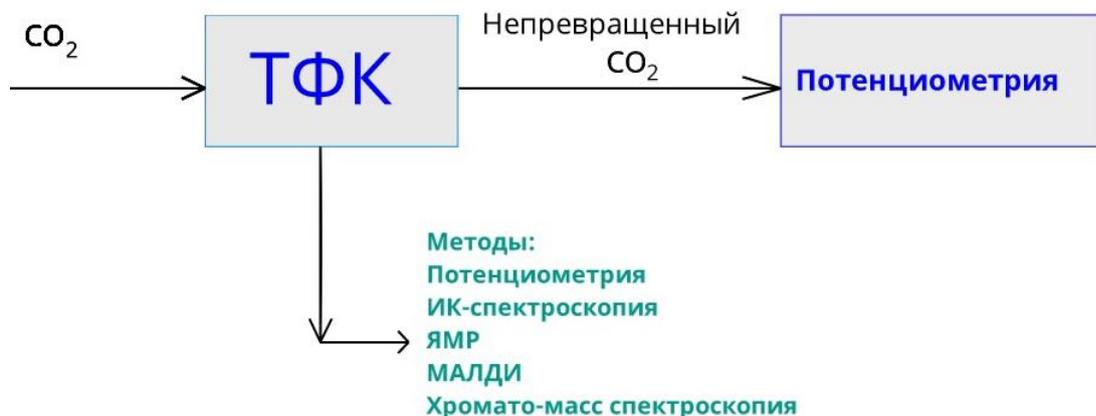


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Fig. 1. Experimental setup

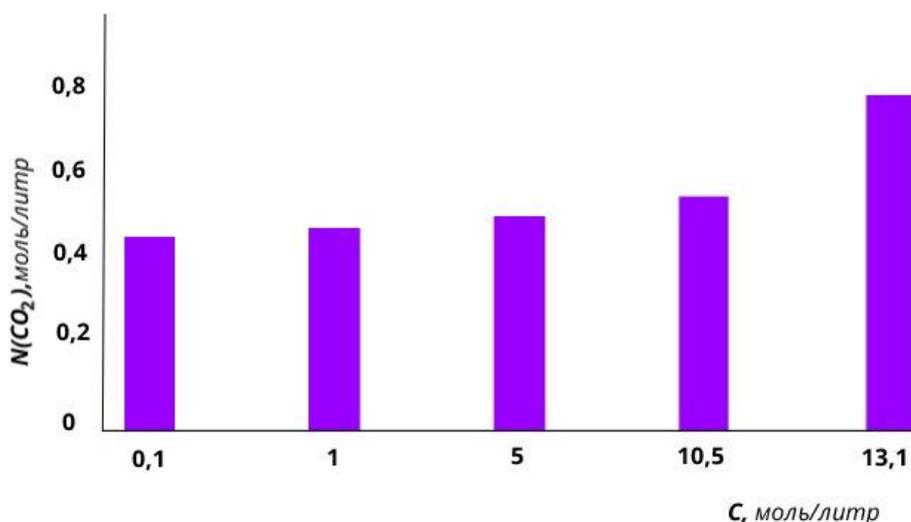


Рис. 2. Зависимость количества абсорбированного CO<sub>2</sub> от концентрации раствора трифторуксусной кислоты  
Fig. 2. Dependence of the amount of CO<sub>2</sub> absorbed on trifluoroacetic acid solution concentration

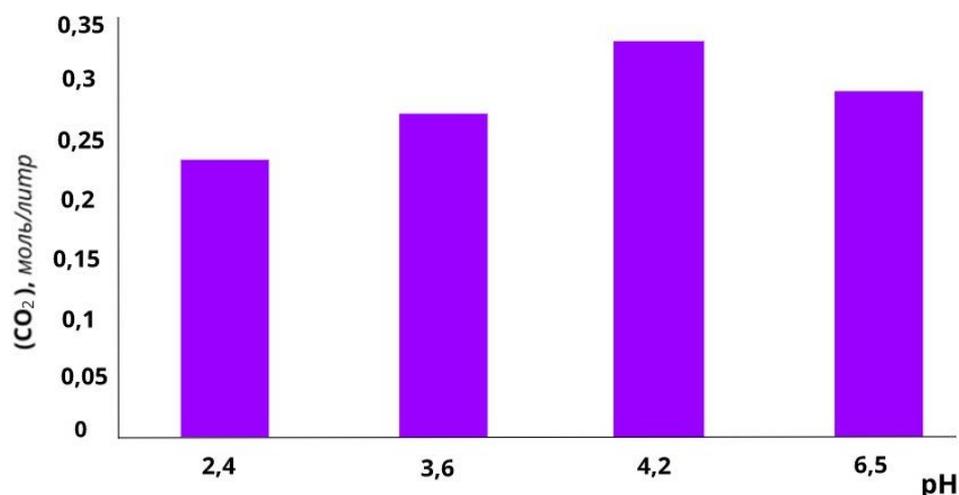


Рис. 3. Абсорбция диоксида углерода в зависимости от кислотности среды  
Fig. 3. Carbon dioxide absorption depending on medium acidity

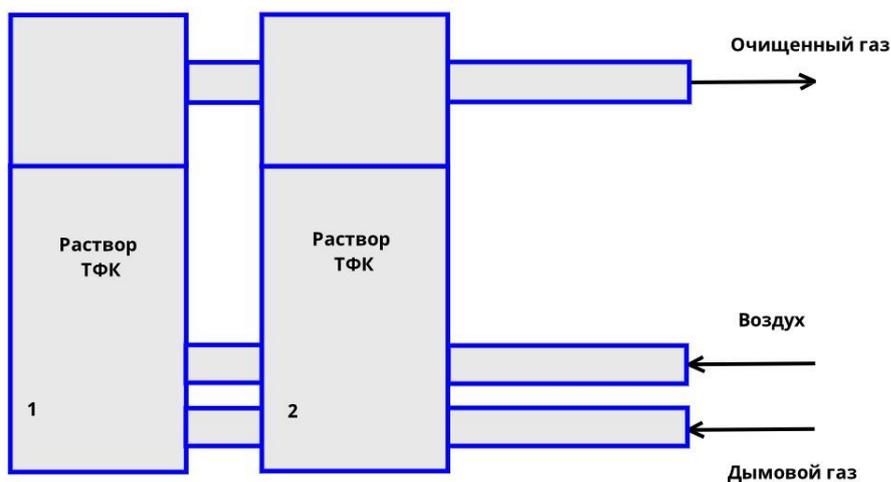


Рис. 4. Схема процесса снижения выбросов CO<sub>2</sub> применительно к открытым, подземным и скважинным методам добычи полезных ископаемых

Fig. 4. Scheme of reducing CO<sub>2</sub> emissions in relation to open, underground and borehole methods of mining

Исследование показало, что растворы трифторуксусной кислоты в присутствии растворенного кислорода способны проводить превращения диоксида углерода с образованием С-С-связи (щавелевой кислоты). Данный факт свидетельствует о возможности проведения очистки продуктов горения углеводородов от CO<sub>2</sub> при стандартных условиях. Также в работе определены оптимальные параметры кислотности среды и концентрации раствора кислоты.

По результатам, полученным в работе, предлагается использование растворов ТФК для очистки основного компонента парниковых газов, образующегося в результате сжигания топлива в промышленных предприятиях. Представленный способ позволяет проводить очистку газов от диоксида углерода при стандартных условиях. При этом предложенный способ отличается простотой регенерации, нетоксичностью используемого катализатора.

### Заключение

Проведены экспериментальные исследования по утилизации диоксида углерода – продукта сгорания углеводородных топлив в горной промышленности. Результаты исследования показали, что очистка от

диоксида углерода может проводиться без больших затрат энергии при стандартных условиях, при этом процесс может быть реализован вне зависимости от концентрации диоксида углерода в выбросах. Подобная очистка дымовых выбросов отличается простотой регенерации катализатора (насыщение системы кислородом воздуха) и получением ценных продуктов (щавелевой кислоты) и возможных присадок к моторному топливу, природа которых была показана ранее в работе [12].

В спектрах MALDI-TOF сухого остатка продуктов превращения CO<sub>2</sub> в этих системах наблюдаются сигналы с массой молекулярного катиона массами 376, 409 и 440, которым могут соответствовать соединения с брутто-формулой C<sub>8</sub>O<sub>15</sub>H<sub>7</sub>NO<sub>2</sub>, C<sub>8</sub>O<sub>15</sub>H<sub>7</sub>·2HO<sub>2</sub> и C<sub>8</sub>O<sub>15</sub>H<sub>5</sub>·3HO<sub>2</sub>.

По данным потенциометрического титрования выход щавелевой кислоты составляет 23 мас. % от поглощенного CO<sub>2</sub>.

Как показали результаты проведенных исследований, оптимальным значением pH среды для абсорбции диоксида углерода является 4,2, а концентрация раствора кислоты влияет незначительно.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Negative emissions. P. 1. Research landscape and synthesis / J.C. Minx, W.F. Lamb, M.W. Callaghan, S. Fuss, J. Hilaire, F. Creutzig, T. Beringer, T. Khanna, D. Lenzi, J.L. Vicente, M. del Mar Zamora Dominguez, T. Amann, W. de Oliveira Garcia, J. Hartmann, G. Luderer, G.F. Nemet, J. Rogelj, P. Smith, J. Wilcox // *Environmental Research Letters*. – 2018. – V. 13. – № 6. – P. 1–29.
2. Integrated assessment of carbon dioxide removal / W. Rickels, F. Reith, D. Keller, A. Oschlies, M.F. Quaas // *Earth's future*. – 2018. – V. 6. – № 3. – P. 565–582.
3. The effects of carbon dioxide removal on the carbon cycle / D.P. Keller, A. Oschlies, A. Lenton, E.W. Littleton, V. Scott, N.E. Vaughan // *Current Climate Change Reports*. – 2018. – V. 4. – № 3. – P. 250–265.
4. Carbon dioxide Fischer-Tropsch synthesis: a new path to carbon-neutral fuels / Y.H. Choi, Y.J. Jang, H. Park, W.Y. Kim, Y.H. Lee, S.H. Choi, J.S. Lee // *Applied catalysis B: environmental*. – 2017. – V. 202. – P. 605–610.
5. Sch'del C., Schuur E.A.G., Bader M.K.F. Potential carbon emissions dominated by carbon dioxide from thawed permafrost soils // *Nature climate change*. – 2016. – V. 6. – № 10. – P. 950–953.
6. Anuwattana R., Patkool C., Chawakitchareon P. Carbon dioxide adsorption using activated carbon via chemical vapor deposition process // *Engineering Journal*. – 2016. – V. 20. – № 4. – P. 59–68.
7. Carbon dioxide adsorption on nitrogen enriched carbon adsorbents: experimental, kinetics, isothermal and thermodynamic studies / C. Goel, N. Bhunia, P.K. Vajpai, N. Kaur // *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*. – 2016. – V. 16. – P. 50–63.
8. Лапидус А.Л., Голубева И.А., Жагфаров Ф.Г. Газохимия. – М.: ЦентрЛит-НефтеГаз, 2008. – 450 с.
9. Активация молекулярного кислорода в трифторуксусной кислоте / М.В. Вишнецкая, М.С. Иванова, В.Н. Солжан, Г.М. Жидомиров, М.Я. Мельников // *Журнал физической химии*. – 2012. – Т. 86. – № 5. – С. 889–891.
10. Luo C., Dong W., Gu Y. Theory-guided access to efficient photodegradation of the simplest perfluorocarboxylic acid: trifluoroacetic acid // *Chemosphere*. – 2017. – V. 181. – P. 26–36.
11. Превращения CO<sub>2</sub> в растворах трифторуксусной кислоты / М.В. Вишнецкая, М.С. Иванова, О.М. Свичкарев, Е.М. Буды-

- нина, М.Я. Мельников // *Журнал физической химии*. – 2013. – Т. 87. – № 5. – С. 742–744.
12. Вишнецкая М.В., Мельников М.Я. Особенности превращения органических и неорганических веществ в трифторуксусной кислоте // *Журнал физической химии*. – 2016. – Т. 90. – № 9. – С. 1434–1436.
13. Мацуо М., Отоси С. Соединения фтора. – М.: Мир, 1990. – 405 с.
14. Асланов Л.А., Захаров М.А., Абрамычева Н.Л. Ионные жидкости в ряду растворителей. – М.: МГУ, 2005. – 272 с.
15. Koshi J.K. Formation and oxidation of alkyl radicals by cobalt (III) complexes // *Journal of the American Chemical Society*. – 1968. – V. 90. – № 19. – P. 5196–5207.
16. Гидропероксидное окисление трудноокисляемых субстратов: беспрецедентный разрыв связи С-С в алканах, окисление молекулярного азота / А.Е. Гехман, И.П. Столяров, Н.В. Ершова, Н.И. Моисеева, И.И. Моисеев // *Кинетика и катализ*. – 2004. – Т. 45. – № 1. – С. 45–66.
17. Гехман А.Е., Моисеева Н.И., Моисеев И.И. Разложение пероксида водорода, катализируемое соединениями ванадия (V): пути образования озона // *Известия Академии наук. Серия химическая*. – 1995. – № 4. – С. 605–618.
18. Гехман А.Е., Моисеева Н.И., Моисеев И.И. Пероксокомплексы ванадия в катализе превращений пероксида водорода в трифторуксусной кислоте // *Координационная химия*. – 1992. – Т. 18. – С. 3–12.
19. Образование O<sub>3</sub> при каталитическом разложении H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> / А.Е. Гехман, Н.И. Моисеева, Э.А. Блюмберг, И.И. Моисеев // *Известия Академии наук. Серия химическая*. – 1985. – № 11. – С. 2653–2657.
20. Hart N., Buehler C.A. Peroxytrifluoroacetic acid-boron fluoride as a source of positive hydroxyl // *The Journal of Organic Chemistry*. – 1964. – V. 29. – № 8. – P. 2397–2400.
21. Катализируемое ванадием (+5) окисление бензола и его производных гидропероксидами / Н.И. Моисеева, А.Е. Гехман, Э.А. Блюмберг, И.И. Моисеев // *Кинетика и катализ*. – 1988. – Т. 29. – С. 970–974.
22. Бучаченко А.Л. Комплексы молекулярного кислорода с органическими молекулами // *Успехи химии*. – 1985. – Т. 54. – Вып. 2. – С. 195–212.

Поступила 10.09.2019 г.

**Информация об авторах**

**Иванова М.С.**, кандидат химических наук, доцент базовой кафедры нефтегазового дела НК «Роснефть» Политехнического института (филиала) Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова в г. Мирном.

**Вишнецкая М.В.**, доктор химических наук, профессор кафедры промышленной экологии Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина.

**Томский К.О.**, кандидат технических наук, заведующий базовой кафедрой нефтегазового дела НК «Роснефть» Политехнического института (филиала) Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова в г. Мирном.

UDC 544.47, 54.058

## CLEANING GAS EMISSIONS FROM CO<sub>2</sub> THROUGH TRIFLUOROACETIC ACID IN OIL AND GAS PRODUCTION

**Mariya S. Ivanova**<sup>1</sup>,  
ims.06@mail.ru

**Marina V. Vishnetskaya**<sup>2</sup>,  
mrvishnetskaya@mail.ru

**Kirill O. Tomskey**<sup>1</sup>,  
kirilltom@mail.ru

<sup>1</sup> Mirny Polytechnic Institute (branch), Ammosov North-Eastern Federal University, 14, Oyunskiy street, Mirny, 678174, Russia.

<sup>2</sup> Russian State University of Oil and Gas, 65, Leninskiy avenue, Moscow, 119991, Russia.

**The relevance** of the problem of carbon dioxide emissions into the atmosphere is not currently in doubt. Mining and oil and gas facilities are a major source of carbon dioxide emissions. One of the features of carbon dioxide is its chemically stable molecule, which can remain unchanged in the atmosphere for a considerable amount of time. The most rational solution for carbon dioxide utilization from the products of combustion of hydrocarbons is its absorption with the receipt of new products that may find application in chemical industry. The main disadvantages of the carbon dioxide removal methods available today are the low conversion of the cleaned gases, the significant cost of the process, and the feasibility of the process with large amounts of cleaned gases in the exhaust.

**The aim** of the research is to determine the optimal parameters of catalytic CO<sub>2</sub> capture from the exhaust gases of the mining and oil and gas industries in trifluoroacetic acid solutions.

**The objects** of research are carbon dioxide, trifluoroacetic acid solutions of various concentrations, concentrated trifluoroacetic acid.

**Methods.** Purification of combustion products of hydrocarbons from CO<sub>2</sub> was carried out by passing it through a solution of trifluoroacetic acid, the spent acid was regenerated with air oxygen. The absorption capacities of trifluoroacetic acid solutions were investigated depending on the concentrations of the solutions and the pH value. CO<sub>2</sub> absorption in trifluoroacetic acid solutions was determined under standard conditions. Unabsorbed CO<sub>2</sub> was absorbed with a solution of alkali, the acidity of which was constantly fixed with a potentiometer. The amount of carbon dioxide absorbed was determined by potentiometric titration of the trap.

**Results.** The paper shows that catalytic purification of flue gases from CO<sub>2</sub> when using trifluoroacetic acid solutions proceeds under standard conditions with complete trapping of carbon dioxide.

### Key words:

Ecology, industrial gases, catalytic removal of CO<sub>2</sub>, trifluoroacetic acid, catalyst.

### REFERENCES

- Minx J.C., Lamb W.F., Callaghan M.W., Fuss S., Hilaire J., Creutzig F., Beringer T., Khanna T., Lenzi D., Vicente J.L., Del Mar Zamora Dominguez M., Amann T., De Oliveira Garcia W., Hartmann J., Luderer G., Nemet G.F., Rogelj J., Smith P., Wilcox J. Negative emissions. P. 1. Research landscape and synthesis. *Environmental Research Letters*, 2018, vol. 13, no. 6, pp. 1–29.
- Rickels W., Reith F., Keller D., Oschlies A., Quaas M.F. Integrated assessment of carbon dioxide removal. *Earth's future*, 2018, vol. 6, no. 3, pp. 565–582.
- Keller D.P., Oschlies A., Lenton A., Littleton E.W., Scott V., Vaughan N.E. The effects of carbon dioxide removal on the carbon cycle. *Current Climate Change Reports*, 2018, vol. 4, no. 3, pp. 250–265.
- Choi Y.H., Jang Y.J., Park H., Kim W.Y., Lee Y.H., Choi S.H., Lee J.S. Carbon dioxide Fischer–Tropsch synthesis: a new path to carbon-neutral fuels. *Applied catalysis B: environmental*, 2017, vol. 202, pp. 605–610.
- Schdel C., Schuur E.A.G., Bader M.K.F. Potential carbon emissions dominated by carbon dioxide from thawed permafrost soils. *Nature climate change*, 2016, vol. 6, no. 10, pp. 950–953.
- Anuwattana R., Patkool C., Chawakitchareon P.P. Carbon dioxide adsorption using activated carbon via chemical vapor deposition process. *Engineering Journal*, 2016, vol. 20, no. 4, pp. 59–68.
- Goel C., Bhunia H., Bajpai P.K., Kaur H. Carbon dioxide adsorption on nitrogen enriched carbon adsorbents: experimental, kinetics, isothermal and thermodynamic studies. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 2016, vol. 16, pp. 50–63.
- Lapidus A.L., Golubeva I.A., Zhagfarov F.G. *Gazokhimiya* [Gas chemistry]. Moscow, CentrLit-NefteGaz Publ., 2008. 450 p.
- Vishnetskaya M.V., Ivanova M.S., Solkan V.N., Zhidomirov G.M., Melnikov M.Ya. Activation of molecular oxygen in trifluoroacetic acid. *Journal of Physical Chemistry*, 2012, vol. 86, no. 5, pp. 889–891.
- Luo C., Dong W., Gu Y. Theory-guided access to efficient photo-degradation of the simplest perfluorocarboxylic acid: trifluoroacetic acid. *Chemosphere*, 2017, vol. 181, pp. 26–36.
- Vishnetskaya M.V., Ivanova M.S., Svichkarev O.M., Budynina E.M., Melnikov M.Ya. Transformations of CO<sub>2</sub> in trifluoroacetic acid solutions. *Journal of Physical Chemistry*, 2013, vol. 87, no. 5, pp. 742–744.
- Vishnetskaya M.V., Melnikov M.Ya. Osobennosti prevrashcheniya organicheskikh i neorganicheskikh veshchestv v triflorokisloty [Features of conversion of organic and inorganic substances in trifluoroacetic acid]. *Journal of Physical Chemistry*, 2016, vol. 90, no. 9, pp. 1434–1436.
- Matsuo M., Otsi S. *Soedineniya flora* [Fluorine compounds]. Moscow, Mir Publ., 1990. 182 p.
- Aslanov L.A., Zakharov M.A., Abramycheva N.L. *Ionnye zhidkosti v ryadu rastvoriteley* [Ionic liquids in a series of solvents]. Moscow, MSU Publ., 2005. 272 p.
- Koshi J. K. Formation and oxidation of alkyl radicals by cobalt (III) complexes. *Journal of the American Chemical Society*, 1968, vol. 90, no. 19, pp. 5196–5207.
- Gekhman A.E., Stolyarov I.P., Ershova N.V., Moiseeva N.I., Moiseev I.I. Hydroperoxide oxidation of hardly oxidizable substrates: an unprecedented breaking of the C–C bond in alkanes, ox-

- idation of molecular nitrogen. *Kinetics and catalysis*, 2004, vol. 45, no. 1, pp. 40–60.
17. Gekhman A.E., Moiseeva N.I., Moiseev I.I. Decomposition of hydrogen peroxide catalyzed by vanadium (V) compounds: the pathways for the formation of ozone. *Russian Chemical Bulletin*, 1995, no. 4, pp. 584–598.
  18. Gehman A.E., Moiseeva N.I., Moiseev I.I. Vanadium peroxo complexes in the catalysis of hydrogen peroxide transformations in trifluoroacetic acid. *Coordination chemistry*, 1992, vol. 18, pp. 3–12. In Rus.
  19. Gekhman A.E., Moiseeva N.I., Blumberg E.A., Moiseev I.I. O<sub>3</sub> formation during the catalytic decomposition of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. *Izvestiya Akademii Nauk. Chemical series*, 1985, no. 11 pp. 2653–2657. In Rus.
  20. Hart H., Buehler C.A. Peroxytrifluoroacetic acid-boron fluoride as a source of positive hydroxyl. *The Journal of Organic Chemistry*, 1964, vol. 29, no. 8, pp. 2397–2400.
  21. Moiseeva N.I., Gekhman A.E., Blumberg E.A., Moiseev I.I. Vanadium (+5) catalyzed oxidation of benzene and its derivatives by hydroperoxides. *Kinetics and Catalysis*, 1988, vol. 29, pp. 970–974. In Rus.
  22. Buchachenko A.L. Complexes of molecular oxygen with organic molecules. *Advances in Chemistry*, 1985, vol. 54, Iss. 2, pp. 195–212. In Rus.

Received: 10 September 2019.

#### Information about the authors

**Mariya S. Ivanova**, Cand. Sc., associate professor, Mirny Polytechnic Institute (branch), Ammosov North-Eastern Federal University.

**Marina V. Vishnetskaya**, Dr. Sc., professor, Russian State University of Oil and Gas.

**Kirill O. Tomsky**, Cand. Sc., associate professor, Mirny Polytechnic Institute (branch), Ammosov North-Eastern Federal University.

УДК 57.044:550.46

## ВЛИЯНИЕ ПРИРОДНЫХ ФАКТОРОВ НА СОДЕРЖАНИЕ РТУТИ В ОЗЕРАХ СЕВЕРА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Захарченко Александр Викторович<sup>1</sup>,  
avzakh@gmail.com

Пасько Ольга Анатольевна<sup>2</sup>,  
helgapas@mail.ru

Тигеев Александр Анатольевич<sup>1</sup>,  
ttruubbaa@mail.ru

<sup>1</sup> Тюменский научный центр Сибирского отделения Российской Академии Наук,  
Россия, 625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86.

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

**Актуальность** исследования обусловлена тем, что ртуть участвует в глобальном планетарном биогеохимическом цикле и входит в пищевые цепи с накоплением в организмах хищных видов животных и у коренного населения. В отношении к территории Западной Сибири информация о содержании ртути в озерах не достаточно полная, а обобщения сделаны на малых выборках, что делает актуальным фоновые изучения содержания ртути в среднетаежных озерах на репрезентативной выборке.

**Целью** исследования является анализ и обобщение фоновых мониторинговых наблюдений, как за общим содержанием ртути донных отложений, так и её содержанием в поверхностных водах озера, в зависимости от природных факторов в условиях средней тайги в пределах Ханты-Мансийского автономного округа.

**Объект:** фоновая концентрация растворенной Hg и ртути в донных отложениях озера. Изучено 95 озер, 322 пробы донных отложений, отобранных в разное время.

**Методы:** атомно-адсорбционная спектрометрия (метод «холодного пара») определения ртути в аккредитованных лабораториях в соответствии с методическими рекомендациями. Использованы данные фонового экологического мониторинга с 2007 по 2011 гг.

**Результаты.** Средняя фоновая концентрация ртути в донных отложениях составляет  $0,046 \pm 0,012$  мг/кг, растворенной ртути –  $0,025 \pm 0,014$  мг/кг. Наибольшая концентрация Hg выявлена в элювиальной и трансэлювиальной позициях, наименьшая – в супераквальных ландшафтах. Концентрация Hg имеет максимальное значение в озерково-грязево-мочажинном комплексе торфяных болот, а самое низкое – в донных отложениях озера на минеральных почвах. Наблюдается тенденция увеличения концентрации ртути в донных отложениях озера от зоны тундры, северной тайги до подзоны средней тайги. Но нарастает заболоченность территорий с юга на север, что способствует увеличению содержания ртути в донных отложениях озера ( $R=0,4$ ). Отмечается увеличение растворенной ртути в озерах с запада на восток (по долготе) ( $R=0,6$ ). Оценка динамики изменения содержания ртути в донных отложениях позволяет заключить, что в зимний период содержание ртути выше по сравнению с летним периодом. Концентрация растворенной ртути возрастает с запада на восток, но ртуть донных отложений этой закономерности не соответствует.

### Ключевые слова:

Ртуть, донные отложения, озера, ландшафтно-географические факторы, динамика, Субарктика.

### Введение

Длительная история исследования природных ресурсов Севера обусловлена возможностью их широкого использования. Освоение крупных запасов полезных ископаемых создает конкурентную среду для многих государств региона, влияет на климат и состояние экосистем северного полушария Земного шара [1]. Глобальное потепление климата вызывает необходимость разработки новых логистических решений в стратегии развития региона. Необходим учет тенденции развития производства, роста численности населения и развития международной торговли по Северному морскому пути. Экономические и геополитические предпосылки способствуют росту антропогенной нагрузки на уникальные арктические экосистемы и повышают актуальность региональных экологических исследований.

Особой экотоксикологической проблемой для исследований представляется изучение миграции ртути в связи с её участием в глобальном планетарном цикле [2], высокой токсичностью и выраженной кумулятивной способностью. Накопление ртути в пищевых цепях представляет риск для здоровья местных жителей, а также диких животных, Арктики и Субарктики [3]. Выявлено, что в тканях хищников, занимающих верхние уровни пищевой цепи в Арктике, ртуть почти исключительно метилирована. В крови и жировой ткани коренного населения также отмечено повышенное содержание метилртути (MeHg) [4]. Циклы MeHg в Арктике описаны для водно-болотных комплексов, озера и тундровых водосборов [5]. Ртуть способна к биоаккумуляции в трофических системах – в водоемах и в сухопутных биогеоценозах [4, 6].

Поступление ртути в естественные ландшафты происходит несколькими путями, прежде всего, в ходе внутрипочвенного выветривания с переходом Hg(+2) в молекулярную ртуть Hg(0) в окислительных условиях или монометилртуть  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$  в восстановительной среде [7]. Кроме того, Hg(0) поступает из мантии в виде паров вдоль разломов земной коры. Источником повышенного поступления ртути в район Карского моря (полярная станция Андерма) в 2010–2011 гг. стало извержение вулканов в Исландии [8]. С развитием горнодобывающей промышленности, металлургии, энергетики формируется дополнительный мощный антропогенный источник ртути [9]; происходит её миграция из южных регионов в высокие широты. Источником ртутного загрязнения Арктики являются также лесные пожары в умеренных широтах [10].

Известно, что ртуть присутствует в атмосфере в парогазовой фазе и аэрозольном состоянии ( $0,5\text{--}2,0 \text{ нг/м}^3$ ) [7]; она депонирована в почвах ( $0,005\text{--}1,275 \text{ мг/кг}$ ), ледовом и снеговом покрове, в поверхностных водах содержится в растворах  $0,09 \text{ мкг/дм}^3$  и взвешях – до  $0,23 \text{ мкг/дм}^3$ . В конечном итоге миграция ртути приводит к её осаждению и аккумуляции в илистой фракции донных отложений рек и озер ( $0,05\text{--}0,1 \text{ мг/кг}$ ). Микроорганизмы способны преобразовывать ртуть из металлорганического комплекса в форме Hg(II) в Hg(0) или метилртуть (MeHg) с последующим выделением в атмосферу. Следовательно, ртуть в экосистемах Севера имеет низкую концентрацию, находится в рассеянном состоянии и способна к активной миграции и аккумуляции на геохимических барьерах.

Уникальные эколого-геохимические свойства ртути (высокая токсичность и подвижность) позволяют ей мигрировать из одной среды в другую. Малые концентрации ртути стимулируют высокую биологическую активность живых организмов с коэффициентом накопления  $10^5\text{--}10^7$  [7]. Начиная с определенного уровня, она становится токсичной: ПДК для питьевой воды составляет  $0,0005 \text{ мг/дм}^3$ , для рыбохозяйственных водоемов –  $0,00001 \text{ мг/дм}^3$ , для почв ПДК составляет  $2,1 \text{ мг/кг}$ , рыбы –  $0,3\text{--}1,0 \text{ мг/кг}$ .

Тундровые почвы являются крупнейшим источником поступления ртути в озера северной Аляски [11, 12]. Подробный анализ почв, проведенный на одиннадцати участках, показал снижение ее содержания в направлении от внутренних районов к прибрежным [13]. Это противоречит ожидаемому тренду, и поставило под сомнение вклад в биогеохимию региона атмосферного вымывания ртути Hg(II) вблизи побережья океана в первые месяцы после окончания полярной ночи [14].

Геохимия ртути высоких широт имеет свои особенности. Наблюдается массовое вымывание ртути из атмосферы в первые три месяца после восхода солнца в Антарктике [15, 16], Арктике [17, 18] Субарктике [19] и горных ледниках [20], что способствует значительному росту её концентрации в снегу и льдах (AMDE – Atmospheric Mercury Depletion Events). Положительная корреляция концентрации ртути и тропосферного озона (+0,9) объяснима реакцией окис-

ленной формы аэрозольной ртути атмосферы Hg(II) и активных галогенных радикалов (BrO) из аэрозолей морской соли при воздействии солнечного света. Весной концентрации ртути возрастают в 1000 раз относительно зимнего периода вблизи побережья морей по сравнению с внутренними частями Арктики [18].

Созданы модели распределения ртути в атмосфере и снежном покрове при таянии в районе Канадского Севера [21]. Из моделей следует, что доля осаждаемой ртути, которая испаряется из снежного покрова, увеличивается с широтой с 28 % между  $30$  и  $45^\circ$  с. ш. до 51 % с  $45$  до  $66,5^\circ$  с.ш. и до 70 % к северу от  $66,5^\circ$  с. ш. в год. Средняя моделируемая концентрация ртути в стоках талой воды снежного покрова выше на европейской стороне ( $>20 \text{ нг/л}$ ) по сравнению с канадской ( $<10 \text{ нг/л}$ ) побережья Северного Ледовитого океана. Наблюдения на арктической станции Андерма показали, что вымывание ртути из атмосферы происходит не только весной. В зимнее время оно возрастает вследствие осаждения влаги в виде кристаллов изморози [18]. Эффект AMDE ограничен расстоянием 200 м от побережья Карского моря.

В последние годы в канадской тундре проведено детальное изучение системы «атмосфера – снеговой покров – почва» [22]. В зимнее время отмечен устойчивый градиент снижения содержания Hg(0) в системе «атмосфера – верхний слой снега – нижний слой снега». Весной в снегу на удалении от океана наблюдается некоторый рост содержания ртути, что не оказывает значимого воздействия на тундровые экосистемы. Показано, что 70 % ртути, выпадающей из атмосферы на ландшафты, является элементарной [9].

В условиях Севера происходит бактериальное метилирование ртути [5], кроме того, наблюдается и обратный процесс. В снегу и воде высококолитрофного пресноводного арктического озера под воздействием солнечного излучения доминирует разложение метилртути. Изучены микробные пути окислительного деметилирования ртути с диоксида углерода и с образованием метана в анаэробных условиях [23]. Для Арктики описаны циклы превращения ртути из MeHg в другие формы при участии фотоэффекта и ферментов бактерий – ртуть переходит в элементарное состояние Hg(0) и может испаряться с поверхности озер.

Большое значение в биогеохимии ртути в естественных ландшафтах имеют гумусовые вещества [7, 13, 24]. Фульвокислоты создают устойчивые растворимые комплексы, способствующие миграции ртути в водотоках; гуминовые кислоты, слаборастворимые в озерных и речных водах, способствуют её осаждению. Концентрация всех форм ртути проявляет положительную корреляцию с цветностью воды, обусловленной содержанием гумуса. В шведских озерах соотношение ртути и растворенного углерода ниже весной и летом ( $0,45 \text{ мг/г}$ ) и максимальны осенью ( $0,8 \text{ мг/г}$ ). Содержание всех форм ртути увеличивается с ростом кислотности (pH) с 7 до 5. Растворенные формы ртути сорбируются взвешенными частицами и за счет седиментации осаждаются на дно. Де-

понирование ртути в донных отложениях позволяет оценивать уровни её миграционной активности.

Ранее установлено, что в донных отложениях содержание ртути убывает с глубиной, что косвенно указывает на её накопление в антропогенный период [25]. Также показано увеличение содержания ртути при движении от арктической тундры, северной тайги до средней тайги.

Актуальность изучения обусловлена тем, что исследования содержания ртути в донных отложениях озер Западной Сибири отрывочны [8]. Выводы часто делаются на малых выборках. В нашем исследовании предпринята попытка выявить закономерности пространственного и временного распределения содержания ртути в пределах одной природной зоны средней тайги. Акценты сделаны на изучении содержания ртути в озерах с разными ландшафтно-географическими условиями с использованием данных экологического мониторинга.

Целью исследования является анализ и обобщение фоновых мониторинговых наблюдений, как за общим содержанием ртути донных отложений, так и содержанием её в поверхностных водах озер, в зависимости от природных факторов в условиях средней тайги в пределах Ханты-Мансийского автономного округа.

Практический смысл работы заключается в том, что содержание ртути в донных отложениях не имеет определенного значения предельно допустимой величины (ПДК). Следовательно, чтобы оценивать загрязненность водоема ртутью необходимо знать фоновый уровень её концентрации. В некоторых случаях желательно предварительно прогнозировать его величину, используя систему ландшафтно-географических ориентиров.

#### **Объекты и методы исследования**

Территория располагается между 60° и 65° северной широты и попадает в Субарктику (60°–70° с. ш.). Она относится к средней тайге лесной зоны с ландшафтными провинциями: Ханты-Мансийская, Среднеобская, Сургутское полесье, Сибирские увалы. Для территории характерны годовой ход температуры континентального климата и очень высокая заболоченность, которая составляет 40%, а в Сургутском полесье достигает 80%. Озера широко распространены на территории Ханты-Мансийского автономного округа (ХМАО-Югры). На территории округа насчитывается 290 тыс. озер [26].

Погоду определяют циклоны,двигающиеся с севера-запада и запада округа. Весна длительная и отличается неустойчивой погодой с возвратами заморозков, переходом температуры через 0 градусов в течение суток. Лето непродолжительное, но теплое и влажное. Июль – самый жаркий месяц со среднемесячной температурой +17 °С, однако температура может подниматься до +36 °С. Самый холодный месяц – январь со среднемесячной температурой –19,4 °С, абсолютным наблюдаемым минимум –51 °С. Наступление зимних холодов обычно связано с антициклонами, формирующимися на юге, в Казахском

мелкосопочнике, и на северо-востоке Центральной Сибири.

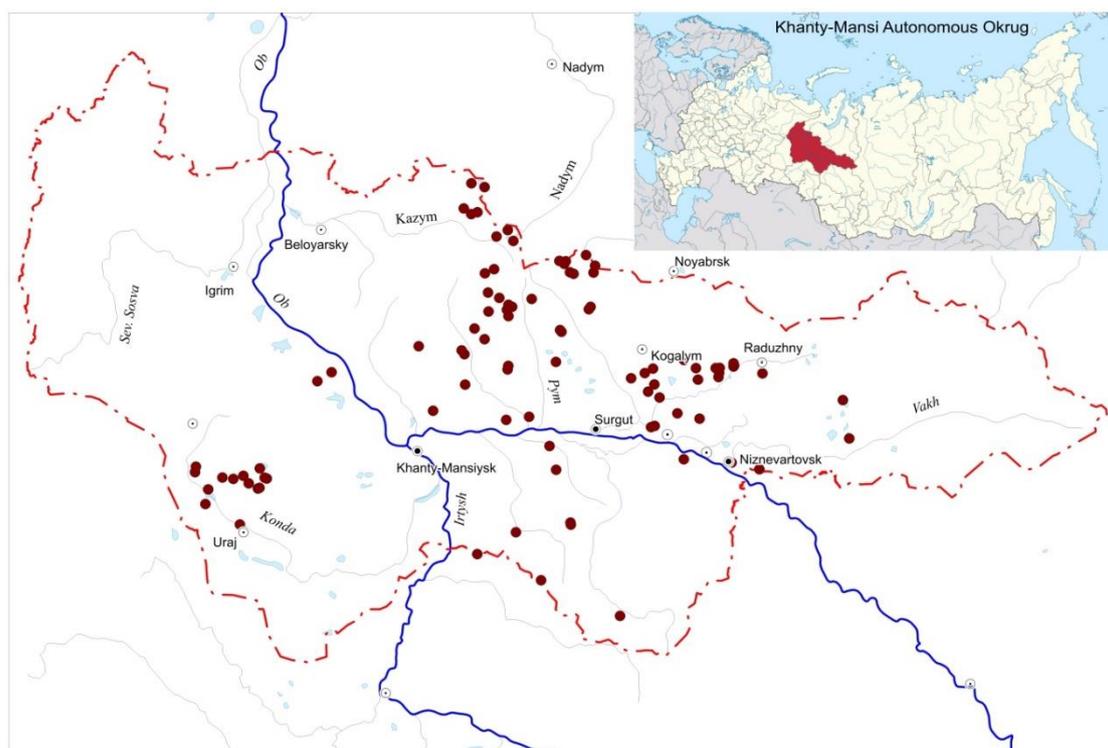
Для изучения фонового содержания ртути использованы данные материалов экологического мониторинга нефтяных месторождений в соответствии с принятыми для этого требованиями и методическими рекомендациями [27]. Отбор проб воды проводился в полиэтиленовую тару для быстрой транспортировки в лабораторию в соответствии с ГОСТ Р 51592-2000. Донные отложения озер отбираются из поверхностного слоя ила в полиэтиленовую тару для быстрой доставки в лабораторию. Химико-аналитические работы проведены методом атомно-адсорбционной спектроскопии (метод «холодного пара») в аккредитованной лаборатории (Центр лабораторного анализа и технических измерений по Уральскому федеральному округу ХМАО-Югры) в соответствии с ПНД Ф 14.1:2:4.160-2000 (Методика выполнения измерений массовой концентрации общей ртути в пробах природной, питьевой и сточной воды методом «холодного пара» на анализаторе ртути РА-915+ с приставкой РП-91). Для каждой пробы с помощью GPS определена широта и долгота.

Объем выборки составляет 95 озер, расположенных на значительном расстоянии от техногенных объектов. В некоторых объектах пробы отобраны в разные сезоны в течение трех лет. Однако есть озёра, в которых пробы отбирались только один раз. Выборка содержания ртути в донных отложениях составляет 332 пробы, в последующем для отдельных озер добавлены данные растворенной ртути (37 проб). Отбор проб охватывает период 2007–2011 гг.

Расположение ХМАО-Югры на карте России и изученных озер на территории ХМАО-Югры представлено на рис. 1.

Методический интерес представляют взаимосвязи с ландшафтно-географическими факторами: положение озер в ряду геохимической миграции вещества, окружающих компонентах ландшафта на уровне урочища, диаметр. Используя Google Earth pro, для всех озер проведена оценка их положения в макрорельефе: элювиальный, трансэлювиальный, суперэлювиальный ландшафты. Ландшафт рассматривался в упрощённых геохимических координатах движения вещества. Озера, располагающиеся по линии водораздела и в непосредственной близости от неё, входили в первую категорию. Во вторую категорию отнесены те, которые располагаются в среднем течении малых рек, стекающих с водораздела. В третью категорию определены озера, располагающиеся на террасах крупных рек, в поймах и долинах рек.

Для каждого озера отмечаются почвенно-экологическое состояния окружающей местности: озерково-грязево-мочажинный комплекс, болото (без разделения по трофности), минеральные почвы. Компоненты ландшафта (на уровне урочища), окружающие изученные озера, относятся к олиготрофным среднетаежным элементам ландшафтов. Выделены следующие категории местностей, которые обозначены для каждого озера:



**Рис. 1.** Расположение ХМАО-Югры и изученных озер на карте России (Масштаб 1:60000). Условные обозначения: – города, – граница ХМАО-Югры, – реки, – точки отбора проб в озерах

**Fig. 1.** Location of KMAO-Ugra and the studied lakes on the map of Russia (Scale 1:60 000). Legend: – cities, – border of Khanty-Mansiysk district, – rivers, – sampling site in lakes

- мочажинные комплексы (категория «ОГМК»), приуроченные к водораздельным пространствам, но они могут располагаться и на пологих склонах;
- озера, располагающиеся на верховых, переходных, или низинных болотах с невыраженными озерковыми комплексами, или зарастающие низинные болота, также среди рямов отнесены к категории «Болото»;
- озера, расположенные среди лесов, лугов, на поймах, отнесены к категории «Минеральные почвы».

Важнейшей пространственной характеристикой является диаметр (км) озера. По этому признаку озера отнесены к пяти категориям, принятым в географии (км) [28]: малые – 0,1–0,5, средние – >0,5–1,5, большие >1,5–3, крупные – >3–6, очень крупные >6. Измерения диаметра проведены с использованием инструментов Google Earth pro.

Для каждой пробы отмечали сезон отбора. Традиционно рекомендуется проводить отбор проб по схеме: первый сезон – это зимняя межень (январь–март), второй сезон выделялся с апреля по июнь (половодье), третий – июль–сентябрь (летняя межень) и четвертый – октябрь–декабрь (ледостав). В половодье отбор проб не проводился, в результате выделены три периода за сезон отбора проб: 1 – с декабря по апрель, 2 – с июня по август, 3 – с сентября по ноябрь. Наибольшее количество проб отбирается с июня по август.

Основой для изучения содержания ртути являлись те озера, которые подходят под определение фоновых наблюдений [27]. Если озера находятся вблизи куста

скважин по добычи нефти, то выбираются только те, которые располагаются выше по рельефу, так, что воды от объекта загрязнения не могли попасть в водоем. Из выборки исключены все озера, расположенные на расстоянии до источников возможного выбросов ртути в атмосферный воздух менее 10 км. Исключались все места, расположенные вблизи поселков, центров переработки, транспортировки нефти, другие положения места отбора пробы, где может происходить сжигание топлива, попутного газа.

Для обработки данных использован программный пакет Statistica for Windows. Содержание ртути имеет логнормальное или степенное распределение, сильно сдвинутое к минимальным значениям, поэтому использованы методы анализа данных, такие как: медиана, непараметрический анализ Краскала–Уоллиса (Kruskal–Wallis ANOVA), при сравнении нескольких групп использован мультикомпозиционный коэффициент Z, достоверное значение которого подтверждает различие между отдельными группами. Использован критерий Манна–Уитни (u-критерий) при сравнении двух групп, например, зимние и летние заборы проб, а также ранговая корреляция Спирмена для обнаружения взаимосвязи между переменными, выраженные в цифровом формате.

### Результаты

Содержание ртути испытывает значительные колебания как в пространстве, так и во времени [28]. Иногда близко расположенные объекты существенно

различаются по содержанию ртути в донных отложениях. Изменения во времени не велики для донных отложений, но могут в разы изменяться в случае растворенной ртути.

Основные статистические моменты, отражающие содержание ртути в донных отложениях: объем выборки, среднее арифметическое, доверительный интервал ( $p < 0,05$ ), медиана, мода, представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Общие статистические характеристики выборки ртути в донных отложениях и растворенной в воде озер

**Table 1.** General statistical characteristics of mercury sample in bottom sediments and dissolved in water in the water of the lakes

Характеристики Characteristics	Ртуть донных отложений Hg sediments	Ртуть растворенная Dissolved Hg
Объем выборки Sample size	332	37
Средняя концентрация, мг/кг; мг/дм <sup>3</sup> Average concentration, mg/kg; mg/dm <sup>3</sup>	0,046	0,025
Доверительный интервал $p < 0,05$ Confidence interval $p < 0,05$	0,012	0,014
Медиана, мг/кг; мг/дм <sup>3</sup> Median mg/kg; mg/dm <sup>3</sup>	0,05	0,013
Мода, мг/кг; мг/дм <sup>3</sup> Mode mg/kg; mg/dm <sup>3</sup>	0,05	0,01

С точки зрения геохимии для миграции ртути имеет значение положение озера в макрорельефе. В элювиальной позиции она поступает в ландшафт как результат сухого и мокрого вымывания из атмосферы. Озера элювиальной и трансэлювиальной позиций в ландшафте по критерию Краскел–Уаллис различаются между собой по содержанию ртути. Количество озер в супераквальном положении существенно меньше (55 озер) относительно элювиального (163 озер) и трансэлювиального (114 озер), но достаточно, чтобы выявить, что её содержание в супераквальной позиции ниже (при  $p < 0,05$ ) в сравнении с другими геоморфологическими позициями ландшафта. Высокое значение коэффициента Z по критерию Краскел–Уаллис подтверждает эти различия. Распределение содержания ртути существенно изменяется под влиянием природных факторов (табл. 2).

В случае содержания растворенной в воде ртути объем выборки оказывается недостаточным для выявления достоверных различий. Отмечаются тенденции, противоположные тому, что наблюдается в случае донных отложений озер: элювиальная позиция < трансэлювиальная < супераквальная.

Содержание ртути в донных отложениях озер, находящихся в разных ландшафтах (урочищах), различается по критерию Kruskal–Wallis. Различия между категориями значимы при  $p < 0,05$ . Наибольшее содержание ртути отмечается в ОГМК, меньше значение – для болота и наименьшее значение характерно для озер в окружении минеральных почв (при

$p < 0,05$ ). Достоверные значения коэффициента Z подтверждают эти различия. В экспоненциальной модели распределения Hg в донных отложениях наблюдается сжатие распределения содержания ртути как случайной величины в ряду ОГМК>Болото>Минеральные почвы. Между минеральными почвами и болотами различия недостоверны. Наибольшее значение содержания ртути имеет в ОГМК, наименьшее – в болотах (верховые, переходные, низинные без озерков), также наименьшее значение наблюдается на минеральных почвах. Для растворенной ртути отмечается обратная тенденция в ряду ОГМК<Болото<Минеральные почвы, но различия недостоверны из-за малочисленности выборки по некоторым категориям.

**Таблица 2.** Характеристики содержания ртути (мкг/кг) в донных отложениях озер, расположенных в разных позициях ландшафта (элювиальной, трансэлювиальной и супераквальной), в урочище тупа (ОГМК, болото, минеральные почвы)

**Table 2.** Characteristics of mercury concentration ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) in bottom sediments of lakes located in different positions of the landscape: eluvial, transeluvial and superaqual, in the land of the type: lakes complex, bog, mineral soils

Факторы Factors (Variables)	Средняя концентрация, мкг/кг $\pm$ дов. интерв. Average concentration, $\mu\text{g}/\text{kg} \pm$ confidence interval	Количество проб Number of samples	Максимальная концентрация мкг/кг Maximum concentration, $\mu\text{g}/\text{kg}$	Медиана, мкг/кг Median, $\mu\text{g}/\text{kg}$
Положение в ландшафте/Positions in landscape				
Элювиальные Eluvial	50,5 $\pm$ 8,5	163	450	50,0
Трансэлювиальные Transeluvial	47,7 $\pm$ 11	114	338	45,8
Супераквальные Superaqual	22,7 $\pm$ 7,3	55	110	7,6
Все группы All groups	44,9 $\pm$ 5,8	332	450	50,0
Местность/Land				
ОГМК Lakes complex	52,3 $\pm$ 9,6	142	450	20,5
Болото Bog	42,7 $\pm$ 8,6	150	338	5,0
Минеральные почвы Mineral soils	27,2 $\pm$ 8,8	40	100	5,0
Все группы All groups	44,9 $\pm$ 5,8	332	450	5,6

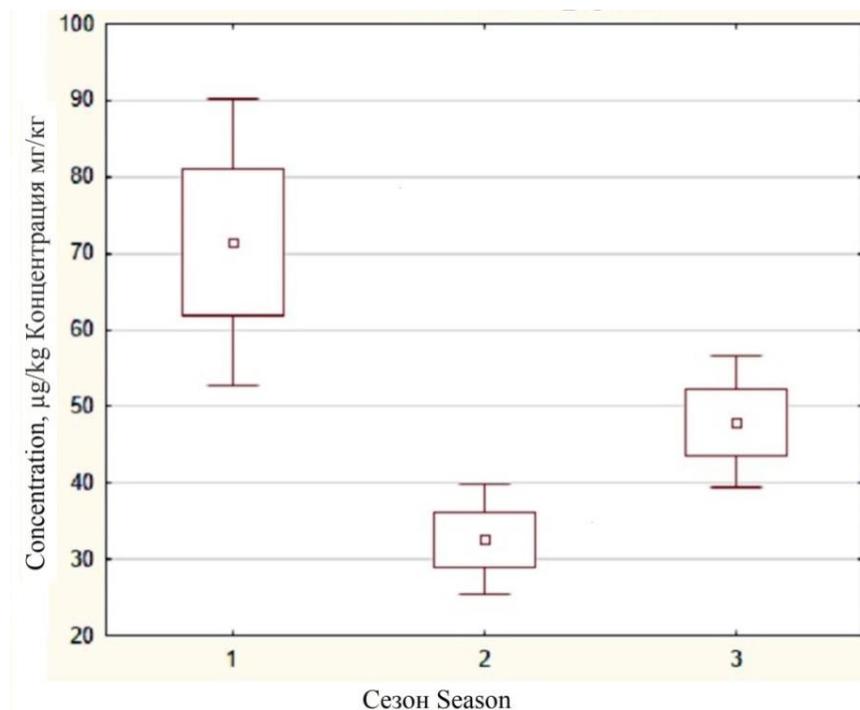
Размер озера не оказывает влияния на содержание ртути в донных отложениях, так, коэффициент корреляции Спирмена близок к нулю ( $R=0,09$ ). Расчет по категориям размеров озер методом Kruskal–Wallis также не выявил достоверных различий. Очень крупные озера имеют низкое содержание ртути в донных отложениях, но эффект не выявляется из-за их небольшого количества в данной выборке (4 озера).

Отмечаются различия, обусловленные временем отбора пробы: зима – с декабря по апрель, лето – с

июня по август, осень – с сентября по декабрь. Различия достоверны с высоким уровнем значимости (при  $p < 0,05$ ) (рис. 2).

Наибольший размах колебаний концентрации ртути в донных отложениях наблюдается в зимний период, возрастая до максимума, летом значения снижаются до минимума и опять возрастают осенью. Дополнительно, чтобы исключить возможную методическую ошибку, вызванную методом расчета показате-

телей, выборка разделена на два сезона: лето – с июня по сентябрь, зима – с ноября по апрель. Проведен непараметрический анализ Манна–Уитни с расчетом  $u$ -критерия, который дает более точную оценку относительно критерия Kruskal–Wallis. Анализ показывает достоверные различия концентрации ртути в донных отложениях – повышенные значения зимой и сниженные летом.



**Рис. 2.** Различия средних значений концентрации ртути ( $\mu\text{г}/\text{кг}$ ) в донных отложениях озер в разные сезоны года: 1 – с декабря по апрель, 2 – с июня по август, 3 – с сентября по ноябрь

**Fig. 2.** Differences in average values of mercury concentration ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) in bottom sediments of lakes in different seasons of the year: 1 – from December to April, 2 – from June to August, 3 – from September to November

Растворенная ртуть имеет противоположную тенденцию относительно донного содержания. Максимальное содержание ртути в воде отмечается в летнюю межень, осенью ее концентрации снижаются, минимальные значения характерны для зимней межени. Различия между осенними и зимними содержаниями растворенной в воде ртути недостоверны.

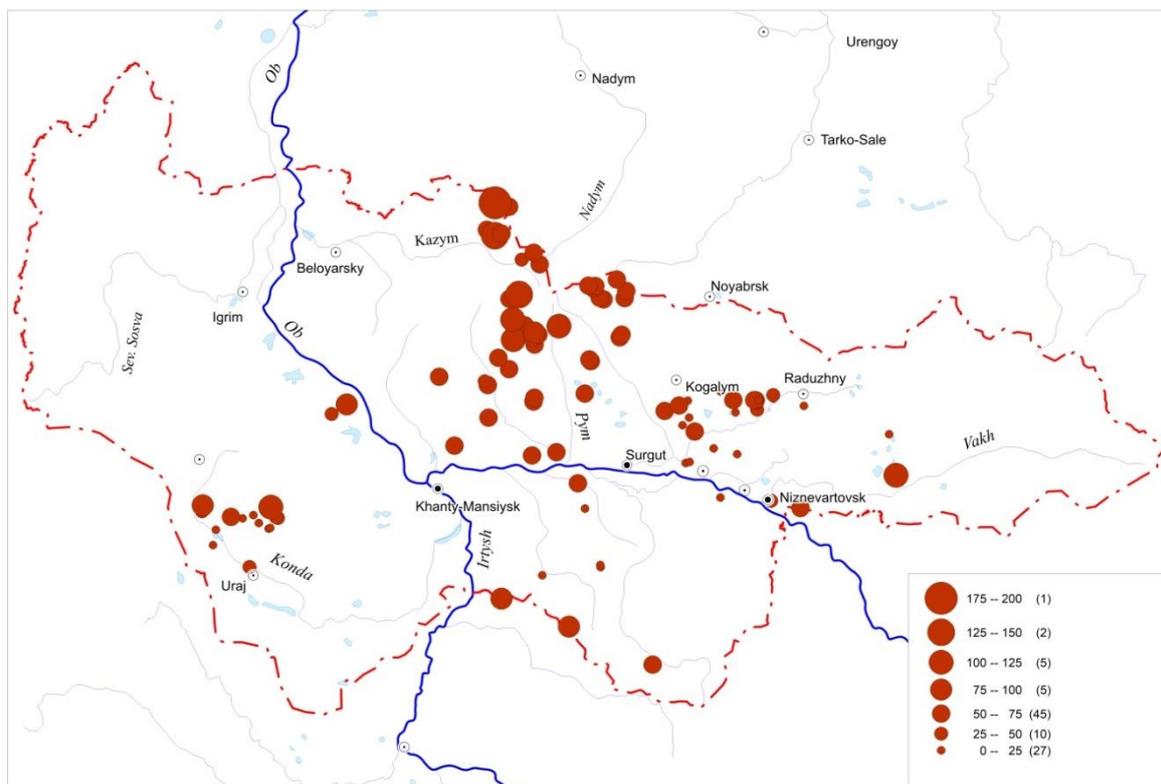
Закономерности распространения по широте и долготе содержания ртути донных отложений и ртути, растворенной в воде озер, имеют разные направленности. Содержание ртути донных отложений увеличивается с юга на север, хотя значение коэффициента Спирмена составляет  $r=0,4$  при  $p < 0,05$ , но и при таком значении  $r$  линейная зависимость хорошо выражена. Из рис. 3 видно, что в этом направлении увеличиваются размеры кругов, отражающих градации концентрации ртути (рис. 3, А). Долготная зависимость отсутствует. Для растворенной ртути наоборот заметна тенденция увеличения ее содержания с запада на восток (рис. 3, В), и коррелирует с долготой ( $r=0,62$  при  $p < 0,05$ ). Коэффициент корреляции Спирмена высок, что отражается в размере кругов концен-

трации растворенной ртути. Широтное значение коэффициента корреляции близко к нулю.

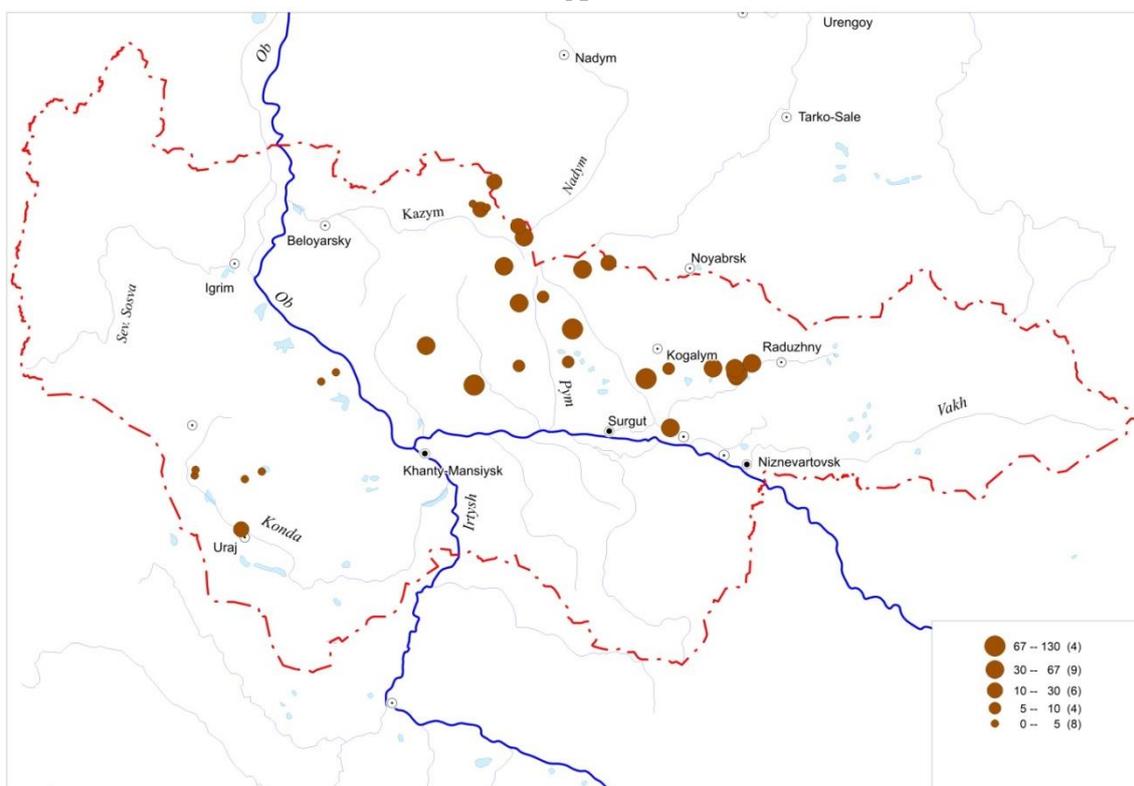
Использование фоновых наблюдений для сравнительного анализа содержания ртути на нефтяных месторождениях пока не представляется возможным, так как количество фоновых проб недостаточное для сравнительного анализа с использованием статистических методов.

#### Обсуждение результатов

Содержание ртути донных отложений и растворенная ее форма не коррелируют между собой, что кажется довольно странным явлением. Известно, что ртуть растворенная изменяется более динамично, наблюдается периодическое увеличение ее содержания, что не согласуется с более стабильной ситуацией в донных отложениях. Также сложно объяснить то, что содержание растворенной ртути в озерах не коррелирует с изменением ее содержания по широте, как в случае с донными отложениями. Более того, наблюдается положительная корреляция содержания растворенной ртути с долготой, выраженной в градусах, что отражает ее увеличение с запада на восток.



A



B

**Рис. 3.** Пространственное различие в содержании Hg (A) в донных отложениях (мкг/кг), (B) растворенной ртути (мкг/дм<sup>3</sup>) (Ханты-Мансийский автономный округ). Размер точек соответствует диапазону градации концентрации ртути, цифры показывают интервал изменения, в скобках указаны количества проб в этом интервале (Масштаб 1:60000). Условные обозначения даны на рис. 1

**Fig. 3.** Spatial difference in Hg content (A) in the bottom sediments lakes (µg/kg), (B) dissolved mercury (µg/dm<sup>3</sup>) (Khanty-Mansiysk region). The size of the points corresponds to the gradation of mercury concentration, the number of samples in this interval are in parentheses (Scale 1:60000). The legend is given in Fig. 1

Исследованием охвачены озера центральной части Ханты-Мансийского автономного округа, расположенные на разных элементах ландшафта в различных урочищах. Донные отложения в озерах являются аккумуляторами ртутных загрязнений, поступающих из атмосферы. Геохимический Кларк ртути в почвах равнинной части Западной Сибири составляет 0,07 мг/кг (0,08 мг/кг для земной коры) [7, 29], а в донных отложениях наблюдается в среднем 0,05 мг/кг, что указывает на отсутствие условий для накопления ртути в осадках озер.

В Канаде (Toolik Field Station) отмечается снижение содержание ртути в почвах тундры при движении с юга на север, что связывают со снижением продуктивности биоценозов [13], следовательно, весеннее вымывание ртути из атмосферы не приводит к её увеличению в почвах. Предпринятый географический анализ ртути в пяти озерах [25], расположенных в тундре, северной тайге, средней тайге, показывает, что наблюдается существенное увеличение её содержания в этой географической системе с 0,022–0,029 до 0,101–0,127 мг/кг. Смущает, что всего в двух озерах подзоны средней тайги отбирались образцы донных отложений, что нельзя признать репрезентативным для обобщения на всю природную подзону. Статистически обоснованной средней величиной в пределах средней тайги ХМАО предлагается принять  $0,046 \pm 0,012$  мг/кг. Однако вывод об увеличении содержания ртути в донных отложениях при переходе от тундры и северной тайги к средней тайге все равно подтверждается (увеличение почти в 2 раза). Объясняется это увеличением биологической активности и накоплением общего органического углерода в осадках. Известно, что зависимость содержания ртути в донных отложениях озер зависит от содержания общего органического углерода, и отражается на его содержании в рыбе [30]. В регионах, расположенных южнее, чем Ханты-Мансийский округ (юг Томской области), среднее содержание ртути в донных отложениях озер ещё больше и составляет 0,068 мг/кг, что соответствует местному региональному фону [31].

В элювиальных позициях макрорельефа территории ХМАО-Югры находятся верховые болота с грядово-мочажинным комплексом, для которых характерно повышенное содержание ртути, относительно супераквального положения, где преобладают минеральные почвы в окружении озер. Выявлено, что наибольшее содержание ртути характерно ОГМК –  $52,3 \pm 9,6$  мкг/кг. Установлено, что содержание ртути имеет минимальные значения в нижнем слое торфа верхового болота и увеличивается к поверхности [24]. Торф высокого яруса имеет более высокую концентрацию в верхнем 50 сантиметровом слое ( $137,4 \pm 42,4$  мкг/кг), чем в осоково-сфагновой топи ( $82,9 \pm 23,9$  мкг/кг) [27]. Содержание ртути в торфяниках Швеции существенно выше – 198,3 мкг/кг, а максимальные значения достигают от 130 до 460 мкг/кг [2] в органических горизонтах почв Канады. Исследование [12], проведенные в Канаде на Toolik Field Station в 200 км от побережья Северного Ледовитого океана, показывают, что в органических почвах средние значения концен-

трации ртути составляет  $99 \pm 6$  мкг/кг, за ними следует А-горизонты ( $65 \pm 8$  мкг/кг), а самые низкие обнаружены в В-горизонтах ( $45 \pm 3$  мкг/кг). Следовательно, торф способствует накоплению ртути, что объясняет более высокое её содержание в донных отложениях озер, расположенных на заболоченных водоразделах по сравнению с таковыми среди минеральных почв. Этот факт объясняет наши результаты достоверно меньшего содержания ртути в местах, где озера располагаются на минеральных почвах по сравнению с болотистой местностью.

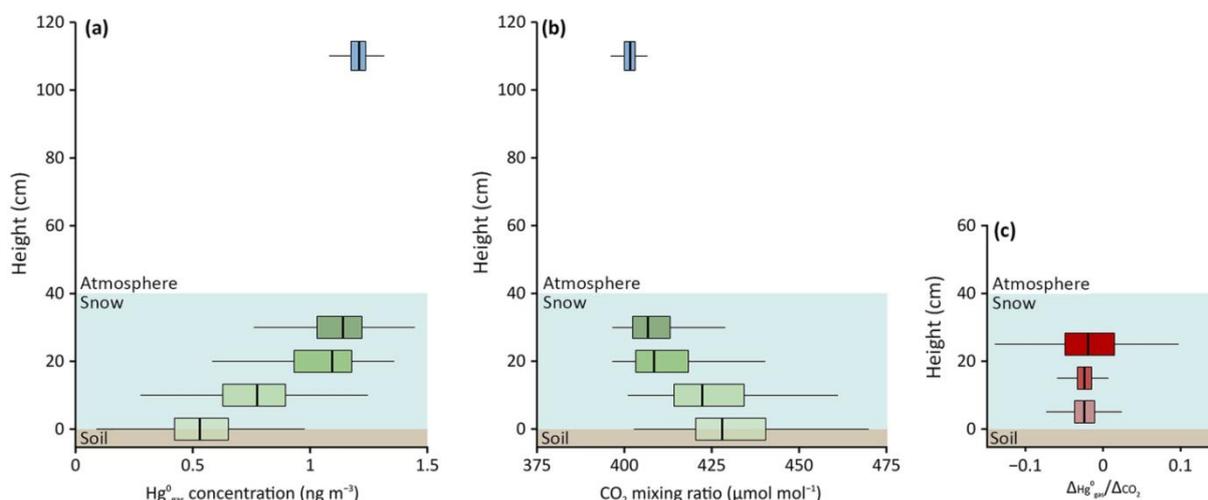
На территории ХМАО-Югры в пределах средней тайги с юга на север увеличивается пространство болот, занятое ОГМК, который располагается на верховых болотах и термокарстовых озерах. Показано, что термокарстовые озера имеют высокие скорости накопления ртути [31]. Для этого комплекса характерно повышенное содержание ртути в донных отложениях озер, что объясняет широтную зависимость с коэффициентом Спирмена ( $r=0,4$ ). Поэтому в пределах географических зон Западной Сибири наблюдается рост содержания ртути в донных отложениях озер с севера на юг с увеличением содержания органического углерода [32, 33]. Но в географических подзонах могут наблюдаться противоположные тенденции, обусловленные ландшафтно-географическими особенностями территории, связанные с увеличением количества озер на верховых болотах.

Гораздо сложнее объяснить то, что содержание растворенной ртути в озерах не коррелирует ее содержания с широтой, как в случае донных отложений. Содержание ртути донных отложений и растворенная ее форма не коррелируют между собой, что кажется довольно странным явлением. Но ртуть растворенная изменяется более динамично, наблюдается периодическое увеличение ее содержания, что не согласуется с более стабильной ситуацией в донных отложениях. Более того, наблюдается положительная корреляция с долготой: увеличение содержания растворенной ртути с запада на восток. Известно так называемое «ртутное дыхание Земли», когда ртуть переносится гидротермальными растворами из мантии по разломам в земной коре и попадает в экосистемы [7, 33], что вызывает временное увеличение растворенной формы ртути. Тогда увеличение содержания растворенной ртути объясняется наличием глубинных разломов рифтовой зоны раннего Триаса, располагающегося на востоке ХМАО. Один из крупных разломов идет от г. Омска к г. Нижневартовску и далее на северо-восток согласно тектонической карте. Ртуть, поступающая из земных глубин, частично задерживается в растворимой форме в озерах.

Изучение распределения во времени содержания ртути в снежном покрове показало, что процесс весеннего вымывания ртути из атмосферы присутствует, но не приносит существенного увеличения её поступления в тундровые экосистемы, что было показано на примере Toolik Field Station, Канада [22]. Исследования в ХМАО по распределению ртути по сезонам показывают, что в зимнюю межень наблюдается увеличение ртути в донных отложениях и снижение в

растворенном состоянии. Предполагается, что процессы перегнивания в донных осадках приводят к увеличению органики и связыванию ею ртути с выпадением в осадок. Подробные исследования на Toolik Field Station, проведенные в 2015 г. показывают, что концентрация ртути в атмосфере и в верхнем

слое снега более высокая, чем в глубине снегового слоя и на почве. Предполагается, что причиной такого распределения ртути в снеговом покрове является углекислый газ, который поступает из почвы снизу вверх, вытесняя ртуть к поверхности снега (рис. 4).



**Рис. 4.** Распределение концентрации газов  $Hg(0)$  (a) и  $CO_2$  (b) на глубинах в снеговом покрове (см): 10, 20, 30 и атмосфере; отношение содержания ртути и  $CO_2$  в снеговом покрове (c) [22]

**Fig. 4.** Snow concentration profiles for  $Hg(0)$  gas (a) and  $CO_2$  concentrations (b) in snow cover and atmosphere and the ratio  $Hg/CO_2$  (c) [22]

Наше предположение о накоплении ртути в донных отложениях в зимнюю межень выдвинуто по аналогии тому, что наблюдается в снеговом покрове, но в обратном направлении движения ртути. Тем самым в озерах подо льдом с накоплением углекислоты создаются условия для аккумуляции ртути в илах и органике, так как выход в атмосферу для ртути и газов перекрыт. После таяния льда условия миграции ртути выравниваются, и её концентрация в донных отложениях озер снижается к летней межени.

#### Выводы

1. Таким образом, донные осадки содержат в среднем  $0,046 \pm 0,012$  мг/кг ртути, растворенной ртути в озерах –  $0,025 \pm 0,014$  мг/дм<sup>3</sup>. Медиана концентрации ртути в донных отложениях составляет 0,05 мг/кг, а растворенной ртути – 0,013 мг/дм<sup>3</sup>. Значения их содержания ниже Кларка для горных пород (0,07 мг/кг).
2. Выявлено, что концентрация ртути в озерах, расположенных в элювиальном положении, выше, чем в озерах, расположенных в супераквальном положении, и различия достоверны  $p < 0,05$ . Трансэлювиальное положение озер близко с элювиальным положением по концентрации Hg в донных отложениях.
3. Установлено, что в донных отложениях озер, расположенных в озерково-грядно-мочажинном комплексе, концентрация ртути выше (при  $p < 0,05$ ), чем на минеральных почвах. Болота с грядами и мочажинами занимают в этом ряду среднее положение.

4. Следует признать наличие глобальной закономерности роста содержания ртути в донных отложениях озер в направлении от тундры, северной тайги к средней и южной тайге Западной Сибири. Однако в пределах подзоны средней тайги отмечается обратная тенденция. Рост концентрации ртути в донных отложениях с юга на север вызван увеличением площади болот озерково-грядово-мочажинного комплекса.
5. Установлено, что концентрация ртути в донных отложениях в зимнюю межень существенно выше, чем в летний период. Разделение выборки на три категории по сезонам (зима, лето и осень) показывает низкое содержание ртути летом, среднее осенью и максимально в зимний период. Данная закономерность может быть вызвана осаждением илов, ростом содержания в них органики, накоплением растворенной углекислоты подо льдом, что в целом способствует выпадению ртути из раствора и ее накоплению в донных осадках.
6. Содержание растворенной ртути в озерах закономерно возрастает в восточном направлении, что можно связать с влиянием разломов земной коры на динамику содержания ртути. Содержание ртути в донных отложениях озер такой закономерности не подтверждает.

Работа выполнена при поддержке Российской Академии Наук, Базовая программа научных исследований SBRAS 2017–2020 (Projects VI.52.1.10.AAAA-A17-117050-400146-5) и в рамках Программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. History of international collaboration on the exploration and development of the Arctic / O. Pasko, N. Staurskaya, A. Gryaznov, A. Zakharchenko // Handbook of Research on International Collaboration, Economic Development, and Sustainability in the Arctic. IGI Global Disseminator of Knowledge, 2018. A volume in the Practice, Progress, and Proficiency in Sustainability (PPPS) Book Series. Ch. 1. – P. 1–24. URL: <https://docslide.us/documents/solidworks-flow-simulation-2012-tutorial.html> <https://www.igi-global.com/chapter/history-of-international-collaboration-on-the-exploration-and-development-of-the-arctic/218603> (дата обращения 11.05.2019).
2. Budnik L.T., Casteleyn L. Mercury pollution in modern times and its socio-medical consequences // The Science of the Total Environment. – 2019. – V. 654. – P. 720–734.
3. Biogeochemical cycling of methylmercury in lakes and tundra watersheds of Arctic Alaska / C.R. Hammerschmidt, W.F. Fitzgerald, C.H. Lamborg, P.H. Balcom, C.M. Tseng // Environ Sci. Technol. – 2006. – V. 40. – № 4. – P. 1204–1211.
4. Bindler R. Mired in the past – looking to the future: geochemistry of peat and the analysis of past environmental changes // Global and Planetary Change. – 2006. – V. 53. – № 4. – P. 209–221.
5. El-Hayek J., Mercury H. Contamination in Arctic Canada: possible implications for aboriginal health // Journal on Developmental Disabilities. – 2007. – V. 13. – № 1. – P. 67–89.
6. Оценка накопления ртути в объектах живой и неживой природы севера Европейской территории России / А.Э. Овсепян, Ю.А. Федоров, А.А. Зимовец, В.А. Савицкий // В мире научных открытий. – 2016. – Т. 5. – № 77. – С. 116–132.
7. Лапердина Т.Г. Определение ртути в природных водах. – Новосибирск: Наука, 2000. – 222 с.
8. Long-term continuous monitoring of GEM in the ambient air on the Russian Arctic. Impact of the Eyjafjallajokull and Grimsvotn volcanic eruptions in Iceland / F. Pankratov, A. Mahura, O. Katz, A. Konoplev // Synopsis and Poster, Boundary Layers in High Latitudes: Physical and Chemical Processes Including Atmosphere-Ice Chemical Interactions (AICI). European Geosciences Union General Assembly 2012. – Vienna, Austria, April 22–27, 2012. – V. 14. DOI: 10.5194/acp-2018-1228.
9. Tundra uptake of atmospheric elemental mercury drives Arctic mercury pollution / D. Obrist, Y. Agnan, C.L. Olson, C.W. Moore, M. Jiskra, J.E. Sonke, D.P. Colegrove, J. Hueber, D. Helmig // Nature. – 2017. – V. 547. – № 7662. – P. 201–204. DOI: 10.1038/nature22997
10. Kumar A., Wu S. Mercury pollution in the Arctic from wildfires: source attribution for the 2000s // Environmental Science and Technology. – 2019. – V. 53. – № 19. – P. 11269–11275. DOI: [doi.org/10.1021/acs.est.9b01773](https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01773).
11. Modern and historic atmospheric mercury fluxes in northern Alaska: global sources and Arctic depletion / W.F. Fitzgerald, D.R. Engstrom, C.H. Lamborg, C.M. Tseng, P.H. Balcom, C.R. Hammerschmidt // Environ. Sci. Technol. – 2005. – V. 39. – P. 557–568.
12. Mercury in active-layer tundra soils of Alaska: Concentrations, pools, origins, and spatial distribution / C. Olson, M. Jiskra, H. Biester, J. Chow, D. Obrist // Global Biogeochemical Cycles. – 2018. – V. 32. – P. 1–16. DOI: 10.1029/2017GB005840.
13. The fate of mercury in Arctic terrestrial and aquatic ecosystems / T.A. Douglas, L. Loseto, R.R. Macdonald, P.M. Outridge // Environ. Chem. – 2012. – V. 9. – P. 321–355.
14. Mercury in the Canadian Arctic terrestrial environment: an update / M. Gamberg, J. Chételat, A. Poulain, C. Zdanowicz, J. Zheng // Science of the Total Environment. – 2015. – V. 3. – № 4. – P. 509–510.
15. Dynamic oxidation of gaseous mercury in the Arctic troposphere at polar sunrise / S. Lindberg, S. Brooks, C. Lin, K. Scott, M. Landis, R. Stevens, M. Goodsite, A. Richter // Environ Sci Technol. – 2002. – V. 15. – № 36 (6). – P. 1245–1256.
16. Antarctic springtime depletion of atmospheric mercury / R. Ebinghaus, H.H. Kock, C. Temme, J.W. Einax, A.G. Lowe, A. Richter, J.P. Burrows, W.H. Schroeder // Environ Sci Technol. – 2002. – V. 15. – № 36 (6). – P. 1238–1244.
17. Domergue A. Diurnal cycles of gaseous mercury within the snowpack at Kuujuaupik, Whapmagoostui, Quebec, Canada // Environ Sci Technol. – 2003. – V. 37. – P. 3289–3297.
18. Фоновый мониторинг атмосферной ртути в российской Арктике и региона озера Байкал / Ф.Ф. Панкратов, А.Г. Махура, Ю.В. Корпусова, В.В. Милоков // Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты: Сборник трудов Второго международного симпозиума. – Новосибирск: ИИХ СО РАН, 2015. – 418 с.
19. Elevated mercury measured in snow and frost flowers near Arctic sea ice leads / T.A. Douglas, M. Sturm, W.R. Simpson, S. Brooks, S.E. Lindberg, D.K. Perovich // Geophysical research letters. – 2005. – V. 32. – P. 1–4.
20. Diurnal production of gaseous mercury in the alpine snowpack before snowmelt / X. Fain, S. Grangeon, E. Bahlmann, J. Fritsche // J. Geophys. Res. – 2007. – V. 112. – P. 1–12. DOI: 10.1029/2007JD008520.
21. How relevant is the deposition of mercury onto snowpacks? – Part 2: A modeling study / D. Durnfor, A. Dastoor, A. Ryzhkov, L. Poissant, M. Pilote, D. Figueras-Nieto // Atmos. Chem. Phys. – 2018. – V. 12. – P. 9251–9274. DOI: 10.5194/acpd-12-2647-2012.
22. Mercury in the Arctic tundra snowpack: temporal and spatial concentration patterns and trace gas exchanges / Y. Agnan, T. Douglas, D. Helmig, J. Hueber, D. Obrist // The Cryosphere. – 2018. – V. 12. – P. 1939–1956. DOI: 10.5194/tc-12-1939-2018.
23. Barkay T., Poulain A.J. Mercury (micro) biogeochemistry in polar environments // FEMS Microbiology Ecology. – 2007. – V. 59. – № 2. – P. 232–241.
24. Веретенникова Е.Э., Головацкая Е.А. Распределение свинца и ртути в торфяных залежах Западной Сибири (болота Васюганья) // Химия в интересах устойчивого развития. – 2012. – № 20. – С. 181–187.
25. Особенности геохимического распределения валового содержания ртути в донных отложениях озер Западной Сибири / Н.В. Морозова, Н.С. Ларина, Т.П. Котова, Д.З. Шайхутдинова // Вестник Тюменского государственного университета Экология и природопользование. – 2015. – Т. 1. – № 1. – С. 65–73.
26. Лёзин В.А. Реки и озера Тюменской области (Словарь-справочник). – Тюмень: Пеликан, 1995. – 300 с.
27. Методические рекомендации по применению Требований к определению исходной (фоновой) загрязненности компонентов природной среды, проектированию и ведению системы экологического мониторинга в границах лицензионных участков недр на территории Ханты-Мансийского автономного округа. – Ханты-Мансийск: ГП «Полиграфист», 2004. – 92 с.
28. Виноградов А.П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия. – 1962. – № 7. – С. 555–571.
29. Kainz M., Lucotte M. Mercury concentrations in lake sediments – revisiting the predictive power of catchment morphometry and organic matter composition // Water, Air, and Soil Pollution. – February 2006. – V. 170. – № 1–4. – P. 173–189.
30. Иванов А.Ю., Губина К.А. Ртуть в донных отложениях слабопроточных водоемов юга Томской области // Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты. – Новосибирск: Изд-во ИИХ СО РАН, 2015. – С. 162–164.
31. Кравцова В.И., Родионова Т.В. Исследование динамики площади и количества термокарстовых озер в различных районах криолитозоны России по космическим снимкам // Криосфера Земли. – 2016. – Т. 20. – № 1. – С. 81–89.
32. Burke S.M., Zimmerman C.E., Branfireun B.A. Correction to: patterns and controls of mercury accumulation in sediments from three thermokarst lakes on the Arctic Coastal Plain of Alaska // Aquat Sci. – 2019. – V. 81. – № 5. URL: <https://doi.org/10.1007/s00027-018-0601-4> (дата обращения 11.05.2019).
33. Мешеряков К.А., Карасева Т.В. Особенности формирования триасовых прогибов севера Западной Сибири в связи с нефтегазовой геологией. Теория и практика. – 2010. – Т. 5. – № 3. – С. 1–10.

Поступила 02.12.2019 г.

**Информация об авторах**

**Захарченко А.В.**, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, Тюменский научный центр Сибирского отделения Российской Академии Наук.

**Пасько О.А.**, доктор сельскохозяйственных наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета.

**Тигеев А.А.**, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Тюменский научный центр Сибирского отделения Российской Академии Наук.

UDC 57.044:550.46

## IMPACT OF NATURAL FACTORS ON MERCURY IN LAKES OF THE NORTH OF WESTERN SIBERIA

**Alexander V. Zakharchenko<sup>1</sup>,**  
ttruubbaa@mail.ru

**Olga A. Pasko<sup>2</sup>,**  
oap@tpu.ru

**Alexander A. Tigeev<sup>1</sup>,**  
ttruubbaa@mail.ru

<sup>1</sup> Institute of problems of development of the North,  
86, Malygin avenue, Tyumen, 625026, Russia.

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

**The relevance** of the study is caused by the fact that mercury is involved in the global planetary biogeochemical cycle and is included in the food chain with the accumulation in organisms of predatory species of animals and in the indigenous population. With respect to Western Siberia, studies are fragmentary, and generalizations are made on small samples, which makes background studies of mercury content in the bottom sediments of lakes relevant in a representative sample.

**The aim** of the study is to analyze and generalize the background space-time observations of the gross mercury content in the bottom sediments, as well as dissolved, depending on natural factors in the middle taiga within the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug.

**The object** of study is the background concentration of dissolved Hg and mercury in the bottom sediments of lakes. 95 lakes, 322 samples of bottom sediments taken at different times were studied.

**Methods:** atomic absorption spectrometry («cold steam» method) determination of mercury in accredited laboratories in accordance with the guidelines. Background environmental monitoring data from 2007 to 2011 were used.

**Result.** The average background concentration of mercury in bottom sediments is  $0,046 \pm 0,012$  mg/kg, dissolved mercury –  $0,025 \pm 0,014$  mg/kg. The highest concentration of Hg was found in the eluvial and transeluvial positions, the lowest – in superaqueous landscapes. The concentration of Hg is maximum in lake-ridge-hollow complex of peat bogs and lowest – in the bottom sediments of lakes in mineral soils. There is a tendency to increase the concentration of mercury in the bottom sediments of lakes from the tundra zone, the Northern taiga to the sub-zone of the middle taiga. However, bogging increases from south to north, which contributes to increase in mercury content in lake bottom sediments ( $R=0,4$ ). There is an increase in dissolved mercury in lakes from West to East (longitude) ( $R=0,6$ ). The assessment of changes in mercury content in bottom sediments suggests that mercury content is higher in winter than in summer. The concentration of dissolved mercury increases from west to east, but mercury from bottom sediments is not consistent with this.

### Key word:

Mercury, sediments, lakes, landscape-geographical factors, dynamics, Subarctic

This work was supported by the Russian Academy of Sciences, Basic Research Program SB RAS 2017–2020 (Projects VI.52.1.10. AAAA-A17-117050-400146-5) and is carried out at National Research Tomsk Polytechnic University within the framework of Tomsk Polytechnic University Competitiveness Enhancement Program.

### REFERENCES

- Pasko O., Staurskaya N., Gryaznov A., Zakharchenko A. History of international collaboration on the exploration and development of the Arctic. *Handbook of Research on International Collaboration, Economic Development, and Sustainability in the Arctic. IGI Global Disseminator of Knowledge*, 2018, pp. 1–23. Available at: <https://docslide.us/documents/solidworks-flow-simulation-2012-tutorial.html> <https://www.igi-global.com/chapter/history-of-international-collaboration-on-the-exploration-and-development-of-the-arctic/218603> (accessed 11 May 2019).
- Budnik L.T., Casteleyn L. Mercury pollution in modern times and its socio-medical consequences. *The Science of the Total Environment*, 2019, vol. 654, pp. 720–734.
- Hammerschmidt C.R., Fitzgerald W.F., Lamborg C.H., Balcom P.H., Tseng C.M. Biogeochemical cycling of methylmercury in lakes and tundra watersheds of Arctic Alaska. *Environ Sci Technol*, 2006, vol. 40, no. 4, pp. 1204–1211.
- Bindler R. Mired in the past – looking to the future: geochemistry of peat and the analysis of past environmental changes. *Global and Planetary Change*, 2006, vol. 53, pp. 209–221.
- El-Hayek J.H. Mercury contamination in Arctic Canada: possible implications for aboriginal health. *Journal on Developmental Disabilities*, 2007, vol. 13, no. 1, pp. 67–89.
- Ovsepyan A.E., Fedorov Yu.A., Zimovets A.A., Savitsky V.A. Estimation of mercury accumulation in the objects of animate and inanimate nature in the north of European Russia. *World of Scientific Discoveries*, 2016, vol. 77, no. 5, pp. 116–132. In Rus.
- Laperdina T.G. *Opredeleeniye rtuti v prirodnykh vodakh* [Mercury determination in Natural Waters]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2000. 222 p.
- Pankratov F., Mahura A., Katz O., Konoplev A. Long-term continuous monitoring of GEM in the ambient air on the Russian Arctic. Impact of the Eyjafjallajokull and Grimsvotn volcanic eruptions in Iceland. *Synopsis and Poster, Boundary Layers in High Latitudes: Physical and Chemical Processes Including Atmosphere-Ice Chemical Interactions (AICI). European Geosciences Union General Assembly 2012*. Vienna, Austria, April 22–27, 2012. Vol. 14, DOI: 10.5194/acp-2018-1228.
- Obrist D., Agnan Y., Olson C.L., Moore C.W., Jiskra M., Sonke J.E., Colegrove D.P., Hueber J., Helmig D. Tundra uptake of atmospheric elemental mercury drives Arctic mercury pollution.

- Nature*, 2017, vol. 547, no. 7662, pp. 201–204. DOI: 10.1038/nature22997
10. Kumar A., Wu S. Mercury pollution in the Arctic from wildfires: source attribution for the 2000s. *Environmental Science and Technology*, 2019, vol. 53, no. 19, pp. 11269–11275. DOI: doi.org/10.1021/acs.est.9b01773.
  11. Fitzgerald W.F., Engstrom D.R., Lamborg C.H., Tseng C.M., Balcom P.H., Hammerschmidt C.R. Modern and historic atmospheric mercury fluxes in northern Alaska: global sources and Arctic depletion. *Environ. Sci. Technol.*, 2005, vol. 39, pp. 557–568.
  12. Olson C., Jiskra M., Biester H., Chow J., Obrist D. Mercury in active-layer tundra soils of Alaska: Concentrations, pools, origins, and spatial distribution. *Global Biogeochemical Cycles*, 2018, vol. 32, pp. 1–16.
  13. Douglas T.A., Loseto L., Macdonald R.R., Outridge P.M. The fate of mercury in Arctic terrestrial and aquatic ecosystems. *Environ. Chem*, 2012, vol. 9, pp. 321–355.
  14. Gamberg M., Chételat J., Poulain A.J., Zdanowicz C., Zheng J. Mercury in the Canadian Arctic terrestrial environment: an update. *Science of the Total Environment*, 2015, vol. 15, no. 6, pp. 509–510.
  15. Lindberg S.E., Brooks S., Lin C.J., Scott K.J., Landis M.S., Stevens R.K., Goodsite M., Richter A. Dynamic oxidation of gaseous mercury in the Arctic troposphere at polar sunrise. *Environ Sci Technol*, 2002, vol. 36, no. 6, pp. 1245–1256.
  16. Ebinghaus R., Kock H.H., Temme C., Einax J.W., Lowe A.G., Richter A., Burrows J.P., Schroeder W.H. Antarctic springtime depletion of atmospheric mercury. *Environ Sci Technol*, 2002, vol. 36, pp. 1238–1244.
  17. Dommergue A. Diurnal cycles of gaseous mercury within the snowpack at Kuujuarapik, Whapmagoostui, Quebec, Canada. *Environ Sci Technol*, 2003, vol. 37, pp. 3289–3297.
  18. Pankratov F.F., Makhura A.G., Korpusova Yu.V., Milyukov V.V. Fonovy monitoring atmosfery rtuti v rossiyskoy Arktike i regiona ozera Baykal [Background monitoring of atmospheric mercury in the Russian Arctic and the lake Baikal region]. *Rtut v biosfere: ekologo-geokhicheskiye aspekty* [Mercury in the biosphere: ecological and geochemical aspects]. Novosibirsk, INKH SO RAN Publ., 2015. pp. 283–287.
  19. Douglas T.A. Elevated mercury measured in snow and frost flowers near Arctic sea ice leads. *Geophysical research letters*, 2005, vol. 32, pp. 1–4.
  20. Fain X. Diurnal production of gaseous mercury in the alpine snowpack before snowmelt. *J. Geophys. Res.*, 2007, vol. 112, pp. 1–12.
  21. Durnfor D., Dastoor A., Ryzhkov A., Poissant L., Pilote M., Figueras-Nieto D. How relevant is the deposition of mercury onto snowpacks? P. 2: A modeling study. *Atmos. Chem. Phys.*, 2012, vol. 12, pp. 9251–9274. DOI: 10.5194/acpd-12-2647-2012.
  22. Agnan Y., Douglas T.A., Helmig D., Hueber J., Obrist D. Mercury in the Arctic tundra snowpack: temporal and spatial concentration patterns and trace gas exchanges. *The Cryosphere*, 2018, vol. 12, pp. 1939–1956. DOI: 10.5194/tc-12-1939-2018.
  23. Barkay T., Poulain A.J. Mercury (micro) biogeochemistry in polar environments. *FEMS Microbiology Ecology*, 2007, vol. 59, no. 2, pp. 232–241.
  24. Veretennikova E., Golovatskaya E.A. Raspredeleeny svintsia i rtuti v torfyanykh zalezakh Zapadnoy Sibiry (bolota Vasyuganya) [Lead and mercury distribution in peat deposits of Western Siberia (Vasyugan swamps)]. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*, 2012, vol. 20, pp. 181–187.
  25. Morozova N.V., Larina N.S., Kotova T.P. Features of the geochemical distribution of the gross content of mercury in sediments of lakes in Western Siberia. *Vesnik TSU. Ecology and nature management*, 2015, vol. 1, no. 1 (1), pp. 65–73. In Rus.
  26. Lezin V.A. *Reki i ozera Tyumenskoy oblasti (slovar-spravochnik)* [The rivers and lakes of the Tyumen region (Dictionary-Handbook)]. Tyumen, Pelikan Publ., 1995. 300 p.
  27. *Metodicheskie rekomendatsii po primeneniyu Trebovaniy k opredeleniyu iskhodnoy (fonovoy) zagryaznenosti komponentov prirodnoy sredy, proektirovaniyu i vedeniyu sistemy ekologicheskogo monitoringa v granitsah litsenziy onnogo okruga* [Guidelines for application of the Requirements for determining the initial (background) pollution of environmental components, designing and maintaining an environmental monitoring system within the boundaries of licensed subsoil areas in the Khanty-Mansi Autonomous Area]. Khanty-Mansiysk, GP «Poligrafist» Publ., 2004. 92 p.
  28. Vinogradov A.P. Average content of chemical elements in the main types of igneous rocks of the earth's crust. *Geochemistry*, 1962, no. 7, pp. 555–571. In Rus.
  29. Kainz M., Lucotte M. Mercury concentrations in lake sediments – revisiting the predictive power of catchment morphometry and organic matter composition. *Water, Air, and Soil Pollution*, February 2006, vol. 170, Iss. 1–4, pp. 173–189.
  30. Ivanov A.Yu., Gubina K.A. Rtut v donnykh otlozheniyakh slaboprotochnykh vodoemov yuga Tomskoy oblasti [Mercury in bottom sediments of low-flow reservoirs in the south of Tomsk region]. *Rtut v biosfere: ekologo-geokhicheskiye aspekty* [Mercury in the biosphere: ecological and geochemical aspects]. Novosibirsk, INKh SB RAS Publ., 2015. pp. 162–164.
  31. Kravtsova V.I., Rodionova T.V. Investigation of the dynamics in area and number of thermokarst lakes in various regions of Russian chryolithozone, using satellite images. *Earth cryosphere*, 2016, vol. 20, no. 1, pp. 81–89. In Rus.
  32. Burke S.M., Zimmerman C.E., Branfireun B.A. Correction to: patterns and controls of mercury accumulation in sediments from three thermokarst lakes on the Arctic Coastal Plain of Alaska. *Aquat Sci*, 2019, vol. 81, no. 5. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00027-018-0601-4> (accessed 11 May 2019).
  33. Meshcheryakov K.A., Karaseva T.V. Features of the formation of the Triassic troughs of the north of Western Siberia in connection with oil and gas content. *Oil and gas geology. Theory and practice*, 2010, vol. 5, no. 3, pp. 1–10. In Rus.

Received: 2 December 2019.

#### Information about the authors

**Alexander V. Zakharchenko**, Dr. Sc. principle scientific researcher, Institute of problems of development of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

**Olga A. Pasko**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Alexander A. Tigeev**, Cand. Sc., senior scientist, Institute of problems of development of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

УДК 621.314.21-027.3.04

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ОБМОТОК ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ОСНОВЕ КОММУТАЦИОННЫХ ИМПУЛЬСОВ

Лавринович Валерий Александрович<sup>1</sup>,  
lavrhome@mail.ru

Лавринович Алексей Валериевич<sup>2</sup>,  
lavrinovich86@yandex.ru

Мытников Алексей Владимирович<sup>3</sup>,  
mytnikov66@mail.ru

<sup>1</sup> Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский Научно-Исследовательский Институт Технической Физики – Всероссийский Электротехнический Институт, Россия, 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 12.

<sup>2</sup> Томский научно-исследовательский и проектный институт нефти и газа, Россия, 634027, г. Томск, пр. Мира, 72.

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

**Актуальность исследования.** На всех этапах технологической цепи добычи, транспортировки и последующего использования геологических ресурсов применяется широкий спектр высоковольтного оборудования, существенную часть которого составляют высоковольтные трансформаторы различных типов, назначений и классов напряжения. Поэтому общая энергетическая эффективность и надежность производства геологических ресурсов существенно зависят от состояния высоковольтного трансформаторного оборудования. Дефектное состояние одной трансформаторной единицы часто является причиной внезапной аварийной остановки всей технологической цепи комплексного производственного процесса. Результатом подобного инцидента является пожар, сопровождаемый взрывом высоковольтного ввода, разлив масла, загрязнение окружающей среды и материальный ущерб, исчисляемый многомиллионными суммами. К возникновению дефектного и, как следствие, аварийного состояния приводит ряд электрофизических и эксплуатационных факторов, воздействующих на изоляцию и активную часть трансформаторов. В свою очередь наиболее проблемным элементом активной части трансформатора оказываются обмотки как высокого, так и низкого напряжения, в которых появляются механические смещения как результат воздействия пондеромоторных сил токов короткого замыкания. Подобные дефекты могут развиваться длительное время, и трансформатор может находиться в работе в номинальном режиме. На некотором этапе развития дефект становится критическим, повреждения изоляции обмотки при очередном коротком замыкании ведут к возгоранию с последующей аварией. Для предупреждения подобных ситуаций необходима эффективная технология контроля состояния обмоток. Стандартные методы являются малоэффективными для выявления дефектов обмотки на ранних стадиях развития. Среди новых и рекомендованных международными экспертными институтами МЭК и СИГРЭ являются модификации импульсного метода, прежде всего метод частотного анализа. Однако, не смотря на признание как наиболее достоверного и перспективного, указанный метод далеко не всегда позволяет обнаружить дефекты обмоток, особенно на ранних этапах развития. Кроме того, обязательным условием применения технологии метода частотного анализа является полное снятие напряжения, расшиновка трансформатора и использование специальной аппаратуры контроля. При этом для получения достоверных результатов диагностики необходимо наличие специальных эталонных сигналов – нормограмм, которые отсутствуют практически для всего парка трансформаторов, используемых в технологических процессах добычи и переработки геологических ресурсов. Эти факторы снижают общую эффективность технологии метода частотного анализа. Поэтому в настоящее время вопрос по исследованию и разработке технологии контроля состояния обмоток под рабочим напряжением является в полной мере актуальным.

**Цель:** экспериментальное исследование принципиальной возможности контроля состояния обмоток трансформатора на основе процессов коммутации в высоковольтной сети.

**Методы:** метод моделирования на реальном физическом объекте. В трансформаторе НТМИ-6 на одной фазе созданы дефекты механического смещения обмоток. Две другие фазы имеют исправное состояние. При помощи специальной схемы трансформатор включался в сеть. С помощью электронного осциллографа Tektronix типа TDS-2012 осуществлялась регистрация напряжения на первичной обмотке и сигнала отклика с одноименной фазы вторичной обмотки. Измерения повторялись для двух других фаз по такой же схеме.

**Результаты.** На реальном трансформаторе типа НТМИ-6 экспериментально исследована и установлена принципиальная возможность осуществления контроля механического состояния его обмоток при использовании отклика напряжения на вторичной обмотке трансформатора при включении трансформатора в сеть. Таким образом, показано, что при включении трансформатора в сеть подключаемое напряжение может служить диагностическим импульсом, пригодным для зондирования механического состояния обмоток трансформатора по методу низковольтных импульсов.

### Ключевые слова:

Контроль состояния, импульсный метод, дефект обмотки, эффективность диагностики.

## Введение

Большая часть энергетического оборудования, применяемого в горнорудной и нефтегазовой промышленности для добычи, транспортировки и переработки природных ресурсов, выработала свой номинальный срок службы, но продолжает находиться в состоянии интенсивной эксплуатации. Такая ситуация создается совокупностью экономических и технических факторов. Недостаток финансовых средств существенно сдерживает, а в ряде случаев не позволяет осуществлять замену высоковольтного оборудования с дефектным состоянием, срок эксплуатации которого завершен. Технический фактор заключается в отсутствии пригодных по всем критериям современных средств и технологий контроля состояния электрооборудования. Эффективность существующих методов диагностики электрооборудования во многих случаях не отвечает требованиям сегодняшнего дня.

Из-за старения целого поколения силовых трансформаторов сегодняшняя электроэнергетика столкнулась с серьезными проблемами, так как отказы трансформаторов, их ремонт и соответствующие затраты приводят к значительным экономическим потерям. Трансформаторы стали наиболее проблемными элементами электрических сетей. Потребность в надежных методах контроля и диагностики привела ведущих экспертов в этой области к необходимости разработки новых технологий, которые позволяют значительно увеличить надежность и оптимизировать работу каждого из элементов сети. Выход из строя такого объекта энергосистемы, как силовой трансформатор, часто приводит к аварии с тяжелыми последствиями. Одной из основных причин подобной аварийной ситуации являются изменения механического состояния обмоток трансформатора, такие как выпучивание витков, сдвиг витков в аксиальном и радиальном направлениях, распрессовка обмотки и т. п.

Существующие технологии диагностики далеко не всегда позволяют выявлять дефекты активных частей, и, как результат, число аварий растет. Так, по данным, представленным на IV Всероссийской научно-технической конференции ведущими специалистами по диагностике силового электрооборудования, существующие технологии контроля трансформаторов выявляют не более 10 % дефектов [1, 2]. При этом статистический анализ показывает, что достаточно часто имеет место необоснованная отбраковка вполне работоспособного оборудования [3, 4]. К наиболее точным и достоверным технологиям контроля состояния обмоток трансформаторов относятся метод низковольтных импульсов и метод частотных характеристик.

Метод низковольтных импульсов (НВИ) был исследован и доведен до практического применения в Институте электротехники, Варшава, Польша в 1966 г. Идея метода НВИ состоит в использовании импульса относительно низкого (200–400 В) напряжения, поступающего на обмотку обследуемого трансформатора, и снятия импульсного сигнала с соседней обмотки. Подаваемый на обмотку импульс получил название «зондирующий импульс». Импульсный сигнал, снимаемый с одной из ряда других обмоток, вызывается

появлением зондирующего импульса и называется «сигнал отклика», или «отклик». Сигнал отклика представляет собой результат переходного процесса, вызванного зондирующим импульсом. В результате формирования дефектного состояния обмотки характеристики переходного процесса изменяются и, соответственно, изменяется форма сигнала отклика. Сравнение формы откликов, снятых по идентичной схеме при одинаковых параметрах зондирующего импульса, позволяет сделать вывод о наличии или отсутствии дефекта в обмотке. Определение наличия дефектного состояния на основе сравнения откликов лежит в основе метода НВИ [5]. Такое последовательное сравнение результатов воздействия зондирующих импульсов оказалось эффективным способом контроля состояния обмоток трансформаторов. Метод НВИ практически с момента изобретения приобрел широкую популярность и интенсивно развивался во всех высоковольтных лабораториях и электроэнергетических системах. Существенное развитие метода НВИ состоялось в 70–80 гг. XX в. во Всесоюзном Электротехническом Институте им. Ленина [6–8]. Метод НВИ в результате детальных исследований был значительно усовершенствован и получил название «импульсное дефектографирование» [6–9]. Технология импульсного дефектографирования успешно внедрялась на трансформаторных заводах и энергосистемах РФ [10, 11]. Однако сложность воспроизведения измерений, погрешности при оценке состояния обмоток на основе анализа сигналов отклика и необходимость в наличии нормограмм – откликов обмоток в исправном состоянии – привели к необходимости модернизации метода НВИ. В связи с этим в конце XX в. в лабораториях Северной Америки метод НВИ был трансформирован в технологию, получившую название «метод частотных характеристик», или МЧА. Отличие от первоначального или «классического» метода НВИ состоит в принципиальной другой форме и длительности как зондирующего импульса, так и сигнала отклика. Если в методе НВИ используется зондирующий импульс длительностью от сотен миллисекунд до единиц микросекунд, то в методе МЧА применяется сигнал амплитудой около 10 В, частота которого плавно изменяется от единиц Гц до нескольких МГц. В свою очередь, отклик, представляющий собой короткий импульс в методе НВИ, в технологии МЧА есть амплитудно-частотная характеристика обмотки, представляющая собой реакцию на сигнал, подаваемый на соседнюю обмотку. МЧА позволил преодолеть ряд недостатков, свойственных методу НВИ, а именно, снизилась зависимость от точности схемы воспроизведения измерений. Вместе с этим возросла корректность результатов контроля состояния обмоток, так как сравнение частотных характеристик, выполняемое с помощью программных средств, обладает меньшей погрешностью, чем сравнение осциллограмм импульсных откликов, выполняемое визуально. Поэтому на сегодняшний день технология МЧА является основной в электроэнергетических системах США, Канады, Бразилии, Евросоюза, Японии, Южной Кореи, Китая и многих других стран [12–17].

Не смотря на все преимущества и высокий производственный потенциал МЧА, ошибки при выявле-

нии дефектов и постановки диагноза встречаются достаточно часто при использовании и метода НВИ, и МЧА [1–4]. Поэтому вопрос о разработке достоверной технологии качественной диагностики обмоток остается актуальным.

В лаборатории диагностики и испытаний Инженерной школы энергетики ТПУ исследуется способ увеличения эффективности традиционного метода низковольтных импульсов. Одним из путей этого направления исследований является использование зондирующего импульса по форме, близкой к прямоугольной и имеющей длительность десятки–сотни наносекунд. Результаты экспериментальных исследований, демонстрирующие перспективность пути трансформирования импульсного метода в направлении уменьшения длительности зондирующего импульса, приведены в [18–21].

В энергосистемах Евросоюза, Америки и Юго-Восточной Азии МЧА считается наиболее предпочтительным и достоверным [14–17]. Однако отсутствие возможности диагностики под рабочим напряжением и необходимость наличия нормограмм не позволяют считать МЧА технологией завтрашнего дня.

Среди основных тенденций развития процесса контроля состояния обмоток выделяются два основных – выявление дефектов на ранней стадии развития и контроль состояния обмоток без снятия рабочего напряжения и расшиновки трансформатора (режим «ON-LINE»). На исследование физических основ и технической реализации технологии, отвечающей указанным требованиям, направлены представленные исследования.

#### Постановка задачи исследования

Задача исследования – экспериментально изучить принципиальную возможность контролировать состояние обмотки и обнаруживать дефект, используя включение трансформатора в сеть, при этом коммутационный импульс, поступающий на обмотку в результате штатной коммутации, является зондирующим импульсом. Эксперименты проводились на реальном трехфазном трансформаторе, у которого две фазы исправны и не содержат никаких дефектов, а на одной фазе создано дефектное состояние. По откликам на воздействие коммутационного импульса необходимо выяснить, определяется ли наличие дефекта по отклику, и исследовать эффективность указанного подхода при подаче коммутационного импульса на различные обмотки трансформатора, наиболее оптимальное место регистрации сигнала отклика, при наличии и в отсутствии нагрузки различного характера.

На обмотках низкого напряжения (НН) и высокого напряжения (ВН) фазы А трансформатора НТМИ-6-66 было создано дефектное состояние, как показано на рис. 1.

Для подачи коммутационного импульса сети на исследуемую обмотку в определенный момент времени по фазе напряжения реализована схема подключения трансформатора и регистрация отклика при коммутации. Схема приведена на рис. 2.

Элементы схемы функционируют следующим образом. При поступлении напряжения от сети ~220 В,

50 Гц на ЛАТР возникает напряжение на вторичной обмотке трансформатора ОСМ, VD выпрямляет ток от трансформатора, конденсатор С заряжается. По мере заряда напряжение на конденсаторе увеличивается. При достижении значения напряжения, соответствующего открытию динистора, динистор открывается, и ток, проходящий через динистор VS<sub>1</sub>, открывает тиристор VS<sub>2</sub>. Коммутационный импульс напряжения, используемый как зондирующий, подается на испытуемый объект – обмотку трансформатора. Изменение задержки подачи импульса осуществляется с помощью изменения сопротивления резисторов и емкости С. Регистрация зондирующего импульса и отклика обмоток производится при помощи цифрового двухканального осциллографа Tektronix TDS 2012.



Рис. 1. Дефект обмотки ВН – аксиальное смещение обмотки

Fig. 1. Fail of high voltage winding (HV) – winding axial shift

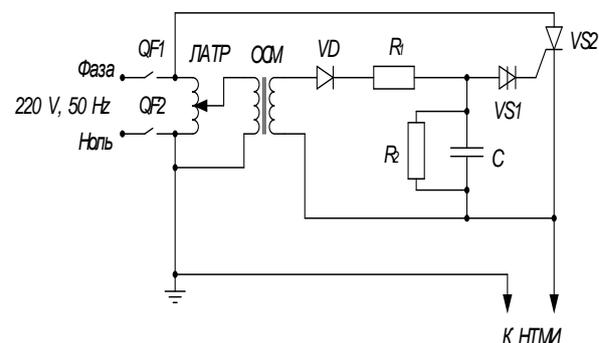


Рис. 2. Принципиальная схема блока коммутации: QF – автоматические выключатели; ЛАТР – лабораторный автотрансформатор; ОСМ – понижающий трансформатор питания блока управления тиристором ОСМ1-0,1; VD – выпрямительный диод 1N4007; R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> – резисторы, позволяющие ограничивать ток заряда конденсатора; C – конденсатор; VS<sub>1</sub> – динистор КН102А; VS<sub>2</sub> – тиристор КУ202Н; НТМИ – исследуемый объект

Fig. 2. Principal scheme of commutation block: QF – automatic switches; ЛАТР – laboratory autotransformer; ОСМ – set down transformer of thyristor control block ОСМ1-0,1; VD – diode 1N4007; R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> – resistors for capacitor current restriction; C – condenser; VS<sub>1</sub> – dynistor КН102А; VS<sub>2</sub> – thyristor КУ202Н; НТМИ – researched object

#### Экспериментальная часть

1. Коммутационная операция «включение» от сети ~220 В на стороне НН. Отклик регистрируется на стороне ВН одноименной фазы с помощью ем-

костного делителя напряжения. Контроль обмоток по схеме «НН–ВН». Осциллограммы результатов диагностики приведены ниже. Отклики неповрежденных пар в-В и с-С существенно отличаются от ситуации для пары а-А. Наблюдение сигналов

отклика проводилось на развертке 5 мкс на деление для наблюдения начальной стадии переходного процесса (рис. 3), на развертке 25 мкс на деление для наблюдения всего переходного процесса в обмотке (рис 4).

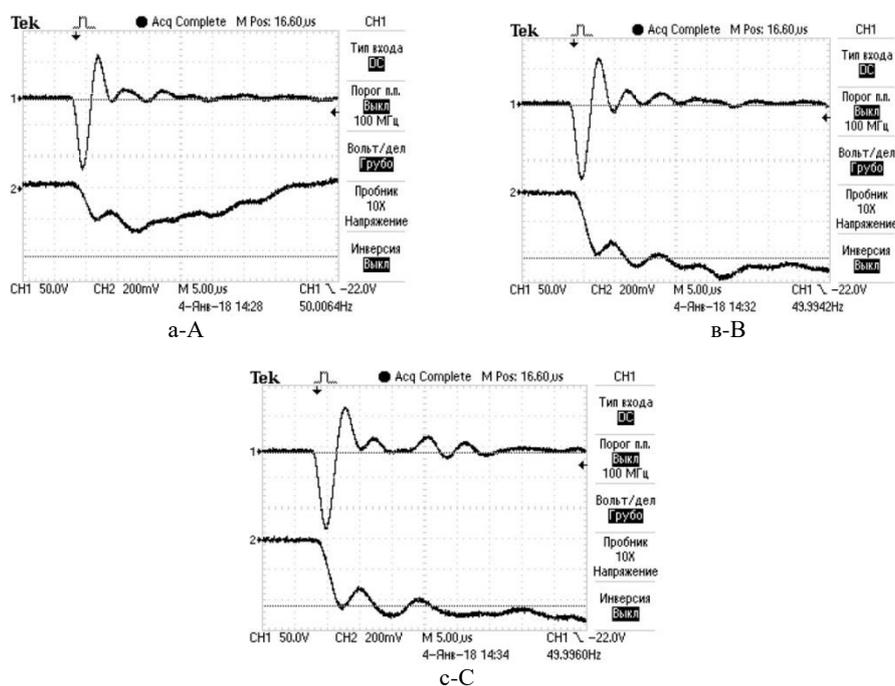


Рис. 3. Осциллограммы коммутационного импульса (луч 1) и сигналов отклика (луч 2) для различных фаз. Развертка осциллографа – 5 мкс/деление

Fig. 3. Waveforms of commutation pulse (beam 1) and response (beam 2) for different phases. Oscilloscope sweep – 5 microsecond per scale division

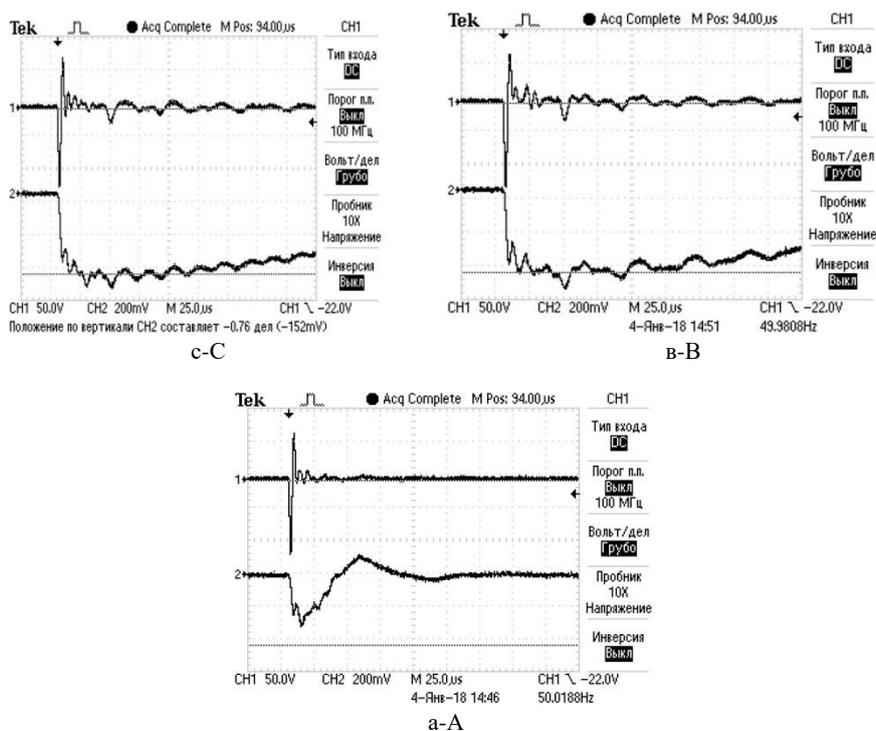


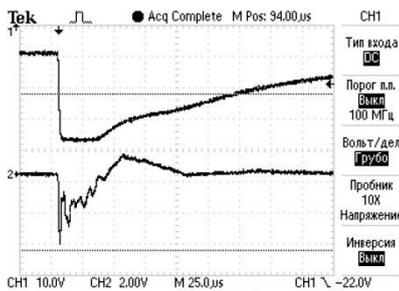
Рис. 4. Осциллограммы коммутационного импульса (луч 1) и сигналов отклика (луч 2) для различных фаз. Развертка осциллографа – 25 мкс/деление

Fig. 4. Waveforms of commutation pulse (beam 1) and response (beam 2) for different phases. Oscilloscope sweep – 25 microsecond per scale division

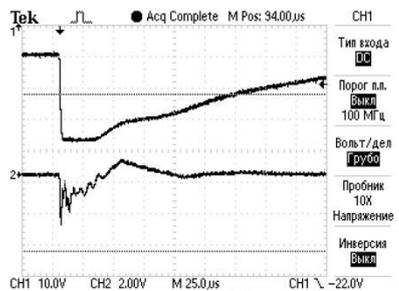
Визуальный анализ полученных осциллограмм без применения специальных программ сравнения позволяет констатировать факт отличия откликов на поврежденной фазе при идентичности откликов двух неповрежденных фаз и равенстве импульса коммутации при включении.

2. Контроль состояния обмотки с подключенной нагрузкой на стороне НН. Нагрузку моделирует реостат. Максимальное сопротивление реостата

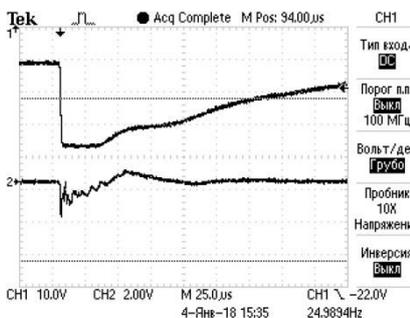
40 Ом. Наблюдение осциллограммы отклика по схеме «ВН–НН» (Коммутационная операция «включение» от сети ~220 В на стороне ВН). Наблюдаемые осциллограммы приведены на рис. 5 для различных значений резистивных нагрузок вторичной обмотки трансформатора. На рис. 6 приведены аналогичные осциллограммы откликов при различных значениях емкостных нагрузок вторичной обмотки трансформатора.



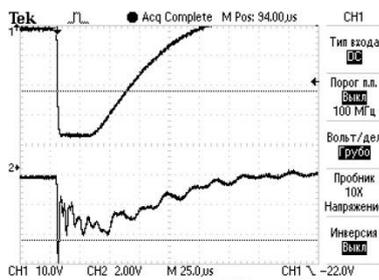
A-а; XX



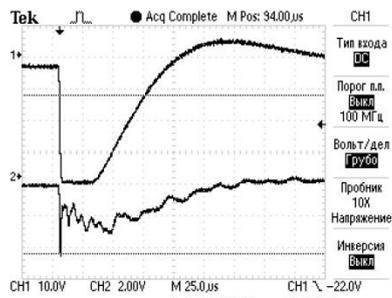
A-а; нагрузка 100 %



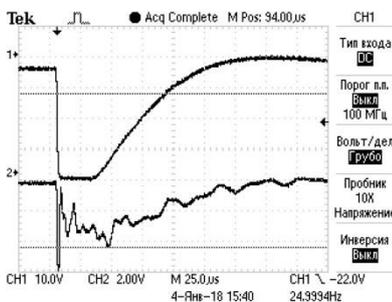
A-а; нагрузка 50 %



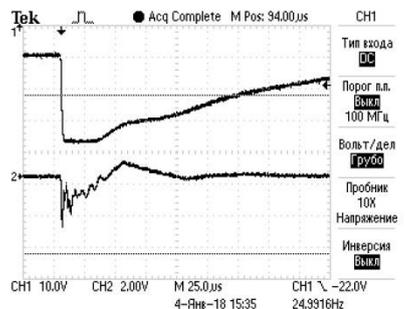
B-в; нагрузка 100 %



B-в; нагрузка 50 %



C-с; нагрузка 100 %



A-а; нагрузка 50 %

Рис. 5. Осциллограммы коммутационного импульса (луч 1) и сигналов отклика (луч 2) для различных фаз и различных значений резистивной нагрузки низковольтной обмотки трансформатора. Развертка осциллографа – 25 мкс/деление

Fig. 5. Waveforms of commutation pulse (beam 1) and response (beam 2) for different phases and different resistive loads of low voltage winding. Oscilloscope sweep – 25 microsecond per scale division

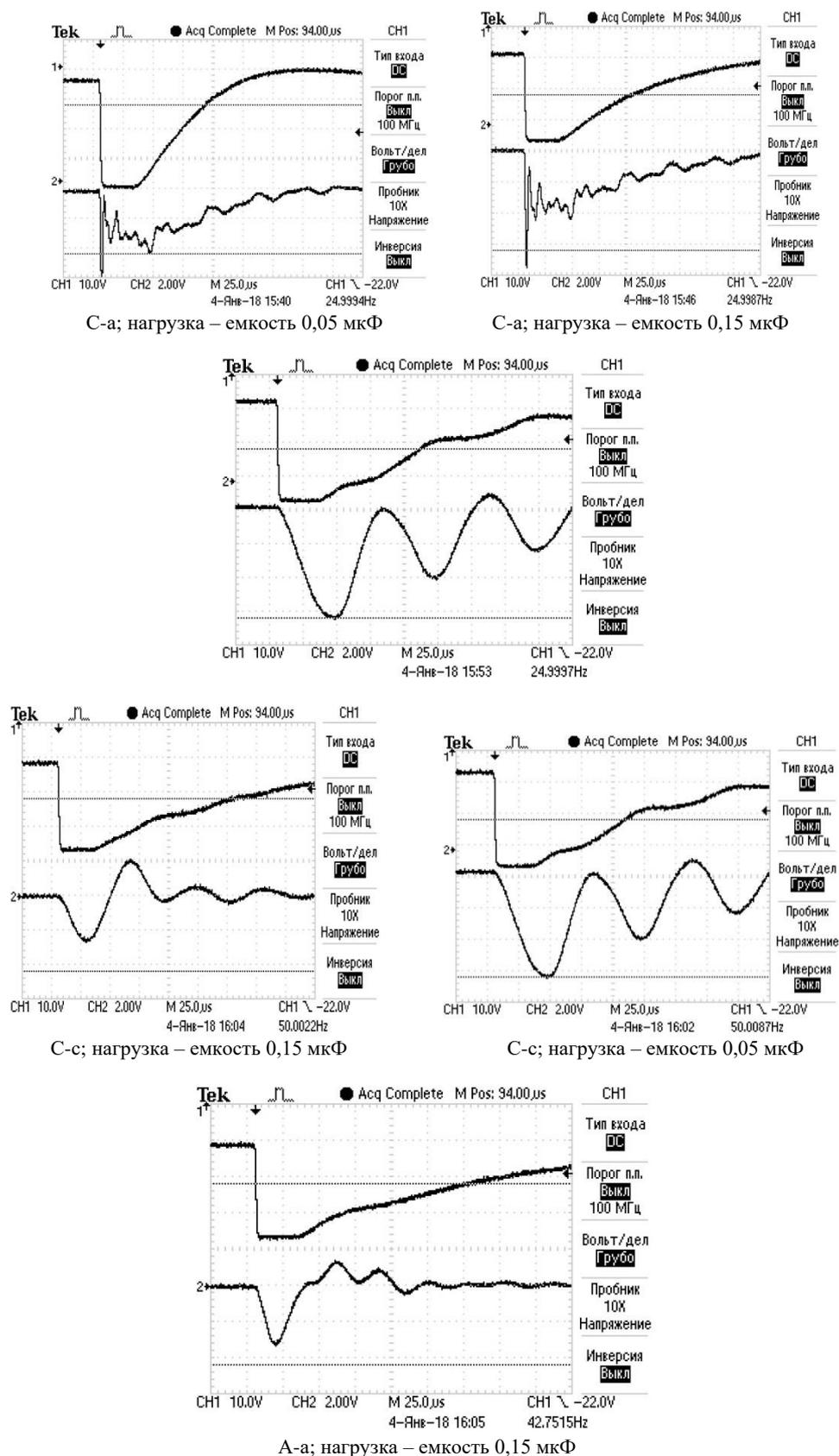


Рис. 6. Осциллограммы коммутационного импульса (луч 1) и сигналов отклика (луч 2) для различных фаз и различных значений емкостной нагрузки вторичной обмотки трансформатора. Развертка осциллографа – 25 мкс/деление

Fig. 6. Waveforms of commutation pulse (beam 1) and response (beam 2) for different phases and different capacitive loads of low voltage winding. Oscilloscope sweep – 25 microsecond per scale division

### Обсуждение результатов

Основной задачей экспериментов, описанных выше, являлась демонстрация принципиальной возможности контролировать развитие дефектного состояния обмотки. В качестве критерия определения дефектного состояния принимается различие в форме сигналов отклика при сравнении откликов с фаз А и В, А и С при идентичности откликов для фаз В и С, при идентичном коммутационном импульсе, выполняющем роль зондирующего. На всех представленных осциллограммах зондирующий импульс – луч 1. Аксиальное смещение витков было организовано на фазе А.

Отклики неповрежденных пар, соответствующие лучу 2, – в-В и с-С – существенно отличаются от ситуации для пары а-А для случаев отсутствия или наличия нагрузки. Причем как для емкостной, так и для резистивной нагрузок ситуация повторяется. Наблюдения сигналов отклика проводилось на развертке 5 мкс на деление для наблюдения начальной стадии переходного процесса (рис. 3), на развертке 25 мкс на деление для наблюдения всего переходного процесса в обмотке (рис. 4–6).

Для определения потенциальной эффективности предложенного метода контроля состояния обмоток использовался визуальный контроль осциллограмм. Для более детальной оценки полученных осциллограмм могут быть применены современные программные средства, предполагающие разложение в ряд Фурье и спектральный анализ. Однако именно факт четкого различия в откликах здоровых и повре-

жденной обмоток без использования дополнительных математических средств, программных инструментов и специального зондирующего генератора является подтверждением эффективности предложенного метода контроля состояния.

### Заключение

Проблема контроля состояния активных частей трансформаторов существует с момента создания высоковольтных электроэнергетических систем. Развитие дефектов обмоток происходит неконтролируемо и в результате заканчивается выходом трансформатора из строя. К настоящему моменту создан широкий спектр методов и средств контроля состояния обмоток, однако все они требуют снятия напряжения и расшиновки трансформатора. Создание технологии контроля состояния обмоток под рабочим напряжением позволит вывести диагностику трансформаторов на новый технологический уровень. Одним из путей решения проблемы контроля состояния без снятия напряжения является использование коммутационных импульсов сети в качестве зондирующих. Показано, что достоверный контроль состояния обмотки возможен при дефекте аксиальное смещение витков обмотки.

Технология контроля состояния обмоток на основе коммутационных импульсов, в качестве зондирующих, является информативной и потенциально превосходит все существующие методы и средства диагностики обмоток.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколов В.В. Ранжирование состаренного парка силовых трансформаторов по техническому состоянию // Современное состояние и проблемы диагностики силового электрооборудования: Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции. – Новосибирск, 26–28 сентября, 2006. – С. 7–18.
2. Pettersson L., Fantana N.L., Sunderman U. Assessment ranking of power transformers using condition based evaluation, a new approach // CIGRE Paris Conference. – Paris, France, 1998. – Paper 12–204.
3. Осотов В.Н. О методологии оценки состояния электрооборудования с большим сроком службы // Современное состояние и проблемы диагностики силового электрооборудования: Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции. – Новосибирск, 26–28 сентября, 2006. – С. 25–29.
4. Вдовико В.П. Диагностика высоковольтного электрооборудования и эффективность ее применения // Современное состояние и проблемы диагностики силового электрооборудования: Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции. – Новосибирск, 26–28 сентября, 2006. – С. 34–41.
5. Лех В., Тымински Л. Новый метод индикации повреждений при испытании трансформаторов на динамическую прочность // Электричество. – 1966. – Т. 1. – № 1. – С. 77–81.
6. Аветиков Г.В., Левицкая Е.И., Попов Е.А. Импульсное дефектографирование трансформаторов на при испытаниях на электродинамическую стойкость // Электротехника. – 1978. – № 4. – С. 53–57.
7. Конов Ю.С., Короленко В.В., Федорова В.П. Обнаружение повреждений трансформаторов при коротких замыканиях // Электрические станции. – 1980. – № 7. – С. 46–48.
8. Количественная оценка результатов импульсного дефектографирования обмоток силовых трансформаторов / С.В. Аликин, А.А. Дробышевский, Е.И. Левицкая, М.А. Филатова // Электротехника – 1990. – № 5. – С. 75–76.
9. Диагностика обмоток силовых трансформаторов методом низковольтных импульсов / С.В. Аликин, А.А. Дробышевский, Е.И. Левицкая, М.А. Филатова // Электротехника. – 1991. – № 12. – С. 30–35.
10. Хренников А.Ю., Киков О.М. Диагностика силовых трансформаторов в Самараэнерго методом низковольтных импульсов // Электрические станции. – 2003. – № 11. – С. 49–51.
11. Хренников А.Ю. Опыт обнаружения остаточных деформаций обмоток силовых трансформаторов // Энергетик. – 2003. – № 7. – С. 18–20.
12. Diagnosis of interturn faults of single-distribution transformers under controlled conditions during energization / D. Guillen, J. Olivares-Galvan, R. Escarela-Perez, D. Granados-Lieberman, E. Barocio // Measurement. – 2019. – V. 141. – P. 24–36.
13. High frequency electric circuit modeling for transformer frequency response analysis studies / X. Zhao, C. Yao, A. Abu-Siadab, R. Liaoa // Electrical Power and Energy Systems. – 2019. – V. 111. – P. 351–368.
14. Diagnostic of transformer winding deformation fault types using continuous wavelet transform of pulse response / Q. Cheng, Z. Zhao, C. Tang, G. Qian, S. Islam // Measurement. – 2019. – V. 140. – P. 197–206.
15. Velasquez R., Lara J., Melgar A. Converting data into knowledge for preventing failures in power transformers // Engineering Failure Analysis. – 2019. – V. 101. – P. 215–229.
16. Zarkovi M., Stojkovi Z. Analysis of artificial intelligence expert systems for powertransformer condition monitoring and diagnostics // Electric Power Systems Research. – 2017. – V. 149. – P. 125–136.
17. Senobari R., Sadeh J., Borsi H. Frequency response analysis (FRA) of transformers as a tool for fault detection and location: a review // Electric Power Systems Research. – 2019. – V. 155. – P. 172–183.
18. Lavrinovich V.A., Lavrinovich A.V., Mytnikov A.V. Development of advanced control state technology of transformer and electric motor windings based on pulsed method // International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering. – 2012. – V. 4. – № 4. – P. 149–153.
19. Lavrinovich V.A., Isaev Y.N., Mytnikov A.V. Modeling of state control procedure of power transformer winding by short probe pulses // International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering. – 2014. – V. 6. – № 1. – P. 145–147.

20. Lavrinovich V.A., Mytnikov A.V. Development of pulsed method for diagnostics of transformer windings based on short probe impulse // IEEE Translation on Dielectric Electrical Insulation. – 2015. – V. 22. – № 4. – P. 2041–2045.
21. Lavrinovich V.A., Mytnikov A.V., Hongda Li. Advanced technology of transformer winding condition control based on nanosecond probing impulse // Resource-Efficient Technologies. – 2016. – V. 2. – № 3. – P. 111–117.

Поступила 14.11.2019 г.

#### Информация об авторах

**Лавринович В.А.**, доктор технических наук, профессор, главный конструктор по электротехническому оборудованию, Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский Научно-Исследовательский Институт Технической Физики – Всероссийский Электротехнический Институт.

**Лавринович А.В.**, инженер 1 категории, отдел по высоковольтному оборудованию, Томский научно-исследовательский и проектный институт нефти и газ.

**Мытников А.В.**, кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.314.21-027.3.04

## EXPERIMENTAL RESEARCH OF CONTROLLING HIGH VOLTAGE TRANSFORMER WINDING CONDITION BASED ON SWITCHING IMPULSES

Valeriy A. Lavrinovich<sup>1</sup>,  
lavrhome@mail.ru

Alexey V. Lavrinovich<sup>2</sup>,  
lavrinovich86@yandex.ru

Alexey V. Mytnikov<sup>3</sup>,  
mytnikov66@mail.ru

<sup>1</sup> Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Research Institute of technical Physics,  
12, Krasnokazarmennaya street, Moscow, 111250, Russia.

<sup>2</sup> Tomsk research and design institute of oil and gas,  
72, Mira avenue, Tomsk, 634027, Russia.

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

**The importance** of the research is driven by the exceptional importance of stable work of electrical equipment complex which is used at production, transportation and processing of geo-resources. Effectiveness and reliability of such geological production strongly depend on high voltage transformer condition. Failure of such a transformer can cause serious breakage of the whole electrical energy system and even breakdown. This, in its turn, leads to serious ecological and material losses. Fail of active transformer part, especially winding, is one of the reasons of accident due to the influence of over-voltage waves and short circuit electro-dynamic forces on the winding. To prevent emergence situations with high voltage transformers and production stop losses an effective technology of winding condition control is necessary. Standard methods are ineffective for detecting winding fails at early stages of development. Among the new ones and those recommended by the international expert institutes of IEC and CIGRE are modifications of the pulse method, primarily the frequency analysis method. But, despite the recognition as the most reliable and promising, this method does not always allow revealing fails of the windings, especially in the early stages of development. Moreover, a prerequisite for the use of frequency analysis method technology requires the complete removal of voltage, the transformer spacing and the use of special monitoring equipment. At the same time, to obtain reliable diagnostic results, it is necessary to have special reference signals – normograms, which are absent practically for the whole range of power transformers. These factors reduce the common effectiveness of frequency analysis method technology. That is why, at present, the issue of research and development of technology for monitoring the state of windings under operating voltage is fully relevant.

**The main aim** of the study is an experimental research of the principal possibility of monitoring the transformer winding condition on the basis of switching processes in the high voltage grid.

**Objects** of the research are the windings of real transformer in two conditions – with and without fault.

**Methods:** the simulation method on a real physical object. In the transformer NTMI-6 a fail of the mechanical winding shift was developed on one phase. The other two phases are in normal condition. With the help of a special circuit, the transformer was connected to the network. Using a Tektronix TDS-2012 electronic oscilloscope, the voltage on the primary winding and the response signal from the same-name secondary winding were measured. The measurements were repeated for the other two phases in the same way.

**Results.** On a real transformer of the NTMI-6 type, the principal possibility of controlling high voltage transformer winding condition by means of switching impulses was experimentally researched. It is established that monitoring of mechanical state of windings using the switching impulses could be effectively realized. It is shown that when the transformer is turned on in the network, the operating voltage can serve as a diagnostic impulse suitable for probing the mechanical condition of the transformer windings using the low-voltage impulse method.

### Key words:

Condition control, pulsed method, probing impulse, winding fail, diagnostics efficiency.

### REFERENCES

1. Sokolov V.V. Ranzhirovanie sostarennoogo parka silovyykh transformatorov po tekhnicheskomu sostoyaniyu [Ranking of the aged power transformer park due to technical condition]. *Sovremennoe sostoyanie i problem diagnostiki silovogo elektrooborudovaniya. Materialy IV Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Modern condition and problems of power electrical equipment diagnostics. Proc. of IV All-Russian scientific conference]. Novosibirsk, Russia, 2006. pp. 7–18.
2. Pettersson L., Fantana N.L., Sunderman U. Assessment ranking of power transformers using condition based evaluation, a new approach. *CIGRE Paris Conference*. Paris, France, 1998. Paper 12-204.
3. Osotov V.N. O metodologii otsenki sostoyaniya elektrooborudovaniya s bolshim srokom sluzhby [On methodology of electrical equipment estimation with large term in service]. *Sovremennoe sostoyanie i problem diagnostiki silovogo elektrooborudovaniya. Materialy IV Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Modern condition and problems of power electrical equipment diagnostics. Proc. of IV All-Russian scientific conference]. Novosibirsk, Russia, 2006. pp. 25–29.
4. Vdoviko V.P. Diagnostika vysokovoltного elektrooborudovaniya i effektivnost ee primeneniya [Diagnostics of high voltage equipment and effectiveness of its application]. *Sovremennoe sostoyanie i problemy diagnostiki silovogo elektrooborudovaniya. Materialy IV Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Modern condition and problems of power electrical equipment diagnostics. Proc. of IV All-Russian scientific conference]. Novosibirsk, Russia, 2006. pp. 34–41.

5. Lekh V., Tyminskiy L. New method of fail diagnostics at the dynamic reliability transformer test. *Electricity*, 1966, vol. 1, no. 1, pp. 77–81. In Rus.
6. Avetikov G.V., Levitskaya E.I., Popov E.A. Impulsed defectography of transformers at the electrodynamic reliability test. *Electrotechnic*, 1978, no. 4, pp. 53–57. In Rus.
7. Konov Yu.S., Korolenko V.V., Fedorova V.P. Obnaruzhenie povrezhdenii transformatorov pri korotkikh zamykaniyakh [Fail detection of transformers due to short circuit]. *Elektricheskie Stantsii*, 1980, no. 7, pp. 46–48.
8. Alikin S.V., Drobyshevskiy A.A., Levitschaya E.I., Filatova M.A. Kolichesvonnaya oshchotka rezultatov impulsnogo defektografirovaniya obmotok silovykh transformatorov [Quantitative assessment of the pulse defectography results of power transformer windings]. *Elektrotehnika*, 1990, no.5, pp. 75–76. In Rus.
9. Alikin S.V., Drobyshevskiy A.A., Levitskaya E.I., Filatova M.A. Power transformer winding diagnostics by low-voltage pulsed method. *Electrotechnic*, 1991, no. 12, pp. 30–35. In Rus.
10. Khrennikov A.Yu., Kikov O.M. Diagnostika silovykh transformatorov v Samaroenergo metodom nizkovolnykh impulsiv [Power transformer diagnostics by low-voltage pulsed method in Samaropenergo]. *Elektricheskie Stantsii*, 2003, no. 11, pp. 49–51.
11. Khrennikov A.Yu. Opyt obnaruzheniya ostatochnykh deformatsy obmotok silovykh transformatorov [Experience of mechanical deformation detection of power transformer windings]. *Energetic*, 2003, no. 7, pp. 18–20.
12. Guillen D., Olivares-Galvan J., Escarela-Perez R., Granados-Lieberman D., Barocio E. Diagnosis of interturn faults of single-distribution transformers under controlled conditions during energization. *Measurement*, 2019, vol. 141, pp. 24–36.
13. Zhao X., Yao C., Abu-Siadab A., Liao R. High frequency electric circuit modeling for transformer frequency response analysis studies. *Electrical Power and Energy Systems*, 2019, vol. 111, pp. 351–368.
14. Cheng Q., Zhao Z., Tang C., Qian G., Islam S. Diagnostic of transformer winding deformation fault types using continuous wavelet transform of pulse response. *Measurement*, 2019, vol. 140, pp. 197–206.
15. Velasquez R., Lara J., Melgar A. Converting data into knowledge for preventing failures in power transformers. *Engineering Failure Analysis*, 2019, vol. 101, pp. 215–229.
16. Zarkovi M., Stojkovi Z. Analysis of artificial intelligence expert systems for powertransformer condition monitoring and diagnostics. *Electric Power Systems Research*, 2017, vol. 149, pp. 125–136.
17. Senobari R., Sadeh J., Borsi H. Frequency response analysis (FRA) of transformers as a tool for fault detection and location: a review. *Electric Power Systems Research*, 2019, vol. 155, pp. 172–183.
18. Lavrinovich V.A., Lavrinovich A.V., Mytnikov A.V. Development of advanced control state technology of transformer and electric motor windings based on pulsed method. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering*, 2012, vol. 4, no. 4, pp. 149–153.
19. Lavrinovich V.A., Isaev Y.N., Mytnikov A.V. Modeling of state control procedure of power transformer winding by short probe pulses. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering*, 2014, vol. 6, no. 1, pp. 145–147.
20. Lavrinovich V.A., Mytnikov A.V. Development of pulsed method for diagnostics of transformer windings based on short probe impulse. *IEEE Translation on Dielectric Electrical Insulation*, 2015, vol. 22, no. 4, pp. 2041–2045.
21. Lavrinovich V.A., Mytnikov A.V., Hongda Li. Advanced technology of transformer winding condition control based on nanosecond probing impulse. *Resource-Efficient Technologies*, 2016, vol. 2, no. 3, pp. 111–117.

*Received: 14 November 2019.*

#### Information about the authors

**Valeriy A. Lavrinovich**, Dr. Sc., professor, Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Research Institute of technical Physics.

**Alexey V. Lavrinovich**, engineer of first category, Tomsk research and design institute of oil and gas.

**Alexey V. Mytnikov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 539.3

## ДИНАМИКА ГЕОМЕТРИЧЕСКИ И ФИЗИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНОГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА НАНОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ДАТЧИКА В ВИДЕ НЕОДНОРОДНОЙ НАНОБАЛКИ, НАХОДЯЩЕЙСЯ В ТЕМПЕРАТУРНОМ И ШУМОВОМ ПОЛЯХ

Крысько Вадим Анатольевич<sup>1</sup>,  
tak@san.ru

Захарова Алёна Александровна<sup>3,2</sup>,  
zaa@tu-bryansk.ru

Папкина Ирина Владиславовна<sup>1,2</sup>,  
ikravzova@mail.ru

Жигалов Максим Викторович<sup>1</sup>,  
zhigalovm@yandex.ru

Яковлева Татьяна Владимировна<sup>1,2</sup>,  
yan-tan1987@mail.ru

Крысько Антон Вадимович<sup>1,2</sup>,  
anton.krysko@gmail.com

<sup>1</sup> Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина, Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.

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

<sup>3</sup> Брянский государственный технический университет, Россия, 241035, Россия, г. Брянск, бул. 50 лет Октября, 7.

**Актуальность исследования.** Наноэлектромеханические системы, будучи высокочувствительными датчиками, имеющими малые размеры, и надежными в эксплуатации, находят все более широкое применение в нефтегазовой промышленности для мониторинга различных процессов в нефтедобыче – от разведки до повышения нефтеотдачи, а также при бурении скважин, очистке, фракционировании и переработке до вывода их из эксплуатации. Одним из примеров применения наноэлектромеханических систем является сейсмическое исследование месторождений. Применение наноэлектромеханических систем позволяет улучшить производительность в дополнение к существенной экономии средств и времени для широкого спектра технологий нефтегазовой промышленности. Благодаря возможности непрерывного контроля эти технологии могут стать основой «умных» месторождений.

**Цель:** построение математической модели, наиболее полно описывающей нелинейную динамику чувствительного элемента наноэлектромеханического датчика под действием знакопеременной нагрузки. Для этого необходимо учесть наиболее распространённые в настоящее время кинематические гипотезы, масштабные эффекты с помощью моментной теории упругости, нелинейную зависимость между напряжениями и деформациями, неоднородность материала, шумовые и тепловые поля. А также исследовать характер сложных нелинейных колебаний и выявить закономерности перехода их от гармонических к хаотическим.

**Объекты:** геометрически и физически нелинейная нанобалка, описываемая кинематической моделью первого приближения, на которую воздействует равномерно распределённая поперечная нагрузка с гармонической составляющей, температурное поле и аддитивный внешний шум.

**Методы:** вариационные методы, метод конечных разностей второго порядка точности для сведения системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных к задаче Коши, метод Ньюмарка для решения задачи Коши, метод переменных параметров упругости Биргера для решения физически нелинейной задачи, метод вариационных итераций для получения аналитического решения двумерного уравнения теплопроводности.

**Результаты.** Для получения аналитического решения теплопроводности применяется метод вариационных итераций. Построена математическая модель колебаний чувствительного элемента наноэлектромеханического датчика в виде размерно-зависимой балки, на которую действует равномерно распределённая поперечная нагрузка с гармонической составляющей. Помимо переменной нагрузки учитывалось влияние температурного поля и аддитивного внешнего шумового воздействия. Геометрическая нелинейность принята по теории Теодора фон Кармана (связь между деформациями и перемещениями). Для учета физической нелинейности материала балки применяются деформационная теория пластичности и метод переменных параметров упругости. Уравнения движения элемента механической системы, а также соответствующие граничные и начальные условия выведены исходя из принципа Остроградского–Гамильтона на базе модифицированной моментной теории с учетом гипотезы Эйлера–Бернулли. Выявлено, что температурное и шумовое поля уменьшают нагрузку, при которой происходит переход в хаотическое состояние системы. Переход от гармонических колебаний к хаотическим происходит по сценарию Рюэля–Такенса–Ньюхауза.

### Ключевые слова:

Нанобалка Эйлера-Бернулли, наноэлектромеханическая система, акселерометр для измерения параметров буровых скважин, температурное и шумовое поля, модифицированная моментная теория упругости, метод конечных разностей и Ньюмарка, хаотические колебания наноэлектромеханической системы.

### Введение

Наноэлектромеханические (НЭМС)-устройства обладают уникальными свойствами, которые определяют их актуальность для практического применения.

Среди свойств можно выделить такие, как низкая масса, высокая электрическая прочность, высокие частоты механического резонанса, потенциально большие квантовые механические эффекты, большое отношение поверхности к объёму, что важно для чув-

ствительных элементов некоторых типов датчиков, например датчиков давления. Наносенсоры (кантиверы, нановесы, резонаторы и др.) и наноактуаторы (наномоторы, шестеренки и т. д.) используются в физике, биологии, химии, медицине (диагностика, клеточная нано- и микрохирургия, доставка лекарств в пораженное место организма), электронной и нефтегазовой промышленности.

Условия эксплуатации НЭМС датчиков в большей степени совпадают с аналогичными для микроэлектромеханических датчиков (МЭМС). Это температурные воздействия в широком диапазоне от  $-40$  до  $150$  °С, электростатические поля [1], наличие вибрационных [2, 3] и шумовых воздействий [4]. Но в связи со сверхмалыми размерами НЭМС датчиков эти возмущающие факторы будут оказывать на НЭМС устройства более значительное воздействие, чем на МЭМС [5–7].

Наноэлектромеханические системы находят широкое применение в экономически выгодных отраслях нефтегазовой промышленности, таких как нефтедобыча и нефтепереработка. Технологическое оборудование современного нефтеперерабатывающего производства представляет собой комплекс аппаратов, машин и вспомогательных устройств, составными частями которых являются балки, подвергающиеся различным динамическим нагрузкам. Так, например, балки и стержни являются составными элементами в колоннах насоснокомпрессорных труб и бурильных колонн, используемых при скважинной нефтедобыче [8–10]. «Сердцем» нано- и микроэлектромеханических датчиков является чувствительный элемент (ЧЭ), от качества которого зависит точность самого датчика. Такие характеристики датчиков, как прочность, точность, стойкость к высокой температуре (постоянная рабочая температура во время работы в скважине достигает  $150$  °С, при этом возможны скачки и до более высоких температур) и внешним воздействиям (при бурении возникают случайные динамические воздействия, называемые в механике шумовыми), чрезвычайно важны при создании приборов геофизического назначения, оборудования для нефтегазового и топливно-энергетического комплекса. Следует отметить, что изменения температурного поля негативно влияют на точность измерений, а постоянные внешние случайные (шумовые) вибрации приводят к разрушению измерительных ячеек в приборах, и это может привести к возникновению резонансных колебаний, а впоследствии – к ложным показаниям или даже разрушению прибора.

В настоящее время НЭМС датчики приходят на смену МЭМС устройствам, условия эксплуатации этих приборов во многом сходны, поэтому при их разработке необходимо учитывать тепловые и вибрационные воздействия на составные компоненты [11–14]. Также при исследовании динамики компонентов НЭМС, в отличие от МЭМС, необходимо учитывать неоднородность (гетерогенность) материала и, следовательно, зависимость его физических свойств от деформации, температуры, пространственных координат и времени.

Таким образом, создание методики расчета и проектирования механических компонентов НЭМС является актуальной задачей.

Составляющими механическими элементами НЭМС являются балки, пластины и оболочки, находящиеся под действием случайных – шумовых – воздействий и температурных полей. При построении математических моделей этих механических структур, в частности балочных, необходимо учитывать влияние их размеров на характер колебаний. Зависимость упругого поведения от размеров тела в микронном масштабе экспериментально наблюдалась в разных веществах (металлах [15] и сплавах [16], полимерах [17], кристаллах [18], биомембранах [19]). Экспериментальные наблюдения являются одним из методов моделирования и изучения наноразмерных структур, но из-за дорогостоящего характера этого метода используются другие методы, такие как методы молекулярной динамики, и подходы, основанные на механике сплошных сред, которые обходятся дешевле, с точки зрения вычислений, чем методы молекулярной динамики.

В начале 1900-х гг. братья Коссера [20] предложили теорию для изучения поведения наноматериалов. Их теория явилась началом неклассических теорий для изучения механического поведения наноструктур. Некоторые другие неклассические теории для изучения поведения наноструктур – это моментная теория, теория градиента деформации, теория поверхностных напряжений, нелокальная теория. В моментной теории в энергии деформации рассматривается только вектор градиента вращения, и поэтому требуются только два параметра шкалы длины материала. Модифицированная моментная теория была предложена Ф. Янгом и др. [21] на основе моментной теории. При учете условия равновесия моментов для обеспечения симметричности тензора парных напряжений (моментов) количество параметров шкалы длины материала модифицированной моментной теории уменьшается с двух до одного.

Одним из важнейших аспектов использования моментной теории упругости является ее приложение для задач статики и динамики балок. Для построения математических моделей балок используются гипотезы Бернулли–Эйлера, Тимошенко, Шереметьева–Пелеха [22] и др. Каждую из гипотез, лежащих в основе математической модели, можно рассматривать с точки зрения приближения балки от одномерного к двумерному и трехмерному телу. Наиболее популярным приближением является математическая модель на основе гипотез Бернулли–Эйлера. В работах [23, 24] с помощью модифицированной моментной теории упругости получены определяющие линейные уравнения, начальные и граничные условия размерно-зависимой модели Эйлера–Бернулли. Исследовано влияние размерного параметра на статическое деформирование и величину собственных частот. Для статической задачи рассматривается линейное уравнение 4-го порядка для прогиба. Используется метод Бубнова–Галеркина в первом приближении, сводящий уравнение в частных производных к обыкновен-

ному дифференциальному уравнению по времени. В работе [25] получены уравнения для геометрически нелинейной задачи балки Эйлера–Бернулли на основе соотношений Теодора фон Кармана. Для получения численного решения использован метод Бубнова–Галеркина в первом приближении. Было проведено исследование влияния размерного коэффициента на величину собственной частоты нелинейных колебаний.

В достаточно малых масштабах физическое поведение материалов становится зависимым от размера, что может влиять на механические, термические, электрические и магнитные характеристики конструкций и механических компонентов [26, 27]. Следовательно, прогресс в области микромеханики и наномеханики и связанных с ними технологий должен идти рука об руку с разработкой усовершенствованных моделей, зависящих от размера, для физических явлений, таких как термо- и электромеханика. В зависящей от размера термоупругости [28] температура может создавать дополнительную термическую деформацию искривления (кручения) в дополнение к обычной деформации термической деформации. S.L. Sobolev [29] и D.Y. Tzou [30] также предположили, что теплопроводность в микро/нано масштабе по существу нелокальна и классический закон теплопроводности должен быть дополнительно усовершенствован путем введения характеристической длины материала.

Несмотря на большое количество предложенных новых моделей теплопроводности, теория Фурье также активно продолжает использоваться. Например, в работе [31] представлены основные переходные уравнения и (безразмерные) скорости волн для изотропных и ортотропных тел, а также для ортотропного твердого тела распространение происходит в главной плоскости. В термоупругих случаях рассматриваются закон Фурье и тепловая релаксация.

Исследованию фазовых переходов, индуцируемых шумом, в науке и технике уделяется большое внимание. Обобщение этих результатов приведено в монографии [32], где рассмотрено влияние шума в задачах физики, химии и биологии. В задачах радиофизики этому вопросу посвящены работа авторов [33] и ряд других. Исследования влияния шумовых нагрузок на динамику балок пластин и оболочек представлены в работах [34–36].

Проведенный авторами анализ показывает, что в известной литературе не описаны модели и исследования размерно-зависимого термоупругого поведения нанобалок, находящихся под воздействием шумовых полей, а также с учетом неоднородности материала при решении задач с двумя типами нелинейности (геометрической и физической). Поэтому важной проблемой до настоящего времени остается построение математических моделей наномеханических систем с учетом действия полей температуры и внешних случайных воздействий. Этому направлению посвящена настоящая работа.

### Постановка задачи

Рассмотрим двумерную область  $\Omega$  пространства  $R^2$  с декартовой системой координат, введенной следующим образом: в теле балки фиксируется линия приведения, называемая срединной линией  $z = 0$ , ось  $Ox$  направлена слева направо вдоль срединной линии, ось  $Oz$  – вниз, перпендикулярно  $Ox$ . В декартовой системе координат балка как двумерная область  $\Omega$  определяется следующим образом:

$$\Omega = \left\{ x \in [0, a]; y \in [0, b]; -\frac{h}{2} \leq z \leq \frac{h}{2} \right\}, 0 \leq t \leq \infty.$$

Предполагается, что материал нелинейно-упругий и изотропный. Область находится в постоянном температурном поле  $T(x, z)$ . Расчетная модель и граничные условия приведены на рис. 1. На  $\Gamma_1, \Gamma_3$  принято граничное условие – жесткая заделка,  $\Gamma_2$  свободна от нагрузок. По границе  $\Gamma_4$  приложена вертикальная нагрузка  $q = q_0 \sin(\omega_p t)$ , направленная вниз.

Используются следующие гипотезы: тело балки упругое, изотропное, но неоднородное; геометрическая нелинейность вводится по модели Теодора фон Кармана; соотношения получены на базе модифицированной моментной теории упругости с учетом модели Эйлера–Бернулли.

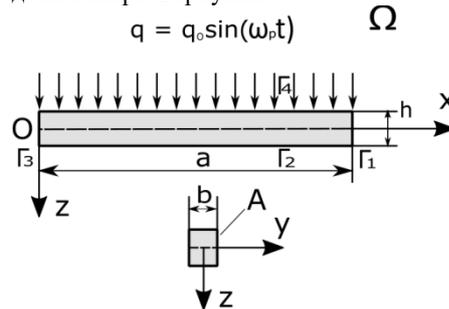


Рис. 1. Расчетная схема

Fig. 1. Design scheme

Для поля смещений  $(x, z)$  уравнение равновесия имеют вид

$$\sigma_{ij} = 0 \text{ в } \Omega,$$

где  $\sigma_{ij}$  – тензор напряжений. Связь линейных деформаций с перемещениями определяется по соотношениям

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}), i, j = 1, 2.$$

Соотношение напряжение–деформация записывается по закону Дюгамеля–Неймана [37]

$$\sigma_{ij} = (\lambda(x, y, z) + 2\mu(x, y, z)) \times (\varepsilon_{ij} - \alpha_i(x, y, z)T(x, y, z)\delta_{ij}), \quad (1)$$

где  $\lambda(x, y, z)$ ,  $\mu(x, y, z)$ ,  $\alpha_i(x, y, z)$ ,  $T(x, y, z)$  обозначают параметры Ламе, коэффициент теплопроводности неоднородного материала, температура балки и  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера, соответственно. Поля смещений и температуры связаны через уравнение (1).

На основании модифицированной моментной теории запасенная энергия упругой деформации балки  $U$  с учетом ее размерно-зависимого поведения может быть записана как

$$U = \frac{1}{2} \iint_{\Omega} (\sigma_{ij} \varepsilon_{ij} + m_{ij} \chi_{ij}) d\Omega, \quad (2)$$

где  $\sigma_{ij}$ ,  $\varepsilon_{ij}$ ,  $m_{ij}$  и  $\chi_{ij}$  обозначают компоненты симметричной части тензора напряжений  $\sigma$ , тензора деформаций  $\varepsilon$ , девиаторной части симметричного тензора момента высшего порядка  $m$  и симметричной части тензора кривизны  $\chi$ , соответственно.

Поле смещений в произвольной точке нанобалки Эйлера–Бернулли записываются в виде

$$u_1 = u(x, t) - z \frac{\partial w(x, t)}{\partial x}, \quad u_2 = 0, \quad u_3 = w(x, t), \quad (3)$$

где  $u(x, t)$ ,  $w(x, t)$  обозначают осевое перемещение и поперечное отклонение точек срединной линии, то есть при  $z = 0$ .

Используя (3), нелинейные соотношения Теодора фон Кармана могут быть выражены через поле смещений как:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}. \quad (4)$$

Также из равенства  $\phi_i = \frac{1}{2} (\text{rot}(\mathbf{u}))_i$  можно записать

$$\phi_x = 0, \quad \phi_y = -\frac{\partial w}{\partial x}, \quad \phi_z = 0. \quad (5)$$

Отсюда получаем следующее выражение для единственного неравного нулю компонента симметричной части тензора кривизны как

$$\chi_{xy} = \chi_{yx} = -\frac{1}{2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}. \quad (6)$$

Определяющие соотношения при наличии температурного поля для неравного нулю компонента девиаторной части тензора момента высшего порядка имеет вид:

$$m_{xy} = l^2 \mu \chi_{xy}, \quad (7)$$

где  $l$  – материальный размерно-зависимый параметр длины. Размерно-зависимый параметр – это константа, определяющая физические свойства материала, полученная экспериментальным путем. Эта константа появляется в математической модели, если материал рассматривается как континуум Коссера со стесненным вращением частиц. Вместе с модулем Юнга и коэффициентом Пуассона показывает связь между компонентами тензора изгиба кручения и компонентами тензора моментов высших порядков.

Из уравнений (2) и (3)–(7) может быть записана энергия деформации  $U$  неоднородной нанобалки как

$$\begin{aligned} U &= \frac{1}{2} \int_0^L \int_A (\sigma_{xx} \varepsilon_{xx} + 2m_{xy} \chi_{xy}) dA dx = \\ &= \frac{1}{2} \int_0^L \int_A \left\{ \sigma_{xx} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right) - \right. \\ &\quad \left. - \sigma_{xx} z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2m_{xy} \left( -\frac{1}{2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \right\} dA dx = \\ &= \frac{1}{2} \int_0^L \left\{ N_x \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right) - M_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2Y \left( -\frac{1}{2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \right\} dx, \quad (8) \end{aligned}$$

где  $A$  – площадь поперечного сечения балки, нормальная результирующая сила  $N$ , изгибающий момент  $M$  и момент высшего порядка  $Y$  имеют вид:

$$\begin{aligned} N_x &= \int_A \sigma_{xx} dA = k_1 \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right) - k_2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - N_t, \\ M_x &= \int_A \sigma_{xx} z dA = k_2 \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right) - k_3 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - M_t, \\ Y &= \int_A m_{xy} dA = -k_4 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \quad N_t = \int_A (\lambda + 2\mu) \alpha_i T dA, \\ M_t &= \int_A (\lambda + 2\mu) \alpha_i T z dA. \quad (9) \end{aligned}$$

Кинетическая энергия балки  $K$  определяется выражением:

$$\begin{aligned} K &= \frac{1}{2} \int_0^L \int_A \rho \left\{ \left( \frac{\partial u}{\partial t} - z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial t} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 \right\} dA dx = \\ &= \frac{1}{2} \int_0^L \int_A \rho \left\{ \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 - 2z \frac{\partial u}{\partial t} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial t} + z^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial t} + \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \right\} dA dx = \\ &= \frac{1}{2} \int_0^L \left\{ b_0 \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 - 2b_1 \frac{\partial u}{\partial t} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial t} + b_2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial t} + b_0 \left( \frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 \right\} dx. \quad (10) \end{aligned}$$

Компоненты жесткости и инерционные члены в уравнениях (9) и (10) определяются как

$$(k_1, k_2, k_3) = \int_A (\lambda + 2\mu) (1, z, z^2) dA,$$

$$k_4 = \int_A \mu l^2 dA, \quad (b_0, b_1, b_2) = \int_A \rho (1, z, z^2) dA.$$

Вариация работы  $\delta W$  произведенной внешней силой  $q$  имеет вид:

$$\delta W = \int_0^L q \delta w dx. \quad (11)$$

Уравнения движения неоднородной размерно-зависимой балки Эйлера–Бернулли могут быть выведены из принципа Гамильтона

$$\int_0^t (\delta K - \delta U + \delta W) dt = 0. \quad (12)$$

Подставляя (8), (10) и (11) в (12) и интегрируя по частям, получим разрешающие уравнения движения гибких неоднородных нанобалок с учетом упрощений и стационарного температурного поля, аддитивного белого шума и поперечной знакопеременной нагрузки:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left( C_0(x) \frac{\partial u}{\partial x} + C_0(x) \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 - C_1(x) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) - \frac{\partial N_t}{\partial x} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \\ & \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( C_1(x) \frac{\partial u}{\partial x} + C_1(x) \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 - C_2(x) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) - \frac{\partial^2 M_t}{\partial x^2} + \\ & + L_1(u, w) + \frac{1}{2} L_2(w, w) - L_3(w, w) - \\ & - \frac{\partial N_t}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{l^2}{2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( D_0(x) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) + \\ & + q + q_* = \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \varepsilon \rho h \frac{\partial w}{\partial t}, \quad (13) \\ & L_1(u, w) = \frac{\partial}{\partial x} \left( C_0 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \frac{\partial w}{\partial x}, \\ & L_2(w, w) = \frac{\partial}{\partial x} \left( C_0 \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right) \frac{\partial w}{\partial x}, \\ & L_3(w, w) = \frac{\partial}{\partial x} \left( C_1 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \frac{\partial w}{\partial x} \end{aligned}$$

– нелинейные слагаемые,

$$C_i(x) = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} (\lambda + 2\mu) z^i dz, \quad D_0(x) = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \mu dz.$$

Температурное поле не задается, а определяется из решения уравнений теплопроводности

$$\alpha_i \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = f(x, z) \quad (14)$$

с соответствующими краевыми условиями 1-го, 2-го, 3-го рода.

Для решения уравнения (14) применим метод вариационных итераций [38, 39] и его модификацию. Представим решение в виде  $T(x, y) = X(x) \cdot Y(y)$ . В качестве начального приближения одну из функций зададим произвольным образом, не удовлетворяя краевым условиям теплопроводности, и далее применим процедуру Бубнова–Галеркина в форме Л.В. Канторовича [40] и получим обыкновенные дифференциальные уравнения второго порядка, которые позволяют получить аналитическое решение, удовлетворив одному из краевых условий 1–3-го рода. Теперь полученное решение считается заданным, и строится процедура Бубнова–Галеркина в форме Канторовича уже по другой координате и т. д. Этот итерационный процесс очень быстро сходится и позволяет получить аналитическое решение уравнения теплопроводности (14). Такую же процедуру метода вариационных итераций можно применить для трехмерного уравнения теплопроводности. Теория такого подхода была разработана в [39].

В качестве примера рассмотрим прямоугольную в поперечном сечении ( $b=1$ ) балку с граничными условиями – жесткое защемление с обоих концов:

$$w(0, t) = w(a, t) = u(0, t) = u(a, t) = \frac{\partial w(0, t)}{\partial x} = \frac{\partial u(0, t)}{\partial x} = 0,$$

с начальными условиями:

$$w(x, 0) = 0, \quad u(x, 0) = 0, \quad \frac{\partial w(x, 0)}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial u(x, 0)}{\partial t} = 0,$$

с краевыми условиями для уравнения теплопроводности:

$$T(x, z) = \text{const}, \quad z = -h/2, \quad 0 \leq x \leq a,$$

$$T(x, z) = 0, \quad z = h/2, \quad 0 \leq x \leq a,$$

$$T(x, z) = 0, \quad -h/2 \leq z \leq h/2, \quad x = a,$$

$$T(x, z) = 0, \quad -h/2 \leq z \leq h/2, \quad x = 0,$$

где  $t$  – время;  $w, u$  – прогиб и функция перемещения по  $Ox$  соответственно;  $h$  – толщина нанобалки;  $q$  – параметр внешней равномерно распределенной нагрузки;  $\rho$  – плотность материала;  $a$  – длина балки;  $l$  – размерно-зависимый параметр;  $T$  – температура;  $q_* = w_n * \left( \frac{2 \text{rand}(\cdot)}{\text{randmax} + 1.0} - 1.0 \right)$  – белый шум – это обобщенный стационарный случайный процесс  $X(t)$  с постоянной спектральной плотностью.

Для учета физической нелинейности материала балок применяются деформационная теория пластичности и метод переменных параметров упругости. Согласно этому методу модуль упругости и коэффициент Пуассона связаны с модулями сдвига и деформации следующими соотношениями:

$$E = \frac{9KG}{3K + G}.$$

Объемная деформация  $K$  считается постоянной и равной  $1,94G_0$ . В деформационной теории модуль сдвига определяется по формуле

$$G = \frac{1}{3} \frac{\sigma_i(e_i)}{e_i}. \quad (16)$$

Диаграмма деформирования материала балок может иметь произвольный вид. В данной работе рассматривается чистый алюминий:

$$\sigma_i = \sigma_s \left[ 1 - \exp \left( -\frac{e_i}{e_s} \right) \right]. \quad (17)$$

Интенсивность деформаций определяется выражением

$$e_i = \left| \frac{2}{3} e_{xx} \right| = \frac{2}{3} \left| \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right|. \quad (18)$$

Здесь учтено, что составляющая  $e_{zz}$  находится из условия плоского напряженного состояния ( $\sigma_{zz} = 0$ ):

$$e_{zz} = -\frac{\nu}{1-\nu} e_{xx}.$$

Закон изменения нагрузки во времени и вдоль оси балки может быть произвольным.

#### Метод решения уравнений движения

Для решения системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных (16) используется следующий алгоритм:

1. Сведение к задаче Коши осуществляется методом конечных разностей второго порядка точности по пространственной координате  $x$ .

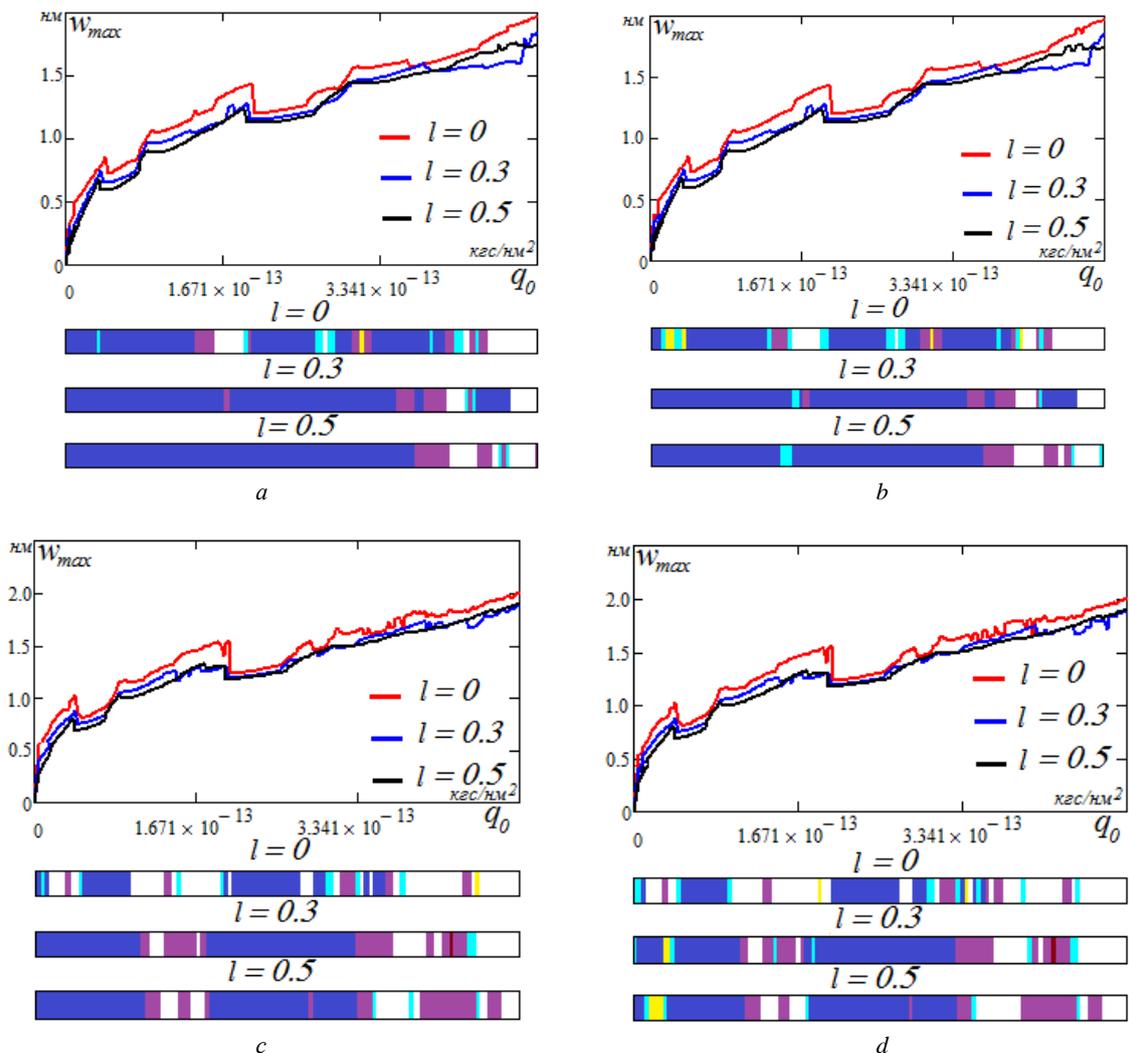
2. Решение задачи Коши по времени методом Ньюмарка. На каждом шаге по времени в точках  $n_x, n_z \in \Omega$  (здесь  $n_x, n_z$  – количество точек, на которое разбивается область  $\Omega$ ) вычисляется интенсивность деформаций (18), интенсивность напряжений (17) определяется модуль упругости (15) и модуль сдвига (16) при известных значениях прогиба  $w$  и перемещения  $u$ . Вычисляются переменные коэффициенты по толщине и длине, определенные интегралы для  $C_i, C_2, D_0$  вычисляются по формуле Симпсона. Так как шаг по времени очень мал, то строить итерационную процедуру переменных параметров упругости не следует. Для стационарных задач на каждом уровне нагрузки следует проводить итерационный процесс параметров упругости. Численный эксперимент это подтвердил.

### Численный эксперимент

Приведем результаты численного исследования чувствительного элемента акселерометра для измерения параметров буровых скважин в виде геометриче-

ски и физической нелинейной жестко заземленной нанобалки, находящейся в температурном поле, к которой приложена знакопеременная и шумовая нагрузка. Здесь  $\omega_p = 5$  – частота линейных собственных колебаний. Рассмотрена балка со следующими геометрическими и физическими параметрами: длина  $a=400$  нм, толщина  $h=4$  нм,  $l=0, 0,3, 0,5$  нм. Были рассмотрены следующие случаи:

- 1) балка находится под действием знакопеременной нагрузки (рис. 2, a);
- 2) балка находится в аддитивном белом шуме и под действием знакопеременной нагрузки (рис. 2, b);
- 3) балка находится в температурном поле и под действием знакопеременной поперечной нагрузки (рис. 2, c);
- 4) балка находится в температурном поле, аддитивном белом шуме и под действием знакопеременной поперечной нагрузки (рис. 2, d).



Условные обозначения

	Гармонические колебания на частоте $\omega_p$		Колебания на двух независимых частотах
	Гармонические колебания на частоте $\frac{\omega_p}{2^n}$		Колебания на двух независимых частотах и их линейных комбинациях

Хаос
------

**Рис. 2** Шкалы характера колебаний и зависимости максимального прогиба в центре балки от амплитуды нагрузки  $w_{max}(q_0)$ : а) температура  $T = 0^\circ\text{C}$ , интенсивность шума  $w_n = 0$ ; б) температура  $T = 0^\circ\text{C}$ , интенсивность шума  $w_n = 5$ ; в) температура  $T = 100^\circ\text{C}$ , интенсивность шума  $w_n = 0$ ; д) температура  $T = 100^\circ\text{C}$ , интенсивность шума  $w_n = 5$

**Fig. 2.** Scales of the nature of oscillations and dependences of the maximum deflection on the amplitude of the load  $w_{max}(q_0)$  а) temperature  $T = 0^\circ\text{C}$ , noise intensity  $w_n = 0$ ; б) temperature  $T = 0^\circ\text{C}$ , noise intensity  $w_n = 5$ ; в) temperature  $T = 100^\circ\text{C}$ , noise intensity  $w_n = 0$ ; д) temperature  $T = 100^\circ\text{C}$ , noise intensity  $w_n = 5$

При решении задач анализировались сигналы, фазовые портреты, сечение Пуанкаре, автокорреляционная функция, Фурье-спектр, знак старшего показателя Ляпунова во времени для каждой из балок в зависимости от величины размерно-зависимого параметра. На рис. 2 приведены шкалы характера колебаний и зависимости максимального прогиба от амплитуды нагрузки в центре балки  $w_{max}(q_0)$  для некоторых значений размерно-зависимого параметра  $l = 0; 0,3; 0,5$  (при  $l = 0$  без учета наноструктуры,  $l = 0,3; 0,5$  – учитывается наноструктура). Анализ численных результатов показал, что температурное и шумовое поле увеличивает области хаотических колебаний, зоны удвоения периода и колебаний на двух независимых частотах для упругих, изотропных, но неоднородных балок. С увеличением размерно-зависимого параметра увеличиваются зоны гармонических колебаний. При  $l = 0$  переход от гармонических колебаний к хаотическим происходит по сценарию Рюэля–Такенса–Ньюхауза, т. е. появляется независимая частота и линейные комбинации частоты возбуждения. При  $l = 0,3; 0,5$  хаотические колебания до  $q_0 = 4,6 \cdot 10^{-13}$  кгс/мм<sup>2</sup> отсутствуют, в то время как для  $l = 0$  такого не наблюдается.

#### Заключение

Построена математическая модель нелинейной динамики чувствительных элементов акселерометра для измерения параметров буровых скважин. Проведены численные эксперименты для чувствительных

элементов наноэлектромеханических систем, которые могут рассматриваться как гибкие упругие изотропные, но неоднородные нанобалки, находящиеся в стационарном температурном поле, под действием поперечной знакопеременной нагрузки и аддитивного белого шума. Математическая модель представляет собой систему дифференциальных уравнений в частных производных высокого порядка и высокой нелинейности. Проведен анализ устойчивости решения полученной системы дифференциальных уравнений, определен сценарий перехода от гармонических колебаний исследуемого объекта к хаотическому (сценарий Рюэля–Такенса–Ньюхауза).

Выявлено, что температурное и шумовое поля уменьшают нагрузку, при которой происходит переход в хаотическое состояние системы. Это существенно, если расчетная модель элемента прибора адекватно отражает условия его работы (т. е. учет неоднородности материала и физической нелинейности). Это указывает на то, что выбор расчетной схемы при расчете приборов НЭМС, применяемых в георазведке, чрезвычайно важен. Уменьшение чувствительного элемента прибора до наноразмера (учет размерно-зависимого параметра  $l$  в математической модели) приводит к увеличению зон гармонических колебаний и, как следствие, к стабильной работе и долговечности работы прибора.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 19-19-00215.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бойков В.И., Смирнов А.И. Построение модели пьезоактюатора с учетом нежесткости основания // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2019. – Т. 62. – № 4. – С. 393–399.
2. Левицкий А.А., Маринушкин П.С. Проектирование микросистем. Программные средства обеспечения САПР. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2010. – 156 с.
3. Галкина С.А., Барулина М.А. Влияние неизотропности материала на деформацию чувствительного элемента микромеханического акселерометра // Нано- и микросистемная техника. – 2019. – Т. 21. – № 1. – С. 14–23.
4. Лестев А.М., Фёдоров М.В., Евстафьев С.Д. Идентификация структуры шумов микромеханических инерциальных преобразователей параметров движения // Радиопромышленность. – 2019. – Т. 29. – № 2. – С. 69–75.
5. Расчет угловой жесткости упругого элемента микромеханического акселерометра / М.Е. Калинин, А.С. Козлов, Р.Я. Лабковская, О.И. Пирожникова, В.Л. Ткалич // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2019. – Т. 62. – № 6. – С. 534–541.
6. Антонов Е.А., Меркурьев И.В., Подалков В.В. Влияние нелинейной жесткости упругих элементов на динамику двухмассового микромеханического гироскопа L-L-типа в режиме вынужденных колебаний // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2019. – № 57. – С. 53–61.
7. Лестев А.М., Ефимовская А.В. О влиянии нелинейных факторов на динамику микромеханического гироскопа с двухмассовым чувствительным элементом // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2012. – Т. 55. – № 5. – С. 40–46.
8. Скважинные насосные установки для добычи нефти / В.Н. Ивановский, В.И. Дарищев, А.А. Сабиров, В.С. Каштанов, С.С. Пекин. – М.: Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2002. – 824 с.
9. Котов А.А., Коротаев Б.А. Расчет буровой колонны для бурения на экватории // Известия высших учебных заведений. Арктический регион. – 2017. – № 1. – С. 112–119.
10. Юнин Е.К., Турыгин Е.Ю. К вопросу оценки касательных напряжений, вызываемых крутильными автоколебаниями буровой колонны // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2010. – № 6. – С. 6–13.
11. Дорофеев А.А. Исследование кремниевых наноэлектромеханических резонаторов на основе подвешенных наноструктур // Ломоносов 2019: Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. – М.: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова. 2019. – С. 628–629.

12. Хвесько В.И., Скрыбин А.С. Теплопроводность наноструктур // Теплофизика высоких температур. – 2017. – Т. 55 – № 3. – С. 447–471.
13. Юров В.М., Гученко С.А., Лауринас В.Ч. Коэффициент теплопроводности наноструктур // Инновационная наука. – 2019. – № 5. – С. 10–14.
14. Гринберг Я.С., Пашкин Ю.А., Ильичев Е.В. Наномеханические резонаторы // Успехи физических наук. – 2012. – Т. 182. – № 4. – С. 407–436.
15. Strain gradient plasticity: theory and experiments / N.A. Fleck, G.M. Muller, M.F. Ashby, J.W. Hutchinson // Acta Metallurgica et Materialia. – 1994. – № 42. – P. 475–487.
16. Mazza E., Abel S., Dual J. Experimental determination of mechanical properties of Ni and Ni-Fe microbars // Microsystem Technologies. – 1996. – V. 2. – № 4. – P. 197–202.
17. Experiments and theory in strain gradient elasticity / D.C.C. Lam, F. Yang, A.C.M. Chong, J. Wang, P. Tong // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 2003. – № 51. – P. 1477–1508.
18. Ma Q., Clarke D.R. Size dependent hardness of silver single crystals // Journal of Materials Research. – 1995. – V. 10. – № 4. – P. 853–863.
19. Engelman D.M. Membranes are more mosaic than fluid (review) // Nature. – 2005. – V. 438. – № 7068. – P. 578–580.
20. Cosserat E., Cosserat F. Théorie des corps déformables. – Paris: Hermann et Fils, 1909. – 242 p.
21. Couple stress based strain gradient theory for elasticity / F. Yang, A.C.M. Chong, D.C.C. Lam, P. Tong // International Journal of Solids and Structures. – 2002. – № 39. – P. 2731–2743.
22. Chaotic dynamics of the size-dependent non-linear micro-beam model / A.V. Krysko, J. Awrejcewicz, S.P. Pavlov, M.V. Zhigalov, V.A. Krysko // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. – 2017. – № 50. – P. 16–28.
23. Park S.K., Gao X.L. Bernoulli–Euler beam model based on a modified couple stress theory // Micromech Microeng. – 2006. – V. 16. – № 11. – P. 2355–2359.
24. The size-dependent natural frequency of Bernoulli–Euler microbeams / Sh. Kong, Sh. Zhou, Zh. Nie, K. Wang // International Journal of Engineering Science. – 2008. – № 46. – P. 427–437.
25. Rajabi F., Ramezani S. A nonlinear microbeam model based on strain gradient elasticity theory with surface energy // Archive of Applied Mechanics. – 2012. – № 82. – P. 363–376.
26. Дмитриев А.С. Тепловые процессы в наноструктурах. – М.: ИД МЭИ, 2012. – 302 с.
27. Дмитриев А.С. Введение в нанотеплофизику. – М.: БИНОМ, 2015. – 792 с.
28. Hadjesfandiari A.R. Size-dependent thermoelasticity // Latin American Journal of Solids and Structures. – 2014. – № 11. – P. 1679–1708.
29. Sobolev S.L. Equations of transfer in non-local media // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1994. – № 14. – P. 2175–2182.
30. Tzou D.Y. Macro-to-micro-scale heat transfer: the lagging behavior. – New-Jersey: CRC Press, 1996. – 576 p.
31. Brock L.M. Reflection of transient plane step-stress waves: Some considerations of orthotropy and thermoelasticity // Journal of Mechanics of Materials and Structures. – 2011. – V. 6. – № 1–4. – P. 87–104.
32. Хорстхемке В., Лефевр Р. Индуцированные шумом переходы: теория и применение в физике, химии и биологии. – М.: Мир, 1987. – 400 с.
33. Lynch J.J., Nagele R.G. Flicker noise effects in noise adding radiometers // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2011. – № 59. – P. 196–205.
34. Хаотическая динамика гибких замкнутых цилиндрических наноболочек при локальном нагружении / О.А. Салтыкова, О.А. Афонин, Т.В. Яковлева, А.В. Крысько // Нелинейный мир. – 2018. – Т. 16. – № 5. – С. 3–15.
35. Параметрические колебания и контактное взаимодействие в компонентах микромеханических датчиков инерциальной информации / Т.В. Яковлева, А.В. Крысько, В.С. Кружилин, В.А. Крысько // Проблемы прочности и пластичности. – 2018. – Т. 80. – № 1. – С. 63–71.
36. Новая методика определения истинности хаотической динамики чувствительных элементов микро- и наноэлектромеханических систем / О.А. Афонин, О.А. Салтыкова, И.В. Папкова, А.В. Крысько // Нелинейный мир. – 2018. – Т. 16. – № 5. – С. 23–32.
37. Quantifying chaos by various computational methods. P. 1: Vibrations of the Bernoulli–Euler beam subjected to periodic and colored noise / J. Awrejcewicz, A.V. Krysko, N.P. Erofeev, V. Dobriyan, M.A. Barulina, V.A. Krysko // Entropy. – 2018. – V. 20. – № 3. – P. 170–183.
38. Математическое и компьютерное моделирование распределенных механических наноструктур / В.А. Крысько, С.П. Павлов, М.В. Жигалов, О.А. Салтыкова, А.В. Крысько. – Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., 2018. – 384 с.
39. Contact interaction of two rectangular plates made from different materials with an account of physical non-linearity / J. Awrejcewicz, V.A. Krysko, M.V. Zhigalov, A.V. Krysko // Nonlinear Dynamics. – 2018. – V. 91. – № 2. – P. 1191–1211.
40. Канторович Л.В., Крылов В.И. Приближенные методы высшего анализа. 5-е изд. – М.; Л.: Физматлит, 1962. – 708 с.

Поступила 14.11.2019 г.

#### Информация об авторах

**Крысько В.А.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой математики и моделирования, Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина.

**Папкова И.В.**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математики и моделирования, Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина; инженер, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

**Яковлева Т.В.**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математики и моделирования, Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина; инженер, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

**Захарова А.А.**, доктор технических наук, профессор кафедры информатики и программного обеспечения Брянского государственного технического университета; старший научный сотрудник, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

**Жигалов М.В.**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры математики и моделирования, Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина.

**Крысько А.В.**, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник НОЦ «Математическое и компьютерное моделирование», Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина; инженер, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

UDC 539.3

## DYNAMICS OF A GEOMETRICALLY AND PHYSICALLY NONLINEAR SENSITIVE ELEMENT OF A NANO-ELECTROMECHANICAL SENSOR IN THE FORM OF AN INHOMOGENEOUS NANOBEAM IN THE TEMPERATURE AND NOISE FIELDS

**Vadim A. Krysko**<sup>1</sup>,  
tak@san.ru

**Irina V. Papkova**<sup>1,2</sup>,  
ikravzova@mail.ru

**Tatiana V. Yakovleva**<sup>1,2</sup>,  
yan-tan1987@mail.ru

**Alena A. Zakharova**<sup>3,2</sup>,  
zaa@tu-bryansk.ru

**Maksim V. Zhigalov**<sup>1</sup>,  
zhigalovm@yandex.ru

**Anton V. Krysko**<sup>1,2</sup>,  
anton.krysko@gmail.com

<sup>1</sup> Yuri Gagarin Saratov State Technical University,  
77, Politechnicheskaya street, Saratov, 410054, Russia.

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

<sup>3</sup> Bryansk State Technical University,  
7, 50 let Oktyabrya blvd, Bryansk, 241035, Russia.

**The research relevance.** Nanoelectromechanical systems, being highly sensitive sensors with small dimensions and reliable in operation, are increasingly used in the oil and gas industry for monitoring various processes in oil production, from exploration to enhanced oil recovery, as well as in well drilling, cleaning, fractionation and processing before decommissioning. One application example of nanoelectromechanical systems is seismic exploration. The use of nanoelectromechanical systems offers improved performance in addition to significant cost and time savings for a wide range of oil and gas industry technologies. With continuous monitoring capabilities, these technologies can become the foundation of smart deposits.

**The main aim** of the research is a construction of a mathematical model that most closely describes the sensitive element nonlinear dynamics of a nanoelectromechanical sensor under an alternating load action. For this, it is necessary to take into account the most common kinematic hypotheses, scale effects using the modified couple stress theory of elasticity, the nonlinear relationship between stresses and strains, the material inhomogeneity, noise and thermal fields. And also to examine the complex nonlinear oscillations nature and identify patterns of transition from harmonic to chaotic.

**Objects:** geometrically and physically nonlinear nanobeam, described by the kinematic model of the first approximation, which is affected by a uniformly distributed alternating transverse load with a harmonic component, the temperature field and additive external noise.

**Methods:** variation methods, a second-order finite difference method for reducing the system of nonlinear partial differential equations to the Cauchy problem, the Newmark method for solving the Cauchy problem, the Birger method of variable elasticity parameters for solving a physically non-linear problem, the variation iteration method for obtaining an analytical solution of the two-dimensional heat equation.

**Results.** The variation iterations method is used to obtain an analytical solution of thermal conductivity. An oscillations mathematical model for the sensitive element of the nanoelectromechanical sensor in the form of a size-dependent beam, on which a uniformly distributed transverse load with a harmonic component acts, is constructed. In addition to the variable load, the influence of the temperature field and additive external noise exposure were taken into account. The geometric nonlinearity is accepted according to Theodore von Karman theory (the relationship between deformations and displacements). To take into account the physical nonlinearity of the beam material, the deformation plasticity theory and the method of variable elasticity parameters are used. The motion equations of a mechanical system element, as well as the corresponding boundary and initial conditions, are derived from the Ostrogradsky–Hamilton principle based on a modified moment theory taking into account the Euler–Bernoulli hypothesis. It was revealed that the temperature and noise fields reduce the load at which the transition to the chaotic state of the system occurs. The transition from harmonic to chaotic oscillations occurs according to Ruelle–Takens–Newhouse scenario.

### Key words:

Euler–Bernoulli nanobeam, nanoelectromechanical system, accelerometer for measuring borehole parameters, temperature and noise fields, modified couple stress theory of elasticity, finite difference and Newmark methods, chaotic oscillations of a nanoelectromechanical system.

The research was financially supported by the RSF grant no. 19-19-00215.

### REFERENCES

1. Boykov V.I., Smirnov A.I. Building a piezo actuator model taking into account the nonrigidity of the base. *Journal of Instrument Engineering*, 2019, vol. 62, no. 4, pp. 393–399. In Rus.
2. Levitckiy A.A., Marinushkin P.S. *Proektirovanie mikrosistem. Programmiye sredstva obespecheniya SAPR* [Microsystem design. CAD software]. Krasnoyarsk, SibFU Publ., 2010. 156 p.
3. Galkina S.A., Barulina M.A. The effect of the non-isotropy of the material on the deformation of the sensitive element of the micro-mechanical accelerometer. *Nano and microsystem technology*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 14–23. In Rus.
4. Lestev A.M., Fedorov M.V., Evstafev S.D. Identifikatsiya struktury shumov mikromekhanicheskikh inertsiyalnykh preobrazovateley parametrov dvizheniya [Identification of the noise structure of micromechanical inertial converters of motion parameters]. *Radiopromyshlennost*, 2019, vol. 29, no. 2, pp. 69–75.
5. Kalinkina M.E., Kozlov A.S., Labkovskaya R.Ya., Pirozhnikova O.I., Tkalic V.L. Calculation of the angular stiffness of the elastic element of the micromechanical accelerometer. *Journal of Instrument Engineering*, 2019, vol. 62, no. 6, pp. 534–541. In Rus.
6. Antonov E.A., Merkurev I.V., Podalkov V.V. The influence of nonlinear rigidity of elastic elements on the dynamics of a two-

- mass L-L-type micromechanical gyroscope in the forced oscillation mode. *Bulletin of the Tomsk state university. Mathematics and mechanics*, 2019, no. 57, pp. 53–61. In Rus.
7. Lestev A.M., Efimovskaya A.V. On the influence of nonlinear factors on the dynamics of a micromechanical gyroscope with a two-mass sensitive element. *Journal of Instrument Engineering*, 2012, vol. 55, no. 5, pp. 40–46. In Rus.
  8. Ivanovskiy V.N., Darishev V.I., Sabirov A.A., Kashtanov V.S., Pekin S.S. *Skvazhinnye nasosnye ustanovki dlya dobychi nefi* [Oil well pumping units]. Moscow, I.M. Gubkin Oil and gas RGU, 2002. 824 p.
  9. Kotov A.A., Korotaev B.A. Calculation of a drill string for drilling in the water area. *News of higher educational institutions. Arctic region*, 2017, no. 1, pp. 112–119. In Rus.
  10. Yunin E.K., Turygin E.Yu. K voprosu otchenki kasatelnykh napryazheniy, vyzhivaemykh krutilnymi avtokolebaniyami burilnoy kolonny [On the issue of internal shear caused by torsion self-vibrations of drill string. *Construction of oil and gas wells on land and at sea*, 2010, no. 6, pp. 6–13. In Rus.
  11. Dorofeev A.A. Issledovanie kremnievykh nanoelektromekhanicheskikh rezonatorov na osnove podveshennykh nanostruktur [Study of silicon nanoelectromechanical resonators based on suspended nanostructures]. *Lomonosov 2019. Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya studentov, aspirantov i molodykh ucenykh* [International scientific conference of students and young scientists. Lomonosov 2019]. Moscow, Lomonosov Moscow State University Publ., 2019. pp. 628–629.
  12. Khvesyuk V.I., Skryabin A.S. Teploprovodnost nanostruktur [Thermal conductivity of nanostructures]. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 2017, vol. 55, no. 3, pp. 447–471.
  13. Yurov V.M., Gurchenko S.A., Laurinas V.Ch. Koeffitsient teploprovodnosti nanostruktur [Thermal conductivity of nanostructures]. *Innovatsionnaya nauka*, 2019, no. 5, pp. 10–14.
  14. Grinberg Ya.S., Pashkin Yu.A., Ilichev E.V. Nanomekhanicheskie rezonatory [Nanomechanical resonators]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2012, vol. 182, no. 4, pp. 407–436.
  15. Fleck N.A., Muller G.M., Ashby M.F., Hutchinson J.W. Strain gradient plasticity: theory and experiments. *Acta Metallurgica et Materialia*, 1994, no. 42, pp. 475–487.
  16. Mazza E., Abel S., Dual J. Experimental determination of mechanical properties of Ni and Ni-Fe microbars. *Microsystem Technologies*, 1996, vol. 2, no. 4, pp. 197–202.
  17. Lam D.C.C., Yang F., Chong A.C.M., Wang J., Tong P. Experiments and theory in strain gradient elasticity. *Journal of Materials Research*, 2003, no. 51, pp. 1477–1508.
  18. Ma Q., Clarke D.R. Size dependent hardness of silver single crystals. *Journal of Materials Research*, 1995, vol. 10, no. 4, pp. 853–863.
  19. Engelman D.M. Membranes are more mosaic than fluid (review). *Nature*, 2005, vol. 438, no. 7068, pp. 578–580.
  20. Cosserat E., Cosserat F. *Théorie des corps déformables* [Theory of deformed elements]. Paris, Hermann et Fils, 1909. 242 p.
  21. Yang F., Chong A.C.M., Lam D.C.C., Tong P. Couple stress based strain gradient theory for elasticity. *International Journal of Solids and Structures*, 2002, no. 39, pp. 2731–2743.
  22. Krysko A.V., Awrejcewicz J., Pavlov S.P., Zhigalov M.V., Krysko V.A. Chaotic dynamics of the size-dependent non-linear micro-beam model. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2017, no. 50, pp. 16–28.
  23. Park S.K., Gao X.L. Bernoulli–Euler beam model based on a modified couple stress theory. *Micromech Microeng*, 2006, vol. 16, no. 11, pp. 2355–2359.
  24. Kong Sh., Zhou Sh., Nie Zh., Wang K. The size-dependent natural frequency of Bernoulli–Euler micro-beams. *International Journal of Engineering Science*, 2008, no. 46, pp. 427–37.
  25. Rajabi F., Ramezani S. A nonlinear microbeam model based on strain gradient elasticity theory with surface energy. *Archive of Applied Mechanics*, 2012, no. 82, pp. 363–376.
  26. Dmitriev A.S. *Teplovy protsessy v nanostrukturakh* [Thermal processes in nanostructures]. Moscow, MEI Publ. house, 2012. 302 p.
  27. Dmitriev A.S. *Vvedenie v nanoteplofiziku* [Introduction to Nanothermophysics]. Moscow, BINOM Publ., 2015. 792 p.
  28. Hadesfandiari A.R. Size-dependent thermoelasticity. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2014, no. 11, pp. 1679–1708.
  29. Sobolev S.L. Equations of transfer in non-local media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1994, no. 14, pp. 2175–2182.
  30. Tzou D.Y. *Macro-to-micro-scale heat transfer: the Lagging behavior*. New Jersey, CRC Press, 1996. 576 p.
  31. Brock L.M. Reflection of transient plane step-stress waves: Some considerations of orthotropy and thermoelasticity. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 2011, vol. 6, no. 1–4, pp. 87–104.
  32. Horsthemke W., Lefever R. *Noise-induced transitions: theory and applications in physics, chemistry and biology*. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, Springer-Verlag, 1984. 400 p.
  33. Lynch J.J., Nagele R.G. Flicker noise effects in noise adding radiometers. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2011, no. 59, pp. 196–205.
  34. Saltykova O.A., Afonin O.A., Yakovleva T.V., Krysko A.V. The chaotic dynamics of flexible closed cylindrical nanoshells under local loading]. *Non-linear world*, 2018, vol. 16, no. 5, pp. 3–15. In Rus.
  35. Yakovleva T.V., Krysko A.V., Kruzhilin V.S., Krysko V.A. Parametric oscillations and contact interaction in the components of micromechanical sensors of inertial information. *Strength and ductility problems*, 2018, vol. 80, no. 1, pp. 63–71. In Rus.
  36. Afonin O.A., Saltykova O.A., Papkova I.V., Krysko A.V. A new method for determining the truth of the chaotic dynamics of sensitive elements of micro- and nanoelectromechanical systems. *Non-linear world*, 2018, vol. 16, no. 5, pp. 23–32. In Rus.
  37. Awrejcewicz J., Krysko A.V., Erofeev N.P., Dobriyan V., Barulina M.A., Krysko V.A. Quantifying chaos by various computational methods. P. 1: Vibrations of the Bernoulli-Euler beam subjected to periodic and colored noise. *Entropy*, 2018, vol. 20, no. 3, pp. 170–183.
  38. Krysko V.A., Pavlov S.P., Zhigalov M.V., Saltykova O.A., Krysko A.V. *Matematicheskoe i kompyuternoe modelirovanie raspredelennykh mekhanicheskikh nanostruktur* [Mathematical and computer modeling of distributed mechanical nanostructures]. Saratov, Yuri Gagarin Saratov State Technical University, 2018. 384 p.
  39. Awrejcewicz J., Krysko V.A., Zhigalov M.V., Krysko A.V. Contact interaction of two rectangular plates made from different materials with an account of physical non-linearity. *Nonlinear Dynamics*, 2018, vol. 91, no. 2, pp. 1191–1211.
  40. Kantorovich L.V., Krylov V.I. *Priblizhennyye metody vysshego analiza* [Approximate methods of higher analysis]. Moscow, Leningrad, Fizmatlit Publ., 1962. 708 p.

Received: 14 November 2019.

#### Information about the authors

**Vadim A. Krysko**, Dr. Sc., professor, head of Mathematics and Modeling Department, Yuri Gagarin Saratov State Technical University.

**Irina V. Papkova**, Cand. Sc., associate professor, Yuri Gagarin Saratov State Technical University; engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Tatiana V. Yakovleva**, Cand. Sc., associate professor, Yuri Gagarin Saratov State Technical University; engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Alena A. Zakharova**, Dr. Sc., professor, Bryansk State Technical University; senior Researcher, National Research Tomsk Polytechnic University

**Maksim V. Zhigalov**, Dr. Sc., professor, Yuri Gagarin Saratov State Technical University.

**Anton V. Krysko**, Dr. Sc., professor, Yuri Gagarin Saratov State Technical University; engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 621.313.322

## ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ БЕЗРЕДУКТОРНОЙ МАШИНЫ С ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕМ ПОТОКА ДЛЯ ВЕТРОГЕНЕРАТОРА

Практ Владимир Алексеевич<sup>1</sup>,  
va.pakht@urfu.ru

Дмитриевский Владимир Александрович<sup>1</sup>,  
vladimir.dmitrievsky@urfu.ru

Казакбаев Вадим Маратович<sup>1</sup>,  
vadim.kazakbaev@urfu.ru

<sup>1</sup> Уральский Федеральный Университет,  
Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19.

**Актуальность** исследования обусловлена возрастающей потребностью применения автономных гибридных электростанций, использующих возобновляемые источники с целью уменьшения потребления органического топлива. Улучшение рабочих свойств и уменьшение стоимости безредукторных ветрогенераторов, применяемых в составе таких электростанций, способствует улучшению их технико-экономических характеристик.

**Цель:** поиск эффективного подхода для оптимизации генератора с переключением потока для безредукторной ветроустановки, позволяющего сократить применение вычислительных ресурсов, в сравнение с существующими подходами; выработка рекомендаций к проектированию ветрогенератора с переключением потока с постоянными магнитами на статоре; улучшение характеристик конструкции генератора, спроектированной ранее.

**Объекты:** математическая модель и конструкция генератора с переключением потока с магнитами на статоре, математическая модель безредукторной ветротурбины.

**Методы:** безградиентный метод оптимизации, математическое моделирование, двухмерный метод конечных элементов, оценка и анализ скорости ветра в различных мировых регионах, статистические методы.

**Результаты.** Произведена многокритериальная оптимизация конструкции безредукторного ветрогенератора с переключением потока. В результате были улучшены энергетические характеристики генератора, снижены пульсации момента, а также снижена номинальная мощность электронного преобразователя ветроустановки. Получены общие рекомендации, относительно геометрии конструкции, которые могут быть использованы при проектировании таких генераторов. Предложен метод расчета замещающих профилей для характеристики цикла работы ветротурбины, которой может быть использован для снижения вычислительных затрат в процессе оптимизации ветрогенераторов. Показано сокращение вычислительных затрат с помощью полученного метода на примере замены исходной девятиточечной характеристики цикла работы ветротурбины на замещающий двухточечный профиль.

### Ключевые слова:

Автономные гибридные электростанции, безредукторные генераторы, ветрогенераторы, ветроэнергетика, возобновляемые источники энергии, генераторы с постоянными магнитами, оптимальное проектирование, электрическая машина с переключением потока, энергоэффективность.

### Введение

Ввиду возрастающих цен на органическое топливо и трудностью его транспортировки для электроснабжения отдаленных, не связанных с единой энергосистемой, северных и восточных районов России все более актуальной становится использование гибридных генераторных установок. Такие установки наряду с ресурсами недр могут использовать возобновляемые источники: гидроресурсы рек, солнечную энергию и энергию ветра [1].

В связи с этим, в числе прочего, возрастает необходимость применения безредукторных ветряных турбин. Большое количество литературных источников посвящено оптимизации низкоскоростных ветрогенераторов для этого приложения [2–4].

В работе [5] рассматривается оптимизация безредукторного синхронного генератора с постоянными магнитами (ПМСГ) 500 кВт, 36 об/мин. Оптимизация проводится по критерию годовой выработки электроэнергии (ГВЭ). При этом учитываются 8 различных точек цикла работы генератора при разной скорости

ветра (каждая точка цикла работы характеризуется различными величинами скорости вращения и механического момента на валу генератора). Отмечается, что применение такого критерия оптимизации вызывает очень большие затраты вычислительных ресурсов, поэтому оптимизационный расчет осуществляется с помощью распределенных параллельных вычислений.

В [6] рассматривается многокритериальная оптимизация маломощного (около 2 кВт, 250 об/мин) ПМСГ. В качестве критериев рассматриваются ГВЭ и масса магнитов. При этом учитываются 10 различных точек цикла работы генератора при разной скорости ветра. В работе используется генетический алгоритм. Целевая функция являлась отношением степенных функций критериев оптимизации (ГВЭ и масса постоянных магнитов).

В [7] рассматривается многокритериальная оптимизация ПМСГ большой мощности. В качестве критериев рассматриваются ГВЭ, масса и стоимость активных материалов. При этом учитываются 10 различ-

ных точек цикла работы генератора при разной скорости ветра.

Все рассмотренные выше методы [5–7] позволяют оптимизировать конструкцию безредукторного генератора так, чтобы увеличить ГВЭ. Однако существенным недостатком данных методов является большая вычислительная трудоемкость, так как требуется рассчитывать характеристики генератора в 8 и более точках цикла работы в ходе каждой итерации.

В данной работе рассматривается методика построения замещающих профилей для характеристики цикла работы ветротурбины, содержащих небольшое число точек, например, 2 или 3. Методика применима как для упрощения дискретных характеристик цикла работы с большим числом точек, так и для дискретизации непрерывных характеристик. Этот подход открывает широкие возможности для оптимизации электрических машин, поскольку ресурсоёмкость расчёта целевой функции существенно уменьшается по сравнению с [5–7].

Достойной альтернативой традиционной конструкции ПМСГ с магнитами на роторе в рассматриваемом приложении может быть электрическая машина с переключением потока (ЭМПП) с магнитами на статоре, применение которой позволяет снизить расход редкоземельных постоянных магнитов [8–12] или полностью исключить их применение путем замены на магниты из менее дорогих материалов [11, 13].

В данной работе рассматривается критерий оптимальности для безредукторного генератора с переключением потока (ГПП), который направлен на увеличение ГВЭ (уменьшение потерь в генераторе), требуемой номинальной мощности AC/DC преобразователя, а также на уменьшение массы магнитов. Оптимизация ГПП с использованием предложенного критерия произведена с помощью метода Нелдера–Мида.

На основе предложенного метода в качестве примера спроектирован трехфазный безредукторный ГПП для ветротурбины; 9 рабочих точек, соответствующих максимальной мощности этой турбины для ряда скоростей вращения, взяты из [14]. Принято, что скорость ветра подчиняется статистическому распределению Релея [15]. На основе этой исходной девятиточечной характеристики построены двух- и трехточечные замещающие профили. Выполнена оптимизация с использованием двухточечного профиля. Вычисления, выполненные для исходной и оптимизированной конструкции по двух- и трехточечным замещающим профилям, сравниваются с вычислениями, выполненными по исходной девятиточечной характеристике/профилю. Показано, что результаты вычислений в этих трех случаях очень близки. Описываются основные геометрические соотношения оптимальной конструкции ГПП.

#### Краткое описание выбранной конструкции ГПП и ее математической модели

Рис. 1 показывает эскиз рассматриваемой конструкции ГПП с 24 зубцами статора и 22 зубцами ротора. Магниты вставляются в пазы, выполненные в каждом зубце статора. Магниты, расположенные в

соседних пазах, имеют противоположное направление намагниченности. Целостность конструкции статора обеспечивается тонкими ребрами на внутренней и внешней поверхности. На каждом втором зубце статора размещается сосредоточенная катушка. Для снижения потерь от вихревых токов каждый магнит разделен на 3 изолированные части.

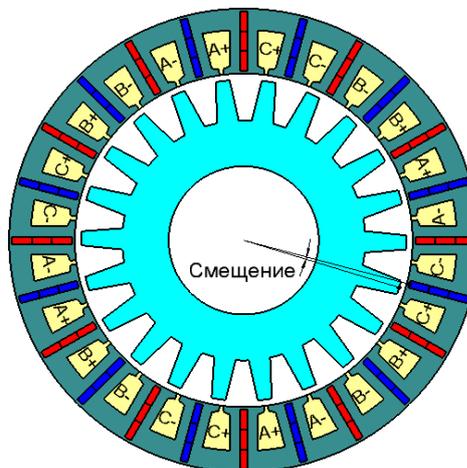


Рис. 1. Эскиз конструкции 22/24 генератора с переключением потока

Fig. 1. Sketch of design of 22/44 flux switching generator

Математическая модель ГПП основана на решении последовательности двумерных магнитостатических задач для диапазона различных позиций ротора, определяемого симметрией. Потокосцепления и напряжения фазных обмоток, потери в обмотках и магнитопроводе вычисляются после решения этих краевых задач методом конечных элементов (МКЭ). Принято, что фазный ток имеет синусоидальную форму [16–18]. Механическая мощность на валу генератора является исходным параметром для расчета. Амплитуда тока при этом рассматривается как величина, которую нужно подобрать для получения заданной механической мощности.

Электрическим периодом ГПП является поворот ротора на одно зубцовое деление, т. е. на  $360/22=16,36^\circ$ . Это значит, что частота питающего напряжения в 22 раза больше частоты вращения ротора ( $f_e=Z_r \cdot n/60$  где  $f_e$  – это электрическая частота статора, Гц;  $n$  – механическая частота вращения ротора, об/мин;  $Z_r$  – число зубцов ротора).

Пусть зубец ротора ГПП находится над серединой зубца статора, обмотанного катушкой фазы А. Поскольку число зубцов ротора близко к числу зубцов статора, в этот момент примерно над серединой ближайшего зубца статора, обмотанного фазой С, также находится зубец ротора, расположенный через 2 зубцовых деления ротора.

Более точный расчёт даёт величину смещения  $2 \cdot 360/22 - 2 \cdot 360/24 = 360/(22 \cdot 6)^\circ$  (рис. 1). Таким образом, ГПП обладает симметрией относительно поворота ротора на одну шестую электрического периода и перестановки фаз  $I_A \rightarrow -I_C$ ,  $I_B \rightarrow -I_A$ ,  $I_C \rightarrow -I_B$ . Поэтому достаточно рассмотреть положения ротора в интерва-

ле 1/6 электрического периода. В данной работе этот интервал делится на 15 равных частей. Общее число рассматриваемых краевых задач при расчете характеристик машины равно 16, а именно краевые задачи для начала и конца интервала и ещё 14 промежуточных краевых задач.

Кроме того, симметрия конструкции машины, как целого, позволяет сократить расчётную область в 2 раза (рис. 2). В данном исследовании для всех краевых задач выбиралась одна и та же расчётная область. Расчётная область разделена на две подобласти линией, проходящей по середине воздушного зазора. Угол поворота ротора учитывается задаваемым вдоль этой линии сшивающим граничным условием, зависящим от времени. Границы *P I* и *P II* сшиваются периодическим условием.

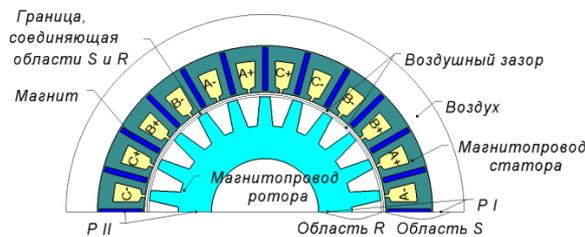


Рис. 2. Область расчета

Fig. 2. Calculation area

Чтобы учесть магнитное поле за внешней границей статора ГПП, добавлена воздушная область, толщина которой равна зубцовому делению статора. В целом представленная математическая модель ГПП аналогична математическим моделям других электрических машин, описанных в [19, 20].

#### Расчет замещающих профилей нагрузки генератора

Под профилем нагрузки генератора для ветряной турбины будем понимать совокупность зависимости момента *T* от скорости вращения вала *n*, соответствующей максимальной мощности, и статистического распределения во времени точек характеристики рабочего цикла турбины. Профиль нагрузки может быть непрерывным. Тогда задается зависимость *T(n)* и плотность распределения скорости *n*. Также профиль нагрузки может быть дискретным или заданным дискретно. Тогда задаются пары значения *T* и *n* и доля времени (вероятность), соответствующая этим значениям *T* и *n*.

Задание профиля нагрузки позволяет вычислять средние значения случайных величин. В частности, в случае дискретного профиля среднее значение  $\langle A \rangle$  для любой случайной величины *A*:

$$\langle A \rangle = \sum p_i \cdot A_i, \quad (1)$$

где *A<sub>i</sub>* – значение этой величины в *i*-й точке цикла работы; *p<sub>i</sub>* – вероятность *i*-й точки цикла работы.

Через средние механической мощности  $P_{mech} = 2\pi \cdot n \cdot T / 60$  и мощности потерь  $P_{loss}$  выражается средний КПД генератора:

$$\eta_{average} = 1 - \frac{\langle P_{loss} \rangle}{\langle P_{mech} \rangle}. \quad (2)$$

При большом числе точек в профиле вычисление средних по формуле (1) и, в частности, среднего КПД по формулам (1), (2) требует больших вычислительных ресурсов. Поэтому рассмотрим алгоритм построения замещающих профилей, содержащих меньшее число точек.

Будем считать, что скорость  $n(P_{mech})$  вращения и момент  $T(P_{mech})$  данного профиля являются функциями от механической мощности  $P_{mech}$ , определёнными на (непрерывном) интервале допустимых значений мощностей. Если эти зависимости задаются таблично, то значения скорости и момента для произвольной  $P_{mech}$  устанавливаются путём интерполяции. В результате точка с произвольной  $P_{mech}$ , а не только с её табличным значением, оказывается однозначно заданной. Поэтому произвольная случайная величина *A* может также рассматриваться как функция от  $P_{mech}$ .

Пусть функция  $A(P_{mech})$  на интервале  $P_{mech}$  аппроксимирована полиномом:

$$A = a_0 + a_1 \cdot P_{mech} + a_2 \cdot P_{mech}^2 + \dots \quad (3)$$

Операция  $\langle \rangle$  является линейной в том смысле, что

$$\langle \alpha \cdot x + \beta \cdot y \rangle = \alpha \langle x \rangle + \beta \langle y \rangle, \quad (4)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – числа, а *x* и *y* – случайные величины. Из (3) и (4) следует:

$$\langle A \rangle = a_0 + a_1 \cdot \langle P_{mech} \rangle + a_2 \cdot \langle P_{mech}^2 \rangle + \dots \quad (5)$$

Таким образом, если полиномом *n*-й степени достаточно для аппроксимации *A*, то вычисление среднего  $\langle A \rangle$  по исходному профилю можно заменить вычислением того же среднего  $\langle A \rangle$  по замещающему профилю (5), в котором  $\langle P_{mech} \rangle$ ,  $\langle P_{mech}^2 \rangle$  ...  $\langle P_{mech}^n \rangle$  совпадают с этими средними по исходному профилю.

Одной из точек цикла работы, которая обязательно должна быть рассмотрена, является точка с максимальной мощностью, поскольку необходимо рассчитать требуемую мощность AC/DC преобразователя и проверить отсутствие размагничивания магнитов.

Проблема размагничивания актуальна, в первую очередь, для машин, в которых используются низкокоэрцитивные постоянные магниты. Однако в работе [21] показано, что недопустимое размагничивание может иметь место и при использовании высококоэрцитивных «неодим–железо–бор» магнитов, если применяется синхронная машина. Поэтому при проектировании ГПП также необходима такая проверка.

Задание каждой точки с частичной нагрузкой предполагает задание параметра  $P_{mech, i}$ , а также вероятности *p<sub>i</sub>*. Поэтому для вычисления среднего случайной величины *A*, для аппроксимации которой достаточно полинома 2*k*-й степени, достаточно использовать замещающий профиль с *k* точками частичной нагрузки. В частности, значения  $\langle P_{mech} \rangle$ , полученные как по исходной характеристике цикла работы, так и по любому замещающему профилю, содержащему хотя одну точку частичной нагрузки, совпадают.

Уравнения для нахождения 2*k* неизвестных  $p_1 \dots p_k$ ,  $(P_{mech, 1})^i \dots (P_{mech, k})^i$  имеют вид:

$$\sum_{m=1}^k \left[ p_m \cdot P_{mech, m}^i + P_{rated}^i \left( 1 - \sum_{m=1}^k p_m \right) \right] = \langle P_{mech}^i \rangle; i = 1 \dots 2k, \quad (6)$$

где  $P_{rated}$  – механическая мощность в точке с максимальной нагрузкой.

Когда квадратичной аппроксимации достаточно, т. е. в случае замещающего профиля с одной номинальной точкой и одной точкой частичной нагрузки (двухточечного профиля), можно получить простые аналитические решения (6):

$$P_{mech,1} = \frac{P_{rated}^2 - \langle P_{mech}^2 \rangle}{P_{rated} - \langle P_{mech} \rangle} - P_{rated}, \quad (7)$$

$$P_1 = \frac{P_{rated} - \langle P_{mech} \rangle}{P_{rated} - P_{mech,1}}. \quad (8)$$

В случае аппроксимации четверной степени (трехточечного профиля), решение нелинейных уравнений (6) может быть найдено любым методом из известных, например, методом Ньютона.

После нахождения механических мощностей в точках частичной нагрузки замещающего профиля скорости и моменты в этих точках определяются при помощи функциональных зависимостей  $n(P_{mech})$  и  $T(P_{mech})$ .

#### Пример расчета замещающих профилей, содержащих 2 и 3 рабочих точки

В данной работе в качестве примера рассматривается турбина, описанная в [14]. В работе [14] приводится механическая мощность, а также скорость вращения турбины в 9 точках, соответствующих скоростям ветра от 4 до 12 м/с. Пусть средняя скорость ветра 7 м/с. Для описания годового распределения скорости ветра широко используются статистические распределения Релея и Вейбулла [15], [22]. В данной работе было сделано допущение, что вероятность появления определенной скорости ветра соответствует распределению Релея, и что генератор работает при скоростях ветра в диапазоне от 4 до 12 м/с.

Чтобы совместить непрерывное распределение Релея с дискретными данными рабочего цикла (табл. 1), оно также было дискретизировано, т. е. считалось, что скорость ветра принимает целые значения м/с, вероятность той или иной скорости ветра равна плотности вероятности распределения Релея. Столбец  $p_i$  табл. 1 указывает на условную вероятность, когда скорость ветра находится в допустимых пределах.

Найдем двухточечный и трехточечный замещающие профили. Требуемые средние величины, найденные по исходному профилю, приведены в табл. 2. Механические мощности в точках частичной нагрузки и вероятности находятся по формулам (6)–(8). На рис. 3 с помощью символа «♦» показаны моменты и механические мощности в 9 точках исходного профиля. Также показан кубический полином, аппроксимирующий эту зависимость. С помощью аппроксимации этой зависимости находятся моменты, а затем скорости, соответствующие механическим мощностям двухточечного и трехточечного замещающих профилей (табл. 3, 4).

Двухточечный профиль приводится в табл. 3, а трехточечный – в табл. 4.

**Таблица 1.** Исходная девятиточечная характеристика цикла работы ветротурбины

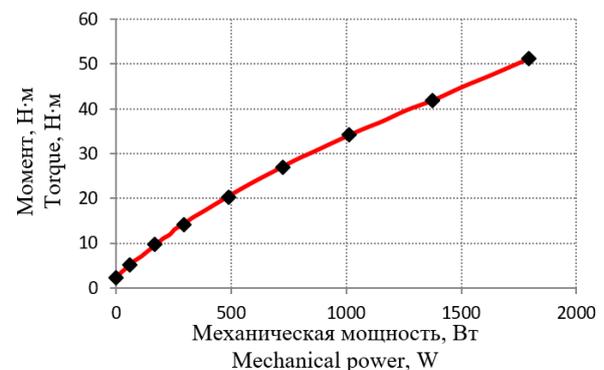
**Table 1.** Operating points of the wind turbine (initial 9-point profile)

Точка рабочего цикла, $i$ Operating mode, $i$	$V_i$ , м/с (m/s)	$n_i$ , об/мин (rpm)	$P_{mech,i}$ Вт (W)	$T_i$ , Н·м (N·m)	$p_i$
1	4	111	82	7,02	0,134
2	5	140	142	9,69	0,144
3	6	163	237	13,87	0,146
4	7	196	362	17,59	0,138
5	8	221	542	23,41	0,124
6	9	247	761	29,41	0,107
7	10	276	1038	35,88	0,087
8	11	308	1383	42,85	0,069
9	12	332	1784	51,38	0,051

**Таблица 2.** Средние значения механической мощности

**Table 2.** Average values of the mechanical power

$\langle P_{mech} \rangle$ , Вт (W)	$\langle P_{mech}^2 \rangle$ , Вт <sup>2</sup> (W <sup>2</sup> )	$\langle P_{mech}^3 \rangle$ , Вт <sup>3</sup> (W <sup>3</sup> )	$\langle P_{mech}^4 \rangle$ , Вт <sup>4</sup> (W <sup>4</sup> )
541,9	5,177E+05	6,472E+08	9,228E+11



**Рис. 3.** Момент ветряной турбины

**Fig. 3.** Wind turbine torque

**Таблица 3.** Двухточечный замещающий профиль

**Table 3.** 2-point substituting profile

Точка рабочего цикла, $i$ Operating mode, $i$	$n_i$ , об/мин (rpm)	$P_{mech,i}$ Вт (W)	$T_i$ , Н·м (N·m)	$p_i$
1	193,6	361,6	17,84	0,873
2	331,6	1784,3	51,38	0,127

**Таблица 4.** Трехточечный замещающий профиль

**Table 4.** 3-point substituting profile

Точка рабочего цикла, $i$ Operating mode, $i$	$n_i$ , об/мин (rpm)	$P_{mech,i}$ Вт (W)	$T_i$ , Н·м (N·m)	$p_i$
1	161	206,3	12,24	0,623
2	268,1	952,3	33,92	0,311
3	331,6	1784,3	51,38	0,066

#### Процедура оптимизации генератора

На рис. 4 изображены основные геометрические размеры ГПП. В табл. 5 приведены параметры ГПП, зафиксированные в ходе оптимизации. Здесь и далее угловые размеры статора приводятся в единицах зубцового деления статора  $t_s=360/24=15^\circ$ , угловые размеры ротора приводятся в единицах зубцового деления ротора  $t_r=360/22=16,36^\circ$ . Параметры ГПП, кото-

рые варьировались в ходе оптимизации, и их начальные значения приведены в табл. 6.

При векторном управлении задание по вектору тока статора формируется в системе координат, вращающейся синхронно с ротором [23].

Под «углом тока» понимается угол между магнитной осью фазы  $A$  и согласованным положением ротора: если один из зубцов ротора находится точно над серединой зубца статора, обмотанного фазой  $A$ , и ток фазы  $A$  принимает максимальное значение, то при небольших токах достигается максимально возможное при данном модуле тока значение момента. Такое положение вектора тока относительно ротора будем характеризовать нулевым углом. Однако при увеличении тока с нулевым углом увеличивается реактивная мощность, что приводит к необходимости выбора более мощного АС/DC преобразователя. Увеличивается насыщение, что приводит к снижению КПД и момента, по сравнению с величинами КПД и момента, которые могли бы быть достигнуты при неизменном уровне насыщения. Изменение угла тока относительно нулевого положения в системе координат, связанной с ротором, позволяет смягчить эти явления. Поэтому угол тока задавался пропорциональным механической мощности генератора, и дополнительным параметром оптимизации являлся угол тока при максимальной нагрузке генератора.

Таким образом, под «ослаблением поля» понимается изменение угла тока относительно нулевого положения в системе координат, связанной с ротором. Выполняется такое «ослабление поля» для уменьшения приращения величины тока статора при возрастании момента генератора.

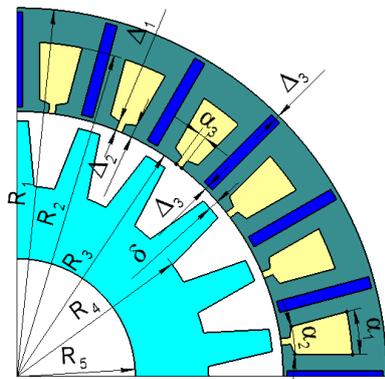


Рис. 4. Параметры оптимизации  
 Fig. 4. Optimization parameters

Многокритериальная оптимизация лучше всего подходит для проектирования электрических машин для реального приложения [24]. Некоторые методы оптимизации предназначены для расчета кривой Парето, которая является множеством решений, для которых ни один из целевых параметров оптимизации не может быть улучшен без ухудшения величин других целевых параметров. В этом случае инженер выбирает одно из решений, принадлежащих кривой Парето, исходя из требований и ограничений решаемой задачи.

Таблица 5. Постоянные параметры ГПП

Table 5. Parameters of the flux switching generator, constant during the optimization

Параметр Parameter	Значение Value
Внешний радиус статора $R_1$ , мм Outer radius of the stator $R_1$ , mm	80
Воздушный зазор $\delta$ , мкм Air gap $\delta$ , $\mu\text{m}$	350
Глубина паза ротора ( $R_3 - \delta - R_4$ ), мм Depth of the rotor slot ( $R_3 - \delta - R_4$ ), mm	9
Толщина ярма ротора ( $R_4 - R_5$ ), мм Width of the rotor yoke ( $R_4 - R_5$ ), mm	5
Толщина ребер статора $\Delta_3$ , мкм Width of the stator ribs $\Delta_3$ , $\mu\text{m}$	500
Остаточная индукция магнитов, Т Remanent flux density of the permanent magnets, Т	1,2
Угловой размер шлица паза статора $\alpha_3$ , $t_s$ Angular size of the stator slot opening $\alpha_3$ , $t_s$	0,162
Длина магнитопроводов ротора и статора $L$ , мм Length of magnetic cores of the rotor and the stator, mm	100

Таблица 6. Параметры ГПП, изменяемые в ходе оптимизации

Table 6. Parameters of the flux switching generator, changed during optimization

Параметр Parameter	Значение Value
Радиус дна паза статора $R_2$ , мм Radius of the stator slot bottom $R_2$ , mm	74
Внутренний радиус статора $R_3$ , мм Inner radius of the stator $R_3$ , mm	61,7
Угловой размер паза статора $\alpha_1$ , $t_s$ Angular size of the stator slot $\alpha_1$ , $t_s$	0,45
Угловой размер паза статора $\alpha_2$ , $t_s$ Angular size of the rotor slot $\alpha_2$ , $t_s$	0,5
Толщина магнитов, мм Width of the permanent magnets, mm	2
Угловой размер поверхности зубца ротора, обращенной к зазору, $t_r$ Angular size of the rotor tooth surface facing the air gap, $t_r$	0,265
Угол тока при максимальной нагрузке генератора, электрических радиан Current angle at the maximum generator power, electrical radians	0,1

Другой подход к многокритериальной оптимизации может быть реализован на базе однокритериальных методов. В этом случае при составлении оптимизационной функции должны быть применены весовые коэффициенты, определяющие важность отдельных целевых параметров. При этом возможно использование как поощряющих, так и штрафующих коэффициентов [25].

Таким образом, при любом подходе к оптимизации важность отдельных целевых параметров должна быть определена либо в начале, либо в конце оптимизационной процедуры.

В данной работе на выбор оптимизационного алгоритма повлияли гладкость целевой функции и наличие вычислительной ошибки, возникающей из-за конечного числа рассматриваемых граничных задач при повороте ротора, а также из-за конечного размера элементов сетки. Эти факторы создают псевдослучайную ошибку, которую трудно предсказать. Величины целевой функции, вычисленные с помощью МКЭ, оказываются зашумлены, и градиентные мето-

ды, применяемые обычно для гладких функций с малым числом экстремумов, не могут быть применены [19, 20].

Для преодоления этой трудности в данной работе используется метод Нелдера–Мида. Это безградиентный метод безусловной оптимизации функции нескольких переменных, который может быть успешно применен в случае негладких и/или зашумлённых функций. Метод широко используется для нелинейной оптимизации и хорошо подходит для задач, в которых производные функций неизвестны. В большинстве случаев метод Нелдера–Мида требует 1–2 вычислений целевой функции за 1 итерацию, что позволяет сократить число вычислений целевой функции при нахождении экстремума [19, 20].

Используется следующая целевая функция оптимизации:

$$F = K_1 \cdot K_2^2 \cdot K_3^{0.5}, \quad (8)$$

где  $K_1$ ,  $K_2$  and  $K_3$  – целевые параметры (критерии) оптимизации:  $K_1 = \langle P_{loss} \rangle$  применяется для увеличения КПД, ГВЭ генератора  $K_2$  соответствует необходимой мощности электронного преобразователя:

$$K_2 = 3 \frac{I_{ampl, rated} U_{DC, rated}}{\sqrt{2} \sqrt{6}}, \quad (9)$$

где  $I_{ampl, rated}$  и  $U_{DC, rated}$  – требуемые ток и напряжение АС/DC преобразователя при максимальной мощности генератора ( $T=100\%$ ,  $n=100\%$ ).

Величину мощности АС/DC преобразователя (9) необходимо добавить в критерий оптимизации (8), поскольку в противном случае полученный коэффициент мощности генератора может быть низким, что негативно отразится на стоимости DC/АС преобразователя.

В данной статье предполагается, что генератор работает на управляемый выпрямитель (АС/DC преобразователь) с IGBT-транзисторами, с широтно-импульсной модуляцией тока, система управления которого использует обратные связи по фазным то-

кам и позиции ротора генератора [16, 17]. В этом случае генератор формирует несинусоидальное напряжение, однако ток генератора поддерживается близким к синусоидальному.

Коэффициент  $K_3 = L \cdot (h_{mag} + 0,001 \cdot m) \cdot (R_1 - R_2)$  представляет объем постоянных магнитов и используется для снижения стоимости магнитов; константа 0,001 м учитывает, что цена за единицу объема для тонких магнитов больше, чем для более толстых [26].

#### Исследование исходной конструкции генератора

На рис. 5 показано распределение магнитной индукции ГПП (конструкция до оптимизации). Благодаря эффекту концентрации потока магнитная индукция достигает значения 2 Тесла не только в ребрах, но и в некоторых зубцах статора. Таким образом, задача расчёта ГПП является крайне нелинейной, и возможность аппроксимации зависимости потерь от механической мощности полиномами низких степеней является неочевидной.

В табл. 7 приводятся величины потерь для отдельных точек 2-, 3- и 9-точечного профилей, а также средние величины потерь ГПП. Механические потери были приняты равными  $(3 \text{ Вт}) \cdot (n/n_{rated} + [n/n_{rated}]^3)$ . Средние потери по двухточечному и девятиточечному профилю практически совпадают (различие менее 0,03 Вт). Средние потери по трехточечному профилю отличаются от последних на 0,1 Вт. Чтобы убедиться, что совпадение численных значений средних потерь не случайно, на рис. 6, А символом «♦» показаны точки 9-точечного профиля, а также парабола (квадратный трехчлен), аппроксимирующая эти точки. Эта же парабола показана на рис. 6, Б. На рис. 6, Б символом «●» показаны точки двухточечного профиля. Символом «+» показаны точки трехточечного профиля. Из рис. 6 видно, что все точки хорошо аппроксимируются данной параболой. Поэтому в этой работе оптимизация выполнена с использованием двухточечного замещающего профиля.

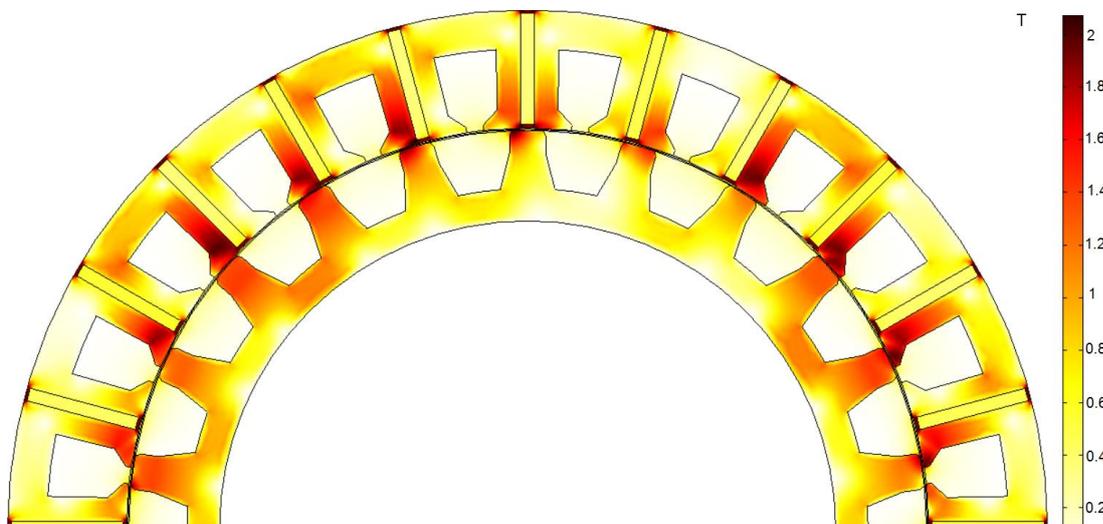


Рис. 5. Распределение магнитной индукции исходной конструкции генератора с переключением потока  
 Fig. 5. Flux density plot of the initial flux switching generator design

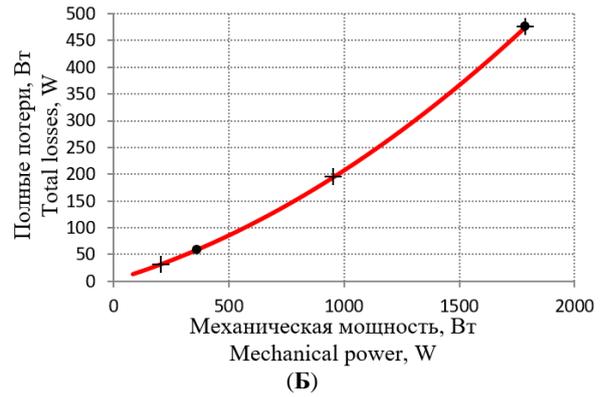
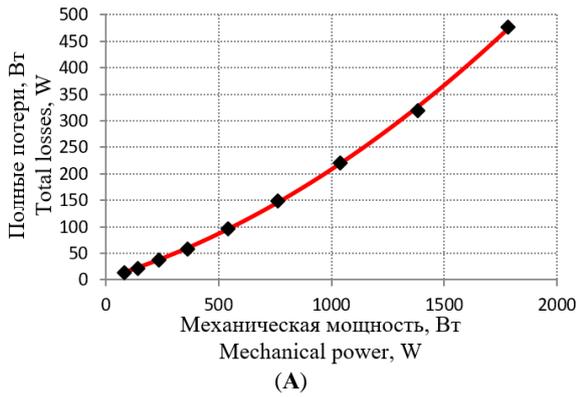


Рис. 6. Рассчитанные потери исходной конструкции генератора с переключением потока и их аппроксимация полиномом второго порядка

Fig. 6. Calculated losses of the initial flux switching generator design and their approximation with quadric polynomial

Таблица 7. Рассчитанные потери исходной конструкции генератора с переключением потока

Table 7. Calculated losses of the initial design of the flux switching generator

Точка рабочего цикла, $i$ Operating mode, $i$	Потери, Вт/Power losses, W		
	2-т. профиль 2-mode profile	3-т. профиль 3-mode profile	9-т. профиль 9-mode profile
1	58,9	31,4	13,3
2	476,6	196,5	21,7
3	–	476,6	37,8
4	–	–	57,8
5	–	–	96,1
6	–	–	148,1
7	–	–	220,1
8	–	–	319,3
9	–	–	476,6
$\langle P_{loss} \rangle$	112	112,1	112

#### Результаты оптимизации

В данной работе выполнена оптимизация, в соответствии с критерием (8), по двухточечному замещающему профилю. На рис. 7 показана геометрия опти-

мизированной конструкции ГПП и магнитная индукция при максимальной мощности генератора. По сравнению с рис. 5 магнитная индукция величиной 2Т не достигается, за исключением рёбер статора. Уменьшилась толщина ярем статора  $R_1-R_2$ . Ширина зубцов у основания сузилась. Ширина зубцов статора увеличивается ближе к зазору.

Рис. 8 поясняет закономерность этих результатов. Когда зубец ротора находится над половиной зубца статора, магнитный поток, втекающий в эту половину и представленный линиями магнитного поля 1, 2, 3, 4, замыкается через ярма и раздваивается на потоки 1, 2 и 3, 4. Для проведения таких потоков достаточно толщина ярма, примерно равная половине от половины зубца статора. Кроме того, поток 1, 2 равномерно вдоль магнита переходит на вторую часть магнитопровода зубца и практически полностью ослабляется у основания зубца. Поэтому толщина стали зубца, расположенная по одну сторону магнита, примерно равна толщине ярма. Поток в зубце, обусловленный пазовым рассеянием, меньше у основания паза, что также способствует трапецевидной форме зубца.

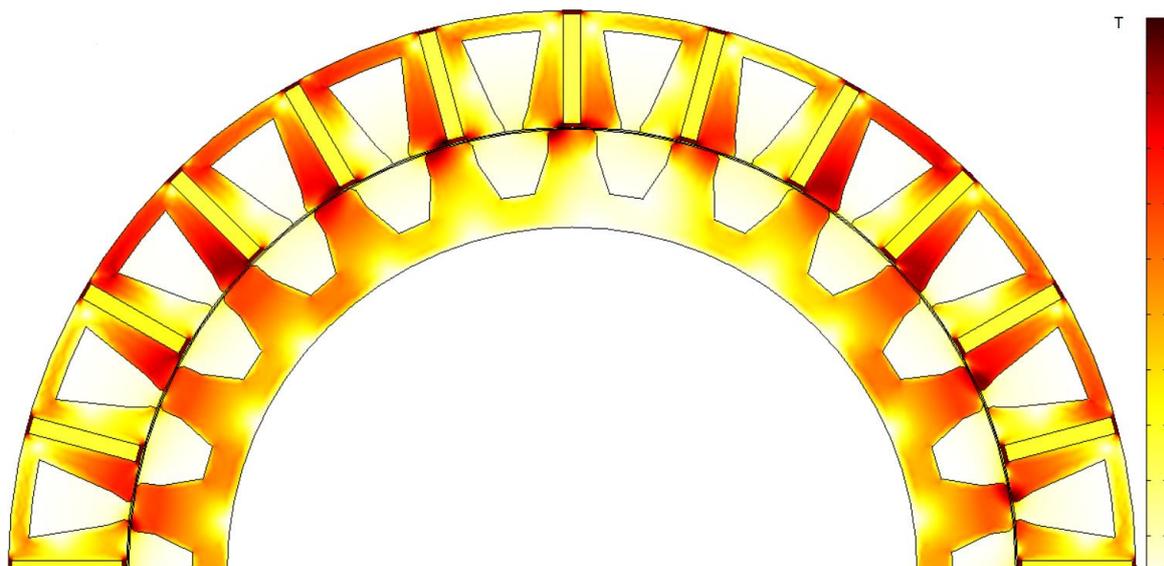


Рис. 7. Распределение магнитной индукции оптимизированной конструкции генератора с переключением потока

Fig. 7. Flux density plot of the optimized flux switching generator design

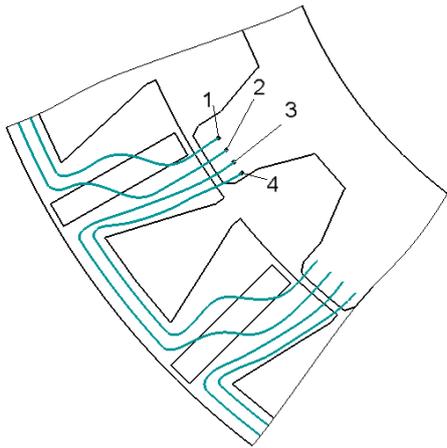


Рис. 8. Пути протекания магнитного потока в генераторе с переключением потока

Fig. 8. Flux flow in flux switching generator

Как упомянуто выше, зависимость  $P_{loss}(P_{mech})$  в начальном приближении хорошо описывается квадратным трехчленом. Чтобы убедиться в том, что потери в оптимальной конструкции ГПП также хорошо описываются квадратным трехчленом, для оптимальной конструкции был выполнен расчёт по 3- и 9-точечным профилям.

Потери в различных точках цикла работы приведены в табл. 8. Хотя различия в результатах расчёта средних потерь для оптимизированной конструкции больше, чем для начального приближения, результаты расчётов все же оказываются очень близкими к друг другу. Рис. 9 аналогичен рис. 6 и демонстрирует, что квадратичная аппроксимация зависимости потерь от механической мощности для оптимизированной

конструкции довольно точна, что подтверждает справедливость оптимизации по двухточечному профилю.

В табл. 9 изображены основные параметры ГПП до и после оптимизации.

Поскольку многокритериальная оптимизация должна обеспечить компромисс между величинами отдельных целевых параметров, уменьшение одного из них происходит за счет увеличения других. В результате оптимизации потери уменьшились на 30 %, что соответствует увеличению КПД на 6 %. Требуемая мощность преобразователя уменьшилась на 10 %. Однако это потребовало увеличения значения целевого параметра  $K_3$  на 4 %, что соответствует увеличению массы магнитов на 10 %. При этом общая масса активных материалов машины снизилась. Также снижались пульсации момента и момент страгивания.

Таблица 8. Рассчитанные потери оптимизированной конструкции генератора с переключением потока

Table 8. Calculated losses of the optimized design of the flux switching generator

Точка рабочего цикла, $i$ Operating mode, $i$	Потери, Вт/Power losses, W		
	2-т. профиль 2-mode profile	3-т. профиль 3-mode profile	9-т. профиль 9-mode profile
1	46,5	27,6	13,6
2	302,2	135,1	20,4
3	–	302,2	31,7
4	–	–	46
5	–	–	71,1
6	–	–	104,5
7	–	–	149,9
8	–	–	210,8
9	–	–	302,2
$\langle P_{loss} \rangle$	79	79,2	78,8

Таблица 9. Основные параметры ГПП до и после оптимизации

Table 9. The main parameters of the flux switching generator before and after optimization

Параметр Parameter	Величина/Value	
	До оптимизации Before optimization	После оптимизации After optimization
Радиус дна паза статора $R_2$ , мм/Radius of the stator slot bottom $R_2$ , mm	74	77,2
Внутренний радиус статора $R_3$ , мм/Inner radius of the stator $R_3$ , mm	61,7	63,3
Угловой размер паза статора $\alpha_1$ , $t_s$ /Angular size of the stator slot $\alpha_1$ , $t_s$	0,45	0,28
Угловой размер паза статора $\alpha_2$ , $t_r$ /Angular size of the rotor slot $\alpha_2$ , $t_r$	0,5	0,558
Толщина магнитов, мм/Width of the permanent magnets, mm	2	2,41
Угловой размер поверхности зубца ротора, обращенной к зазору, $t_r$ Angular size of the rotor tooth surface facing the air gap, $t_r$	0,265	0,324
Угол тока при максимальной нагрузке генератора, электрических радиан Current angle at the maximum generator power, electrical radians	0,1	0,086
Средние потери $K_1$ , Вт/Average losses $K_1$ , W	112	78,8
КПД по девятиточечному профилю, % Average efficiency when applying the nine-mode profile, %	79,4	85,5
Требуемая номинальная мощность AC/DC преобразователя $K_2$ , Вт Required rated power of the AC/DC converter ( $K_2$ ), W	1973	1767
$K_3=L \cdot (h_{mag}+0,001 \cdot m) \cdot (R_1-R_3)$ , $m^3$	$5,478 \times 10^{-6}$	$5,71 \times 10^{-6}$
Полные пульсации момента при максимальной мощности генератора, % Torque ripple at the maximum generator power, %	1,6	1,3
Момент страгивания, Н·м/Cogging torque, N·m	0,6	0,43
Масса магнитов, кг/Weight of the permanent magnets, kg	0,613	0,674
Масса меди, кг/Weight of the copper, kg	1	1,06
Масса стали статора, кг/Weight of the stator magnetic core, kg	3,88	3,26
Масса стали ротора, кг/Weight of the rotor magnetic core, kg	2,17	2,46
Целевая функция $F$ , $Вт^3 \cdot м^{3/2}$ /Objective function $F$ , $W^3 \cdot m^{3/2}$	1881	1087
Масса активных материалов, кг/Weight of the active materials, kg	7,66	7,45

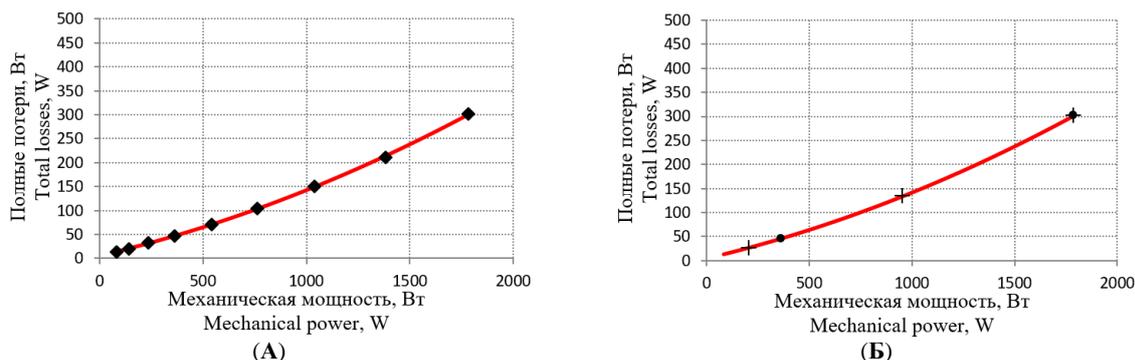


Рис. 9. Рассчитанные потери оптимизированной конструкции генератора с переключением потока и их аппроксимация полиномом второго порядка

Fig. 9. Calculated losses of the optimized flux switching generator design and their approximation with quadric polynomial

### Заключение

Описана процедура оптимизации безредукторного генератора с переключением потока (ГПП) для ветряной турбины. Средние потери, требуемая мощность преобразователя и параметр  $K_3$ , учитывающий стоимость постоянных магнитов, были выбраны в качестве критериев оптимизации. Целевой параметр  $K_3$  выбран так, чтобы учесть, что тонкие магниты являются более дорогостоящими, чем более толстые.

Для снижения вычисленных затрат при оптимизации предложен метод расчета замещающих профилей. 2- и 3-точечные профили были составлены на основе исходного 9-ти точечного профиля. Потери ГПП, вычисленные с помощью 2-, 3- и 9-точечных профилей, совпадают с большой точностью, что позволяет использовать для оптимизационных расчетов профиль с меньшим количеством точек.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григораш О.В., Кривошей А.А., Смык В.В. Автономные гибридные электростанции // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2014. – № 10. – С. 1–12.
2. Li H., Chen Z. Overview of different wind generator systems and their comparisons // IET Renewable Power Generation. – 2007. – V. 2. – № 5. – P. 123–138. DOI: 10.1049/iet-rpg:20070044.
3. Energy cost estimation of small wind power systems – an integrated approach / S. Xu, R. Shao, L. Chang, C. Church // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. – 2015. – V. 3. – № 4. – P. 945–956. DOI: 10.1109/JESTPE.2015.2444398.
4. Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines / H. Polinder, F. Pijl, G. Vilder, P. Tavner // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2006. – V. 21. – № 3. – P. 725–733. DOI: 10.1109/TEC.2006.875476.
5. Optimal design of direct-driven PM wind generator for maximum annual energy production / S. Jung, H. Jung, S. Hahn, H.K. Jung, C. Lee // IEEE Transactions on Magnetics. – 2008. – V. 44. – № 6. – P. 1318–1338. DOI: 10.1109/TMAG.2007.916250.
6. Optimal design of permanent magnet synchronous generator for wind energy conversion considering annual energy input and magnet volume / J. Faiz, B. Ebrahimi, M. Rajabi-Sebdani, A. Khan // Proc. of 2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply. – Nanjing, China, April 6–7, 2009. – P. 1–6. DOI: 10.1109/SUPERGEN.2009.5348100.
7. Isfahani A., Boroujerdi A., Hasanzadeh S. Multi-objective design optimization of a large-scale direct-drive permanent magnet generator for wind energy conversion systems // Frontiers in Energy. 2014. – V. 8. – № 2. – P. 182–191. DOI: 10.1007/s11708-014-0320-z.

Поскольку многокритериальная оптимизация должна обеспечить компромисс между величинами отдельных целевых параметров, уменьшение одного из них может произойти за счет увеличения других. В результате оптимизации потери уменьшились на 30 %, что соответствует увеличению КПД на 6 %. Требуемая мощность преобразователя уменьшилась на 10 %. Однако это потребовало увеличения значения целевого параметра  $K_3$  на 4 %, что соответствует увеличению массы магнитов на 10 %. При этом общая масса активных материалов машины снизилась. Также снизились зубцовые и полные пульсации момента.

В процессе оптимизации были найдены некоторые предпочтительные геометрические особенности конструкции ГПП, среди них – трапециевидальная форма зубца статора, толщина которого уменьшается ближе к основанию.

Результаты работы получены при поддержке средствами МОН РФ, задание № 8.9549.2017/8.9.

8. Vahedi A., Meo S., Zohoori A. An AHP-based approach for design optimization of flux-switching permanent magnet generator for wind turbine applications // International Transactions on Electrical Energy Systems. 2016. – V. 26. – № 1. – P. 1318–1338. DOI: 10.1002/etep.2149.
9. A new outer-rotor flux switching permanent magnet generator for wind farm applications / A. Zohoori, A. Vahedi, M. Noroozi, S. Meo // Wind Energy. – 2017. – V. 20. – № 1. – P. 3–17. DOI: 10.1002/we.1986.
10. Soleimani J., Ejlali A., Moradkhani M. Flux switching permanent magnet generator design and optimization using response surface methodology // Periodicals of Engineering and Natural Sciences. – 2019. – V. 7. – № 1. – P. 54–66. DOI: dx.doi.org/10.21533/pen.v7i1.231.g215.
11. Design of a flux-switching electrical generator for wind turbine systems / J. Ojeda, M. Simões, G. Li, M. Gabsi // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2012. – V. 48. – № 6. – P. 1808–1816. DOI: 10.1109/TIA.2012.2221674.
12. Конечноэлементная модель электрической машины с переключением потока для исследования динамических режимов работы / В.А. Дмитриевский, В.А. Прахт, Ф.Н. Сарапулов, В.А. Климарев // Электротехника. – 2012. – № 3. – С. 7–13.
13. Low cost flux-switching brushless AC machines / J. Chen, Z. Zhu, S. Iwasaki, R. Deodhar // Proc. of 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. – Lille, France, September 1–3, 2010. – P. 1–6. DOI: 10.1109/VPPC.2010.5728984.
14. Anandavel P., Rajambal K., Chellamuthu C. Power optimization in a grid-connected wind energy conversion system // Proc. of 2005 International Conference on Power Electronics and Drives Systems. – Kuala Lumpur, Malaysia, November 28 – December 1, 2005. – P. 1617–1621. DOI: 10.1109/PEDS.2005.1619947.
15. Pishgar-Komleh S., Keyhani A., Sefeedpari P. Wind speed and power density analysis based on Weibull and Rayleigh

- distributions (a case study: Firouzkooch county of Iran) // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015. – V. 42. – № 1. – P. 313–322. DOI: doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.028a.
16. Akuru U., Kamper M. Intriguing behavioral characteristics of rare-earth-free flux switching wind generators at small- and large-scale power levels // IEEE Transactions on Industry Applications. 2018. – V. 54. – № 6. – P. 5772–5782. DOI: 10.1109/TIA.2018.2848979
17. Analysis of electromagnetic performance of flux-switching permanent-magnet machines by nonlinear adaptive lumped parameter magnetic circuit model / Z. Zhu, Y. Pang, D. Howe, S. Iwasaki, R. Deodhar, A. Pride // IEEE Transactions on Magnetics. 2005. – V. 41. – № 11. – P. 4277–4287. DOI: 10.1109/TMAG.2005.854441
18. Wang Y., Deng Z. A position sensorless method for direct torque control with space vector modulation of hybrid excitation flux-switching generator // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2012. – V. 27. – № 4. – P. 912–921. DOI: 10.1109/TEC.2012.2210718
19. Dmitrievskii V., Prakht V., Kazakbaev V. IE5 energy-efficiency class synchronous reluctance motor with fractional slot winding // IEEE Transactions on Industry Applications. 2019. – V. 55. – № 5. – P. 4676–4684. DOI: 10.1109/TIA.2019.2924405.
20. Dmitrievskii V., Prakht V., Kazakbaev V. Optimal design of a high-speed single-phase flux reversal motor for vacuum cleaners // Energies. – 2018. – V. 11. – № 12. – P. 1–13. DOI: 10.3390/en11123334.
21. Ruoho S., Dlala E., Arkkio A. Comparison of demagnetization models for finite-element analysis of permanent-magnet synchronous machines // IEEE Transactions on Magnetics. – 2007. – V. 43. – № 11. – P. 3964–3968. DOI: 10.1109/TMAG.2007.906749
22. Efficiency calculation of wind turbine generation system with doubly-fed induction generator / R. Takahashi, H. Ichita, J. Tamura, M. Kimura, M. Ichinose, M. Futami, K. Ide // Proc. of XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM 2010). – Rome, Italy, September 6–8, 2010. – P. 1–4. DOI: 10.1109/ICELMACH.2010.56083.
23. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2008. – 298 с.
24. Cupertino F., Pellegrino G., Gerada C. Design of synchronous reluctance machines with multiobjective optimization algorithms // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2014. – V. 50. – № 6. – P. 3617–3627. DOI: 10.1109/ECCE.2013.6646934.
25. Kamper M., Merwe F., Williamson S. Direct finite element design optimization of the cageless reluctance synchronous machine // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 1996. – V. 11. – № 3. – P. 547–555. DOI: 10.1109/60.537006.
26. Chen Yang. NdFeB magnets, price list of standard block magnets. URL: <http://www.ndfeb magnets.de/CY-PriceList-NdFeB-Block.pdf> (дата обращения 09.01.2020).

Поступила 31.08.2019.

#### Информация об авторах

**Практ В.А.**, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электротехнологических систем Уральского Энергетического Института Уральского Федерального Университета.

**Дмитриевский В.А.**, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электротехнологических систем Уральского Энергетического Института Уральского Федерального Университета.

**Казакбаев В.М.**, кандидат технических наук, младший научный сотрудник кафедры электротехники и электротехнологических систем Уральского Энергетического Института Уральского Федерального Университета.

UDC 621.313.322

## OPTIMIZATION OF GEARLESS FLUX SWITCHING MACHINE DESIGN FOR WIND GENERATOR SYSTEMS

**Vladimir A. Prakht**<sup>1</sup>,  
va.prakht@urfu.ru

**Vladimir A. Dmitrievskii**<sup>1</sup>,  
vladimir.dmitrievsky@urfu.ru

**Vadim M. Kazakbaev**<sup>1</sup>,  
vadim.kazakbaev@urfu.ru

<sup>1</sup> Ural Federal University,  
19, Mira street, Ekaterinburg, 620002, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the increasing need for autonomous hybrid power plants using renewable sources to reduce the consumption of fossil fuels. Improving the performance and reducing the cost of gearless wind generators used in such power plants will contribute to improvement of technical and economic characteristics of the plants.

**The main aim** of the research includes the elaboration of an effective approach for optimizing the flux switching generator for gearless wind turbines, which reduces the use of computing resources, in comparison with existing approaches; elaboration of recommendations for the design of the flux switching wind generator with permanent magnets on the stator; improving the initial design of the generator.

**Objects** of the research are the mathematical model and the design of flux switching generator with permanent magnets on the stator.

**Methods:** assessment and analysis of wind speed data worldwide; derivative-free optimization method; finite element method; mathematical modeling; statistical methods.

**Results.** The multicriteria optimization of the design of a gearless wind flux switching generator was carried out. As a result, the generator efficiency was increased, its torque ripple and the rated power of the electronic converter of the wind turbine system were reduced. General recommendations regarding the geometry are obtained which can be used for designing similar flux switching generators. A method is proposed for construction of substituting profiles of the operating characteristics of wind turbines, which can be used to reduce computational effort during the optimization. The computational cost reduction using the obtained method is demonstrated using the example of replacing the original nine-point working profile of a wind turbine with a substituting two-point one.

### Key words:

Autonomous hybrid power plants, direct driven generators, wind generators, wind power, renewable energy sources, permanent magnet generators, optimal design, switching flux machine, energy efficiency.

The research was conducted on theme no. 8.9549.2017/8.9 within the frame of the government task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation in R&D.

### REFERENCES

1. Grigorash O.V., Krivoshey A.A., Smyk V.V. Autonomous hybrid power plants. *Avtonomnyye gibridnyye elektrostantsii. Scientific Journal of Kuban state agrarian University*, 2014, no. 10, pp. 1–12. In Rus.
2. Li H., Chen Z. Overview of different wind generator systems and their comparisons. *IET Renewable Power Generation*, 2007, vol. 2, no. 2, pp. 123–138. DOI: 10.1049/iet-rpg:20070044.
3. Xu S., Shao R., Chang L., Church C. Energy cost estimation of small wind power systems – an integrated approach. *EEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2015, vol. 3, no. 4. DOI: 10.1109/JESTPE.2015.2444398.
4. Polinder H., Pijl F., Vilder G., Tavner P. Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2006, vol. 21, no. 3, pp. 725–733. DOI: 10.1109/TEC.2006.875476.
5. Jung S., Jung H., Hahn S., Jung H., Lee C. Optimal design of direct-driven PM wind generator for maximum annual energy production. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2008, vol. 44, no. 6, pp. 1318–1338. DOI: 10.1109/TMAG.2007.916250.
6. Faiz J., Ebrahimi B., Rajabi-Sebdani M., Khan A. Optimal design of permanent magnet synchronous generator for wind energy conversion considering annual energy input and magnet volume. *Proc. of 2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*. Nanjing, China, 6–7 April 2009. pp. 1–6. DOI: 10.1109/SUPERGEN.2009.5348100.
7. Isfahani A., Boroujerdi A., Hasanzadeh S. Multi-objective design optimization of a large-scale direct-drive permanent magnet generator for wind energy conversion systems. *Frontiers in Energy*, 2014, vol. 8, no. 2, pp. 182–191. DOI: 10.1007/s11708-014-0320-z.
8. Vahedi A., Meo S., Zohoori A. An AHP-based approach for design optimization of flux-switching permanent magnet generator for wind turbine applications. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2016, vol. 26, no. 1, pp. 1318–1338. DOI: 10.1002/etep.2149.
9. Zohoori A., Vahedi A., Noroozi M., Meo S. A new outer-rotor flux switching permanent magnet generator for wind farm applications. *Wind Energy*, 2017, vol. 20, no. 1, pp. 3–17. DOI: 10.1002/we.1986.
10. Soleimani J., Ejlali A., Moradkhani M. Flux switching permanent magnet generator design and optimization using response surface methodology. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 2019, vol. 7, no. 1, pp. 54–66. DOI: dx.doi.org/10.21533/pen.v7i1.231.g215.
11. Ojeda J., Simões M., Li G., Gabsi M. Design of a flux-switching electrical generator for wind turbine systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2012, vol. 48, no. 6, pp. 1808–1816. DOI: 10.1109/TIA.2012.2221674.
12. Dmitrievskii V., Prakht V., Sarapulov F., Klimarev V. A finite element model of electric machine with flux switching-over for studying the dynamic operation modes. *Russian Electrical Engineering*, 2012, vol. 83, no. 2, pp. 126–131. DOI: doi.org/10.3103/S1068371212030042.
13. Chen J., Zhu Z., Iwasaki S., Deodhar R. Low cost flux-switching brushless AC machines. *Proc. of 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. Lille, France, 1–3 Sept. 2010. pp. 1–6. DOI: 10.1109/VPPC.2010.5728984.

14. Anandavel P., Rajambal K., Chellamuthu C. Power optimization in a grid-connected wind energy conversion system. *Proc. of 2005 International Conference on Power Electronics and Drives Systems*. Kuala Lumpur, Malaysia, 28 Nov. – 1 Dec. 2005. DOI: 10.1109/PEDS.2005.1619947.
15. Pishgar-Komleh S., Keyhani A., Sefeedpari P. Wind speed and power density analysis based on Weibull and Rayleigh distributions (a case study: Firouzkooh county of Iran). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 42, no. 1, pp. 313–322. DOI: doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.028a.
16. Akuru U., Kamper M. Intriguing behavioral characteristics of rare-earth-free flux switching wind generators at small- and large-scale power levels. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2018, vol. 54, no. 6, pp. 5772–5782. DOI: 10.1109/TIA.2018.2848979.
17. Zhu Z., Pang Y., Howe D., Iwasaki S., Deodhar R., Pride A. Analysis of electromagnetic performance of flux-switching permanent-magnet machines by nonlinear adaptive lumped parameter magnetic circuit model. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2005, vol. 41, no. 11, pp. 4277–4287. DOI: doi.org: 10.1109/TMAG.2005.854441.
18. Wang Y., Deng Z. A position sensorless method for direct torque control with space vector modulation of hybrid excitation flux-switching generator. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2012, vol. 27, no. 4, pp. 912–921. DOI: 10.1109/TEC.2012.2210718.
19. Dmitrievskii V., Prakht V., Kazakbaev V. IE5 energy-efficiency class synchronous reluctance motor with fractional slot winding. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2019, vol. 55, no. 5, pp. 4676–4684. DOI: 10.1109/TIA.2019.2924405.
20. Dmitrievskii V., Prakht V., Kazakbaev V. Optimal design of a high-speed single-phase flux reversal motor for vacuum cleaners. *Energies*, 2018, vol. 11, no. 12, pp. 1–13, DOI: 10.3390/en11123334.
21. Ruoho S., Dlala E., Arkkio A. Comparison of demagnetization models for finite-element analysis of permanent-magnet synchronous machines. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2007, vol. 43, no. 11, pp. 3964–3968. DOI: 10.1109/TMAG.2007.906749.
22. Takahashi R., Ichita H., Tamura J., Kimura M., Ichinose M., Futami M., Ide K. Efficiency calculation of wind turbine generation system with doubly-fed induction generator. *Proc. of XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM 2010)*. Rome, Italy, 6–8 Sept. 2010. DOI: 10.1109/ICELMACH.2010.56083.
23. Vinogradov A.B. *Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka* [Vector control of AC drives]. Ivanovo, Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin (ISPU), 2008. 298 p.
24. Cupertino F., Pellegrino G., Gerada C. Design of synchronous reluctance machines with multiobjective optimization algorithms. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2014, vol. 50, no. 6, pp. 3617–3627. DOI: 10.1109/ECCE.2013.6646934.
25. Kamper M., Merwe F., Williamson S. Direct finite element design optimization of the cageless reluctance synchronous machine. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1996, vol. 11, no. 3, pp. 547–555. DOI: 10.1109/60.537006.
26. Chen Yang. *NdFeB magnets, price list of standard block magnets. Catalogue*. Available at: <http://www.ndfebmagnets.de/CY-PriceList-NdFeB-Block.pdf> (accessed 9 January 2020).

Received: 31.08.2019.

#### Information about the authors

**Vladimir A. Prakht**, Cand. Sc., associate professor, Ural Federal University.

**Vladimir A. Dmitrievskii**, Cand Sc., associate professor, Ural Federal University.

**Vadim M. Kazakbaev**, Cand Sc., junior researcher, Ural Federal University.

УДК 681.5

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА НЕФТЕПРОДУКТОВ С УЧЕТОМ СЕЗОННОСТИ НА ОСНОВЕ АВТОРЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

Тугашова Лариса Геннадьевна<sup>1</sup>,  
tugashowa.agni@yandex.ru

Затонский Андрей Владимирович<sup>2</sup>,  
z Xenon@narod.ru

<sup>1</sup> Альметьевский государственный нефтяной институт,  
Россия, 423450, г. Альметьевск, ул. Ленина, 2.

<sup>2</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет – Березниковский филиал,  
Россия, 618404, г. Березники, ул. Тельмана, 7.

**Актуальность.** Автомобильный бензин, дизельное топливо и другие нефтепродукты отличаются сезонностью потребления, способом транспортировки, территорией реализации. Изменение спроса на нефтепродукты под влиянием названных факторов приводит к изменению ассортимента и объемов производства различных видов топлива. В связи с этим актуальной задачей является планирование производства нефтепродуктов. Предложено решать задачу прогнозирования выработки нефтепродуктов с помощью авторегрессионных моделей с учетом фактора сезонности.

**Цель:** разработка и выбор по критериям адекватности математических моделей, пригодных для прогнозирования выработки светлых нефтепродуктов.

**Объекты:** процесс выработки нефтепродуктов. Модели построены по данным единой межведомственной информационно-статистической системы.

**Методы** исследования основаны на использовании методов математического и имитационного моделирования

**Результаты.** Проведен обзор методов моделирования временных рядов производства и потребления топливно-энергетических ресурсов. Выполнено сравнение различных математических моделей прогнозирования выработки автомобильного бензина на примере Приволжского федерального округа. Разработаны модели, отличающиеся учетом сезонной компоненты и видом тренда. Предложено использование мультипликативной модели, содержащей тренд в виде линейной, авторегрессионной, авторегрессионно-степенной модели с вычислением индекса сезонности. Выявлено, что лучшие результаты по критерию средней относительной погрешности получены с применением модели с авторегрессионно-степенным трендом. Показана работоспособность полученной модели на примере федеральных округов РФ для оценки выработки автомобильного бензина и дизельного топлива. Результаты исследований получены с применением программного пакета Matlab. Выполнен постпрогноз выработки топлив по предлагаемой модели со средней относительной погрешностью, не превышающей 11 %.

**Ключевые слова:** Нефтепродукт, мультипликативная модель, выработка, динамический ряд, индекс сезонности, показатели качества.

### Введение

Одной из актуальных проблем современной нефтеперерабатывающей промышленности является повышение качества основных видов нефтепродуктов, увеличение выхода светлых нефтепродуктов и, следовательно, экономической эффективности их производства. Решение перечисленных проблем возможно за счет модернизации технологии нефтеперерабатывающих установок, а также путем создания высокоэффективных систем контроля и управления процессами нефтепереработки, систем прогнозирования параметров [1].

Вопросы анализа и прогнозирования показателей, определяющих состояние нефтепереработки Российской Федерации (РФ) и отдельных регионов, рассмотрены во многих работах. Например, в статье [2] проведен анализ состояния переработки нефти в России по регионам и компаниям, представлена структура и динамика транспортировки нефти и нефтепродуктов на экспорт по способам и направлениям поставок. В статье [3] представлены основные предпосылки внедрения систем прогнозирования спроса на

нефтепродукты в РФ, в том числе с применением автоматизированной системы Demand Management, применяемой в нефтяных компаниях западных стран. В работе [4] производятся прогнозные расчеты для российских нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ), которые осуществляются в «Модели анализа и прогнозирования нефтеперерабатывающей промышленности Российской Федерации (РФ)» (МАПНПП). МАПНПП является статической имитационной моделью, симулирующей работу НПЗ РФ и состоит из двух блоков: балансового и экономического. Балансовый блок представляет собой совокупность сводных материальных балансов основных НПЗ РФ, сгруппированных по территориальному принципу (федеральным округам (ФО)).

Ассортимент и объемы производства различных видов топлива определяются структурой транспортного парка, требованиями ГОСТ, технических регламентов. В 2017 г. доля объема производства бензина класса 5 в РФ достигла 98 %. В структуре производства дизельного топлива (ДТ) преобладает летнее ДТ, в 2017 г. его доля составила 75 %. Если зимние, межсезонные и арктические дизели практически все вы-

пускаются в соответствии с требованиями класса 5, то в летнем ДТ 12 % – это так называемые «дизели вне классов» [5]. В 2018 г. существенных изменений в структуре производства не произошло.

Такие нефтепродукты, как автомобильный бензин, дизельное топливо и другие, отличаются сезонностью потребления, ценой, территорией реализации, способом транспортировки. Изменение спроса на нефтепродукты под влиянием перечисленных факторов приводит к изменению ассортимента и объемов производства продукции, выпускаемой предприятиями нефтеперерабатывающей промышленности. В связи с этим важной задачей является планирование производства различных видов нефтепродуктов.

В работе предлагается решать задачу прогнозирования выработки нефтепродуктов применением моделей с учетом сезонности. Инструментом решения поставленной задачи выбран программный пакет *Matlab*.

С целью выяснения закономерностей изменения выработки продуктов нефтепереработки использованы методы моделирования временных рядов. Известны следующие методы моделирования временных рядов: *MA* (*moving average*, модель скользящего среднего), экспоненциальное сглаживание, метод Хольта, *ARIMA* (*autoregressive integrated moving average*, проинтегрированная модель авторегрессии скользящего среднего), модель Бокса–Дженкинса (*Box–Jenkins*), регрессионные многофакторные модели, методы искусственного интеллекта (искусственные нейронные сети, кластерный анализ, метод опорных векторов (*SVM*, *Support vector machines*)), методы экспертных оценок (например, метод Дельфи [2]), фильтр Калмана [6], балансовые модели [4, 7] и другие.

В работах [8, 9] предложено применение нейронных сетей к прогнозированию добычи нефти. С использованием данных нефтяного месторождения в [8] показана возможность прогнозирования с помощью методологии *HONN* (*higher-order neural network*) со средней относительной погрешностью 13,86 и 15,13 % в двух случаях проведенных исследований. Следует отметить, что при применении нейронных сетей для обучения сети требуются большие массивы данных и затраты времени.

В [10] излагается получение модели Бокса–Дженкинса для краткосрочного прогнозирования временных рядов в добыче природного газа и сырой нефти. В работе [11] рассмотрена модель *ARIMA*. Для построения адекватных моделей требуется большое число наблюдений, что не всегда доступно.

В ряде работ предлагаются гибридные методы. Например, в статье [12] рассмотрено прогнозирование временных рядов производства бензина и дизельного топлива с использованием нечетких правил «если–то» на основе нечеткой кластеризации временных рядов и дифференциального энтропийного подхода. В работе [13] предложено прогнозирование выработки электроэнергии методом *SVM* с применением алгоритма *PSO* (*Particle Swarm Optimization*, метод оптимизации роя частиц). Гибридные модели на основе метода *SSA* (*Singular Spectrum Analysis*, сингулярный

спектральный анализ), модели *ARIMA* и искусственных нейронных сетей приведены в [14]. Перечисленные методы позволяют выполнять прогнозы с высокой точностью, но отличаются усложнением алгоритмов и вычислительными затратами.

В [15, 16] для прогнозирования качества нефтепродуктов предложены линейные многофакторные регрессионные модели. В статье [17] приведен метод прогнозирования спроса на нефтепродукты, основанный на сочетании корреляционного, факторного, технико-экономического и эконометрического анализа. В этом случае важной задачей при получении моделей достаточного качества является выбор факторов, влияющих на выходной параметр, и типа связи переменных.

В [18, 19] динамика добычи нефти определяется суммой логистических кривых (кривыми Хабберта). Коэффициенты подбираются под тип кривой, метод не является адаптивным и малопригоден для прогнозирования объемов производства нефтепродуктов.

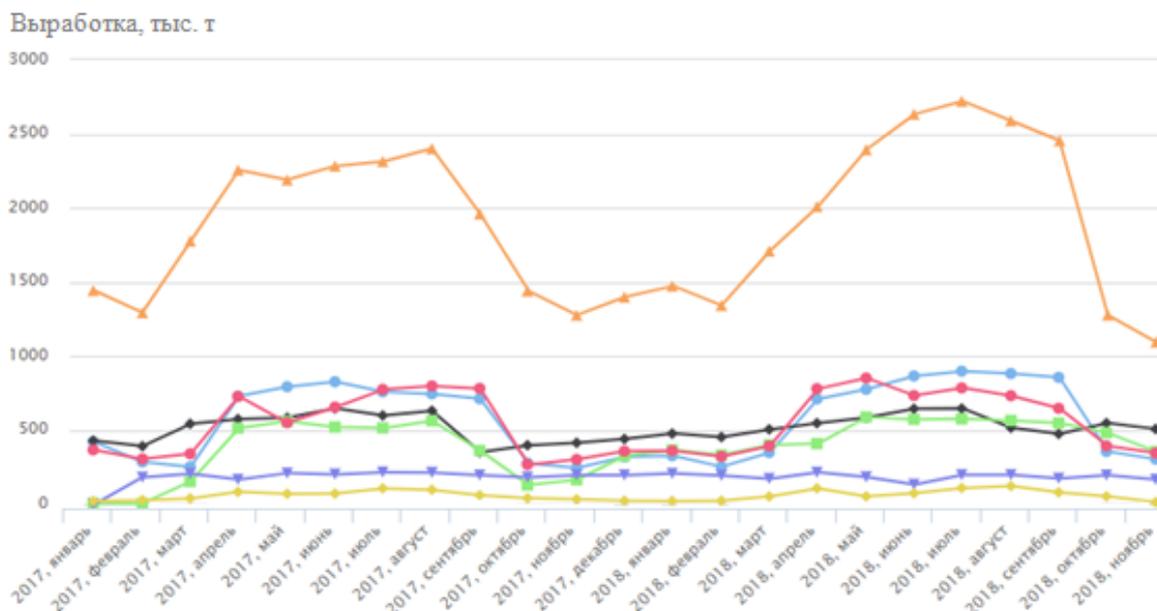
Метод Хольта, предложенный для прогнозирования объемов производства нефтепродуктов [20], является адаптивным методом экспоненциального сглаживания с двумя настроечными параметрами в диапазоне от 0 до 1. Значения настроечных параметров влияют на точность модели и определяются в результате решения оптимизационной задачи. В случае применения модели Хольта не учитывается сезонная составляющая.

На рис. 1 для примера приведены временные ряды, характеризующие динамику выработки летнего дизельного топлива экологического класса К5. Как видно из рис. 1, выработка топлива по каждому федеральному округу характеризуется периодами со схожей динамикой. Временные ряды выработки дизельного топлива за 2017–2018 гг. содержат сезонную составляющую. Если проанализировать статистические данные выработки различных нефтепродуктов в РФ за 2013–2018 гг. [21, 22], то можно наблюдать наличие сезонной компоненты по выработке дизельного топлива, автомобильных бензинов, других видов топлива.

#### **Этапы моделирования и прогнозирования выработки нефтепродуктов и полученные результаты по ПФО**

Авторами выполнен прогноз выработки нефтепродуктов с применением авторегрессионных моделей с сезонной составляющей. Этапы разработки таких моделей следующие:

- сглаживание временного ряда с помощью централизованной скользящей средней;
- оценка сезонной компоненты в виде индексов сезонности и их корректировка;
- исключение сезонной компоненты из исходного динамического ряда и построение уравнения тренда по уровням ряда без учета сезонности;
- расчет уровней динамического ряда с учетом индекса сезонности и определение остатков;
- оценка адекватности полученной модели;
- выполнение постпрогноза с помощью разработанной модели.



**Рис. 1.** Выработка летнего дизельного топлива класса K5 [21]: ▲ – Центральный ФО, ◆ – Северо-Западный ФО, ■ – Южный ФО, ▲ – Приволжский ФО, ▲ – Уральский ФО, ◆ – Сибирский ФО, ▲ – Дальневосточный ФО

**Fig. 1.** Production of summer diesel fuel of K5 class [21]: ▲ – Central federal district (FD), ◆ – Northwestern FD, ■ – Southern FD, ▲ – Volga FD, ▲ – Urals FD, ◆ – Siberian FD, ▲ – Far Eastern FD

В качестве исходных данных использовалась информация официальных сайтов Федеральной службы государственной статистики РФ [21] и единой межведомственной информационно-статистической системы (ЕМИСС) [22] за 2013–2018 гг. Вышеприведенные этапы разработки модели реализованы на примере статистических данных по автомобильному бензину K5 Приволжского федерального округа (ПФО) за 2013–2018 гг. При построении модели использовался период с июля 2013 г. по июнь 2018 г.

Так как изменение выработки происходит с непостоянным размахом, применена мультипликативная модель временного ряда. Следует отметить, что со временем характер амплитуды может меняться.

Мультипликативная модель временного ряда выработки автомобильного бензина определена в виде произведения тренда и индексов сезонности:

$$\hat{Q} = \hat{T}_i \cdot Index \cdot \varepsilon, \quad (1)$$

где  $\hat{T}_i$  – тренд; *Index* – индекс сезонности;  $\varepsilon$  – остатки.

Алгоритм получения тренд-сезонной мультипликативной модели выработки для ПФО по формуле (1) состоит из следующих шагов.

1. Сглаживание временного ряда с помощью центрированной скользящей средней: нахождение скользящих средних по исходным уровням ряда, определение вычисленного значения к середине периода сглаживания, затем период сдвигается на одно значение и т. д. Для выравнивания уровней ряда динамики принят период сглаживания, равный двенадцати месяцам.
2. Оценка сезонной компоненты в виде индексов сезонности и их корректировка:

- нахождение отношения фактических значений к центрированной скользящей средней;
- определение среднего арифметического индекса сезонности и медианы за каждый месяц;
- корректировка путем умножения значения медианы на поправочный коэффициент (табл. 1).

**Таблица 1.** Определение индексов сезонности  
**Table 1.** Determination of seasonality indices

Месяц Month	Медиана Median	Скорректированное значение медианы Adjusted value of the median
1	2	3
Январь/January	1,038	1,034
Февраль/February	0,8905	0,8868
Март/March	1,039	1,035
Апрель/April	0,9658	0,9618
Май/May	1,032	1,028
Июнь/June	1,002	0,9981
Июль/July	1,081	1,076
Август/August	1,115	1,111
Сентябрь/September	0,9771	0,9729
Октябрь/October	0,9225	0,9186
Ноябрь/November	0,9799	0,9758
Декабрь/December	1,007	1,003
Сумма/Sum total	12,05	12
Поправочный коэффициент Adjustment factor	0,9958	

Сумма индексов сезонности (столбец 3 табл. 1) равна двенадцати.

3. Исключение сезонной компоненты из исходного динамического ряда путем деления фактического значения выработки на индекс сезонности и построение уравнения тренда по уровням ряда без учета сезонности.

Тренд может быть представлен в виде следующих моделей:

- линейный тренд (*LM*) вида [23], коэффициенты которого  $a_0$ ,  $a_1$  находятся методом наименьших квадратов (МНК):

$$\hat{T}_1(t_i) = a_0 + a_1 \cdot t_i, \quad (2)$$

где  $T_1$  – выработка автомобильного бензина без учета сезонности, тыс. т;  $t$  – время, мес.;  $i$  – номер измерения.

- авторегрессионная модель *AR* (*AutoRegressive*) второго порядка (*AR2*) [24]:

$$\hat{T}_2(t_i) = a_0 + a_1 \cdot T_2(t_{i-1}) + a_2 \cdot T_2(t_{i-2}), \quad (3)$$

где  $T_2$  – выработка автомобильного бензина без учета сезонности, тыс. т; коэффициенты  $a_j$  описывают влияние прошлых периодов на изменение текущего состояния.

- авторегрессионная модель с внешним фактором *ARX* (*Autoregressive with eXternal input*), которая дополнительно учитывает изменение фактора (в нашем случае это время), влияющего на зависимый параметр:

$$\hat{T}_3(t_i) = a_0 + a_1 \cdot T_3(t_{i-1}) + a_2 \cdot T_3(t_{i-2}) + a_3 \cdot t_i, \quad (4)$$

где  $T_3$  – выработка автомобильного бензина по авторегрессионной модели с внешним фактором без учета сезонности, тыс. т;  $a_0$ – $a_3$  – коэффициенты.

- сумма авторегрессионной модели второго порядка и степенной функции (авторегрессионно-степенная модель *AR2+EM*):

$$\hat{T}_4(t_i) = a_0 + a_1 \cdot T_4(t_{i-1}) + a_2 \cdot T_4(t_{i-2}) + a_3 \cdot t_i^{a_4}, \quad (5)$$

где  $a_4$  – дополнительный настроечный параметр.

При вычислении коэффициентов в моделях трендовой составляющей (2) применялась функция *Matlab regress*, в зависимости (3) – функция *ar*, в (4) – *mldivide*, а в модели (5) – функция *fminsearch* [25].

С помощью функций *Matlab* выполнена идентификация параметров моделей (2)–(5). Рассчитанные коэффициенты приведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Рассчитанные коэффициенты моделей тренда (2)–(5)

Значения коэффициентов в модели Coefficient values in the model	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$
<i>LM</i>	654,8	13,36	–	–	–
<i>AR2</i>	–	–1,371	0,3688	–	–
<i>ARX</i>	509,5	0,2224	0,02831	9,637	–
<i>AR2+EM</i>	155,1	–1,262	0,5015	6,549	0,8284

4. Расчет уровней динамического ряда с учетом индекса сезонности и определение остатков.

В табл. 3 для примера приведен фрагмент расчетных значений для модели с авторегрессионно-степенным трендом (*AR2+EM*).

**Таблица 3.** Расчет уровней ряда с учетом индекса сезонности и определение остатков

**Table 3.** Calculation of the levels of a number with the seasonality index and determination of residues

$t$ , мес./mth	$Q$	$\hat{T}_4 \cdot Index$	$\varepsilon = \frac{Q}{\hat{T}_4 \cdot Index}$
	тыс. т · 10 <sup>3</sup> /thous. tn · 10 <sup>3</sup>		
1	0,6737	0,6574	1,025
2	0,7177	0,6209	1,156
3	0,6585	0,6927	0,9506
4	0,7265	0,7338	0,9900
5	0,6981	0,7824	0,8922
6	0,6654	0,7126	0,9337
7	0,8544	0,7927	1,078
8	0,7952	0,7105	1,119
...	...	...	...

Значения тренда  $\hat{T}_4$  определены путем подстановки найденных коэффициентов  $a_0$ – $a_4$  в уравнение (5). По значениям исходного временного ряда  $Q$ , тренда  $\hat{T}_4$  и индексов сезонности *Index* определены остатки  $\varepsilon$ .

5. Оценка адекватности полученных моделей.

Для анализа качества полученных моделей определена средняя относительная погрешность аппроксимации  $\xi_{\text{ар}}$ .

При нахождении выработки автомобильного бензина по модели (1) в случае линейного тренда (2) средняя относительная погрешность составляет 6,8 %, в случае тренда в виде авторегрессионной модели (3) – 6,5 %. Если тренд представить в виде авторегрессионной модели с внешним фактором (формула 4), то средняя относительная погрешность модели выработки автомобильного бензина снижается до 6,2 %.

Для улучшения качества аппроксимации в модель тренда добавлен настроечный параметр  $a_4$  (показатель степени). Для модели с трендом в виде формулы (5) средняя относительная погрешность аппроксимации равна 5,4 %.

Качество модели также определяется коэффициентом детерминации. Коэффициент детерминации показывает, насколько вообще реакция (выходной параметр) зависит только от выбранных факторов. С использованием результатов, часть которых для примера приведена в табл. 2, определен коэффициент детерминации [24]. Вычисленный коэффициент детерминации  $R^2=0,8603$ . Следовательно, полученная мультипликативная модель с учетом сезонности объясняет 86,03 % общей вариации уровней исходного динамического ряда. Эта модель применена для прогнозирования выработки топлива.

6. Для проверки возможности прогнозирования с помощью разработанной модели выполнен постпрогноз, то есть прогноз, выполняемый на полученной модели для прошлых периодов на основе известных данных.

Постпрогноз выработки автомобильного бензина К5 по ПФО на построенной модели на второе полугодие 2018 г. приведен в табл. 4. Точность постпро-

гноза  $\xi_{\text{post}}$  вычислена сравнением исходных значений и пост-значений за выбранный период.

**Таблица 4.** Постпрогноз выработки автомобильного бензина К5 на 6 месяцев 2018 г.

**Table 4.** Post forecast of production of K5 motor gasoline to 6 months of 2018

Показатели Indicators	Период выработки автомобильного бензина 2018 г. Period of production of motor gasoline in 2018					
	Июль July	Август August	Сентябрь September	Октябрь October	Ноябрь November	Декабрь December
$Q, 10^3$ тыс. т ( $10^3$ thous. tn)	1457	1398	1112	1004	1304	1454
$\hat{Q}, 10^3$ тыс. т ( $10^3$ thous. tn)	1629	1419	1238	955	1205	1446
$ Q_i - \hat{Q}_i $ , тыс. т (thous. tn)	172	21	126	49	99	8
$\xi_{\text{post}}, \%$	11,81	1,502	11,33	4,880	7,592	0,5501
$\xi_{\text{post}}, \%$	6,277					

В табл. 4 приведены обозначения:  $Q$  – выработка автомобильного бензина (исходный временной ряд), тыс. т;  $\hat{Q} = \hat{T}_4 \cdot \text{Index}$  – выработка автомобильного бензина, определенная по модели, тыс. т.

На рис. 2 приведен график выработки автомобильного бензина К5 по ПФО для случая, если в качестве тренда применяется авторегрессионно-степенная модель (формула 5).

Таким образом, средняя относительная погрешность постпрогноза составляет 6,277 %, что позволяет рекомендовать полученную модель для прогнозирования выработки топлива.

#### Оценка работоспособности полученной модели на примере федеральных округов и РФ

Для проверки работоспособности модели с использованием вышеприведенного алгоритма полученные тренд-сезонной мультипликативной модели построены мультипликативные модели выработки ав-

томобильного бензина К5 для других федеральных округов и РФ.

На рис. 3 приведен график выработки автомобильного бензина К5 по Южному федеральному округу (ЮФО). С учетом найденных коэффициентов  $a_0$ – $a_4$  (формула 5) получена следующая зависимость для тренда:

$$\hat{T}_4(t) = 54,71 - 0,9420 \cdot T_4(t-1) + 0,3538 \cdot T_4(t-2) + 0,003542 \cdot t^{2,356}.$$

Полученные значения индексов сезонности:

[1,102; 1,083; 1,065; 1,027; 0,9828; 1,039; 1,022; 0,9032; 0,9107; 0,8514; 0,9745; 1,041].

Показатели качества аппроксимации и постпрогноза выработки автомобильного бензина К5 по федеральным округам и РФ с горизонтом постпрогноза 6 месяцев приведены в табл. 5, 6.

**Таблица 5.** Показатели качества аппроксимации и постпрогноза выработки автомобильного бензина К5 по федеральным округам и РФ

**Table 5.** Indicators of quality of approximation and post forecast of K5 motor gasoline production by federal districts and the Russian Federation

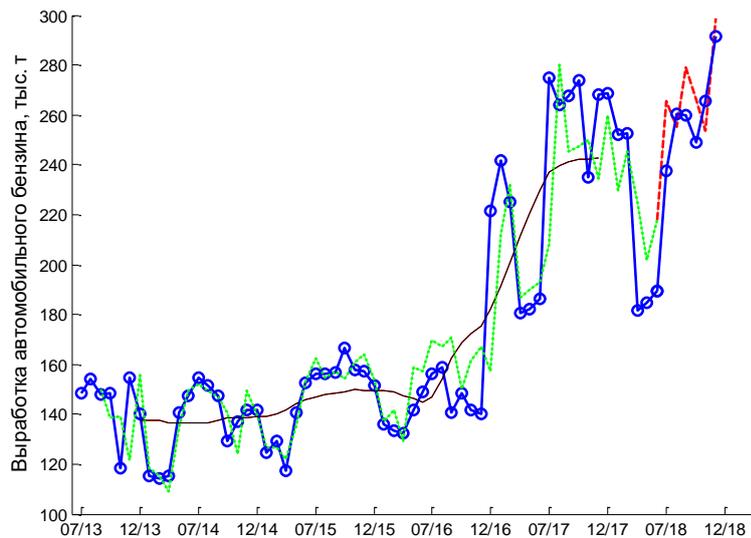
Показатели Indicators	Федеральные округа и РФ Federal districts and the RF						
	СЗФО NWFD	ЦФО CFD	ЮФО SoutFD	ПФО VFD	СФО SibFD	ДВО FEFD	РФ RF
$\xi_{\text{ap}}, \%$	8,2	7,0	6,1	5,4	5,5	5,9	3,1
$R^2$	0,7170	0,8253	0,7532	0,8603	0,7690	0,8022	0,7312
$\xi_{\text{post}}, \%$	10,71	9,276	7,08	6,3	7,054	7,924	4,345

В табл. 5, 6 приведены обозначения: СЗФО – Северо-Западный федеральный округ, ЦФО – Центральный федеральный округ, ЮФО – Южный федеральный округ, ПФО – федеральный округ, СФО – федеральный округ, ДВО – Дальневосточный федеральный округ. По Уральскому федеральному округу (УФО) из-за недостаточности исходных данных за выбранный период расчет не выполнялся.



**Рис. 2.** Мультипликативная модель выработки автомобильного бензина К5 ПФО в виде произведения тренда ( $T_4$ ) и индексов сезонности (Index)

**Fig. 2.** Multiplicative model of K5 motor gasoline production in Volga Federal District (VFD) as a product of the trend ( $T_4$ ) and seasonality indices (Index)



**Рис. 3.** Мультипликативная модель выработки автомобильного бензина К5 ЮФО в виде произведения тренда ( $T_4$ ) и индексов сезонности (Index)

**Fig. 3.** Multiplicative model of K5 automobile gasoline production in South Federal District (SFD) as a product of the trend ( $T_4$ ) and seasonality indices (Index)

**Таблица 6.** Абсолютные и относительные показатели отклонений постпрогноза на 6 месяцев 2018 г.

**Table 6.** Absolute and relative indicators of post-forecast deviations for 6 months of 2018

ФО FD	Показатели Indicators	Период выработки автомобильного бензина 2018 г. Period of production of motor gasoline in 2018					
		Июль July	Август August	Сентябрь September	Октябрь October	Ноябрь November	Декабрь December
СЗФО/NWFD	$\Delta$ , тыс. т/thous. tn	8,616	45,96	33,97	20,43	11,63	14,32
	$\xi_{\text{post}}$ , %	3,723	22,69	15,47	9,116	4,688	5,62
ЦФО/CFD	$\Delta$ , тыс. т/thous. tn	35,74	83,53	36,86	58,91	39,65	139,16
	$\xi_{\text{post}}$ , %	4,792	11,61	5,246	8,671	5,99	22,12
ЮФО/SoutFD	$\Delta$ , тыс. т/thous. tn	35,27	5,1752	21,68	17,95	16,14	10,08
	$\xi_{\text{post}}$ , %	15,31	1,988	8,401	7,212	6,058	3,486
СФО/SibFD	$\Delta$ , тыс. т/thous. tn	36,41	97,57	18,75	67,72	43,47	5,046
	$\xi_{\text{post}}$ , %	5,262	16,73	3,348	12,24	7,636	0,7680
ДВО/FEFD	$\Delta$ , тыс. т/thous. tn	4,041	2,072	14,94	9,319	18,08	2,999
	$\xi_{\text{post}}$ , %	3,896	1,968	14,19	8,606	16,48	2,533
РФ/RF	$\Delta$ , тыс. т/thous. tn	210,9	400,8	23,15	14,88	208,8	34,95
	$\xi_{\text{post}}$ , %	5,871	1,996	0,7046	0,4498	6,191	0,9416

Проверка работоспособности модели осуществлена применительно к другим видам топлива, для чего были определены новые значения коэффициентов в модели (5) и значения индексов сезонности и выбран другой горизонт постпрогноза. По статистическим данным за 2013–2017 г. (60 значений) получена модель выработки дизельного топлива в РФ и федеральных округах в виде произведения тренда  $T_4$  (формула 5) и индексов сезонности. Горизонт постпрогноза принимаем равным одному году (2018 г.).

На рис. 4 приведен график выработки дизельного топлива РФ. С учетом найденных коэффициентов  $a_0$ – $a_4$  получена следующая зависимость для тренда:

$$\hat{T}_4(t) = 2,583 \cdot 10^3 - 0,3755 \cdot T_4(t-1) - 0,2106 \cdot T_4(t-2) + 0,6513 \cdot t^{1,213}.$$

Получены следующие значения индексов сезонности: [1,054; 0,9659; 1,029; 0,9498; 0,9869; 0,9983; 1,021; 1,043; 0,9533; 0,9385; 0,9895; 1,073].

Средняя относительная погрешность аппроксимации составила 1,9 %, коэффициент детерминации равен 0,7724, что говорит об адекватности полученной модели. Средняя относительная погрешность постпрогноза на 2018 г. (для 12 значений) составила 2,629 %, модель пригодна для прогнозирования.

На рис. 5 приведен график выработки дизельного топлива по СЗФО. Получена следующая зависимость для тренда мультипликативной модели:

$$\hat{T}_4(t) = 336,2 - 0,7070 \cdot T_4(t-1) + 0,2575 \cdot T_4(t-2) + 0,002435 \cdot t^{1,721}.$$

Найденные значения индексов сезонности:

[1,095; 1,030; 1,109; 1,087; 1,061; 1,019; 0,8739; 0,9214; 0,8590; 0,8841; 0,9970; 1,065].

Полученные показатели качества моделей выработки дизельного топлива по РФ, СЗФО и другим федеральным округам РФ приведены в табл. 7, 8.

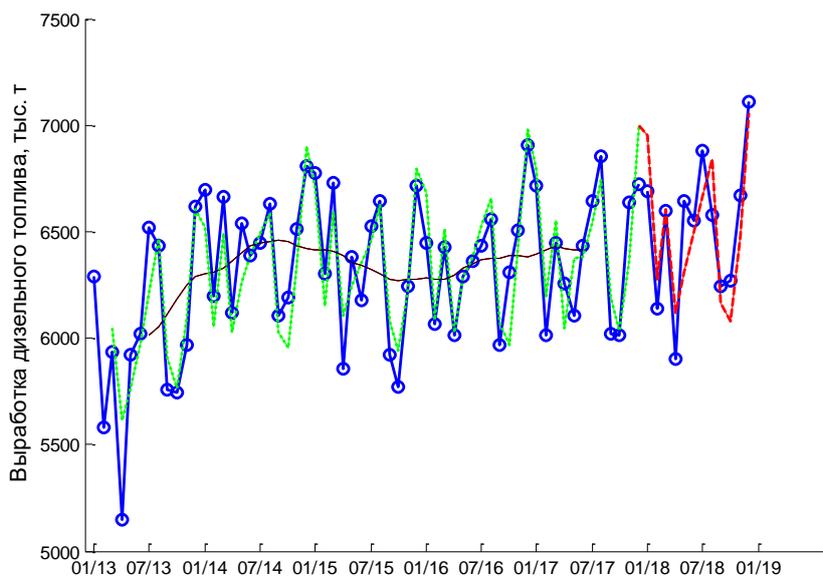


Рис. 4. Модель выработки дизельного топлива РФ

Fig. 4. Model of diesel fuel production in the Russian Federation

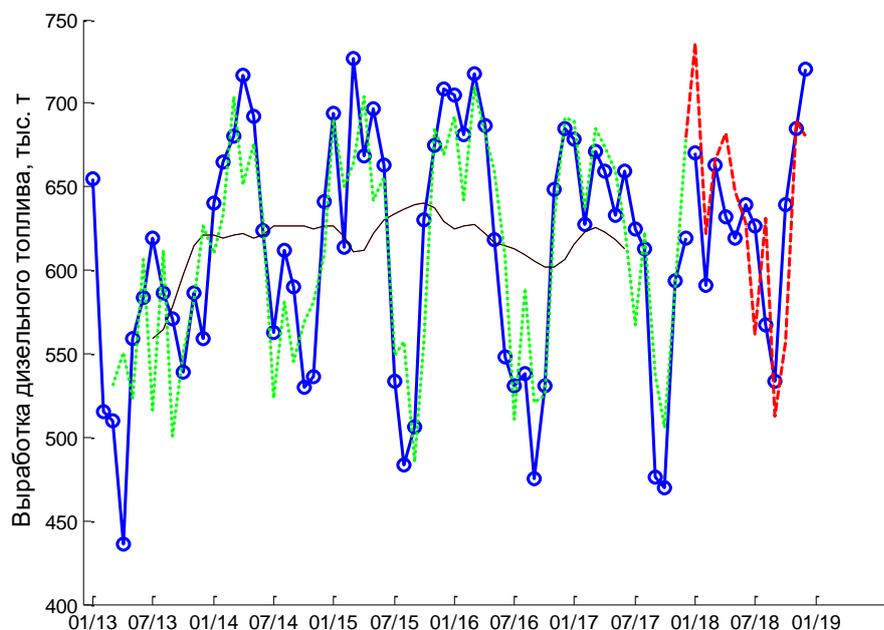


Рис. 5. Модель выработки дизельного топлива по СЗФО

Fig. 5. Model output of diesel fuel in the NWFD

Таблица 7. Показатели качества аппроксимации и постпрогноза выработки дизельного топлива по федеральным округам и РФ

Table 7. Quality indicators of approximation and post forecast of diesel fuel production by federal districts and the Russian Federation

Показатели Indicators	Федеральные округа и РФ Federal districts and RF						
	СЗФО NWFd	ЮФО SoutFD	ПФО VFD	УФО UFD	СФО SibFD	ДВО FEFD	РФ RF
$\xi_{sup}, \%$	6,7	5,9	3,0173	6,1	5,1	7,1	1,9
$R^2$	0,6876	0,9383	0,7242	0,8708	0,6502	0,5496	0,7724
$\xi_{post}, \%$	7,358	6,207	4,722	8,520	6,643	9,643	2,629

Результаты, приведенные в табл. 5–8, показывают работоспособность полученной модели.

### Выводы

По статистическим данным по выработке автомобильного бензина класса К5 и дизельного топлива за 5 лет на примере федеральных округов РФ построены математические модели временного ряда выработки и выполнена оценка качества моделирования и прогнозирования с помощью моделей с сезонной составляющей.

В результате проведенного исследования выявлено, что лучшими качествами аппроксимации и прогнозирования обладает мультипликативная сезонная модель, содержащая тренд в виде суммы авторегрессионной модели второго порядка и степенной функции. Авторегрессионная составляющая обеспечивает наличие связи между текущим уровнем ряда и уров-

нем ряда, сдвинутым на два временных периода, а степенная составляющая учитывает нелинейность тренда, сезонные изменения корректируются индексами сезонности. Несложная в реализации и не требующая значительных вычислительных затрат, полу-

ченная модель позволяет учитывать изменяющиеся во времени условия и обеспечивает достаточную точность прогноза. Средняя относительная погрешность построения по ФО не превышает 11 %, по РФ – не более 5 %.

**Таблица 8.** Абсолютные и относительные показатели отклонений постпрогноза на 12 месяцев 2018 г.

**Table 8.** Absolute and relative indicators of post-forecast deviations for 12 months of 2018

ФО FD	Показатели Indicators	Период выработки дизельного топлива 2018 г. Period of diesel fuel production in 2018											
		Январь January	Февраль February	Март March	Апрель April	Май May	Июнь June	Июль July	Август August	Сентябрь September	Октябрь October	Ноябрь November	Декабрь December
СЗФО NWFD	$\Delta$ , тыс. т/1000 t	80,09	31,78	3,231	55,47	40,27	19,24	68,07	69,46	31,04	96,81	6,27	45,55
	$\xi_{\text{post}}$ , %	12,08	5,381	0,487	8,783	6,572	3,011	10,87	12,28	5,820	15,13	0,919	6,288
ЮФО SoutFD	$\Delta$ , тыс. т/1000 t	173,4	23,31	24,73	54,88	16,25	42,84	42,68	49,40	16,70	93,93	27,06	25,61
	$\xi_{\text{post}}$ , %	23,59	3,312	3,109	7,644	2,091	4,940	4,745	5,591	1,948	10,30	3,154	2,838
ПФО VFD	$\Delta$ , тыс. т/1000 t	41,91	10,01	29,46	173,3	148,6	196,1	115,9	40,74	287,3	57,30	129,6	203,6
	$\xi_{\text{post}}$ , %	1,558	0,406	1,125	7,745	5,719	7,219	4,111	1,512	11,04	2,492	4,806	6,914
УФО UFD	$\Delta$ , тыс. т/1000 t	10,61	32,61	8,857	16,41	14,29	38,92	63,57	81,83	9,065	28,05	27,03	5,289
	$\xi_{\text{post}}$ , %	2,801	10,33	2,618	4,711	4,236	13,54	21,92	26,19	2,836	7,849	9,080	1,632
СФО SibFD	$\Delta$ , тыс. т/1000 t	83,51	23,71	2,829	1,041	175,2	110,6	25,69	77,46	74,62	25,68	115,1	67,19
	$\xi_{\text{post}}$ , %	8,349	2,665	0,297	0,113	16,81	11,25	2,468	7,897	8,877	2,762	11,79	6,296
ДВО FEFD	$\Delta$ , тыс. т/1000 t	11,35	26,94	17,43	28,11	15,43	65,25	4,281	13,34	8,003	31,24	14,16	9,322
	$\xi_{\text{post}}$ , %	4,960	13,94	8,103	17,15	8,685	33,53	1,627	5,659	2,948	13,20	5,751	3,554
РФ RF	$\Delta$ , тыс. т/1000 t	258,7	137,1	10,11	212,6	335,1	52,48	213,7	266,8	82,31	190,2	188,6	51,18
	$\xi_{\text{post}}$ , %	3,866	2,115	0,158	3,277	5,177	0,811	3,285	4,081	1,244	2,893	2,823	0,720

По статистическим данным построены модели выработки автомобильного бензина и дизельного топлива в РФ. Средняя относительная погрешность постпрогноза выработки автобензина за второе полугодие 2018 г. составила 4,345 %. Средняя относительная погрешность постпрогноза выработки дизельного топлива за 2018 г. составила 2,629 %. Средние относительные погрешности постпрогноза по обоим типам топлива по РФ ниже, чем по федеральным округам, потому что чем больше, инерционнее прогнозируемая система, тем меньше случайные вариации факторов (включая неизвестные) влияют на ее поведение.

Значения коэффициентов детерминации по федеральным округам и РФ отличаются незначительно, это говорит о том, что характер влияния факторов в РФ и ФО одинаковый. То есть в федеральных округах нет каких-то особых, «эндемичных» факторов для каждого округа.

Прогноз выработки дизельного топлива в РФ на 2019 г., выполненный с помощью авторегрессионно-степенной модели с сезонной составляющей, показывает увеличение показателя на 2705 тыс. т (3,457 %) по сравнению с 2018 г.

Модели подобной структуры могут применяться для задач планирования выработки нефтепродуктов и формирования стратегии развития производства.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитриевский Б.С., Затонский А.В., Тугашова Л.Г. Задача управления процессом ректификации нефти и метод ее решения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 2. – С. 136–145.
2. Динамика внутреннего потребления и экспорта нефти и нефтепродуктов в России / Л.В. Эдер, И.В. Филимонова, И.В. Проворная, М.В. Мишенин // Экологический вестник России. – 2018. – № 2. – С. 1–9.
3. Тоткало Г.В., Хрипунова А.С. О некоторых подходах к прогнозированию спроса на рынке нефтепродуктов // Вестник университета (Государственный университет управления). – 2015. – № 8. – С. 75–79.
4. Эволюция мировых энергетических рынков и ее последствия для России // под ред. А.А. Макарова, Л.М. Григорьева, Т.А. Митровой. – М.: ИНЭИ РАН-АЦ при Правительстве РФ, 2015. – 400 с.
5. Доживем-увидим. Пост-релиз 10-й международной конференции «Моторные топлива 2018» // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. – 2018. – № 7. – С. 44–46.
6. Цыбагов В.А., Важенина Л.В. Методические подходы к анализу и прогнозированию развития топливно-энергетического комплекса в регионе // Экономика региона. Отраслевые и межотраслевые комплексы. – 2014. – № 4. – С. 188–199.
7. Тугашова Л.Г. Применение фильтра Калмана для идентификации параметров процессов нефтепереработки // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн. – Тамбов, 2018. – С. 602–606.
8. Production forecasting of petroleum reservoir applying Higher-Order Neural Networks (HONN) with limited reservoir data / N.C.C. Chakra, D.N. Saraf, K.Y. Song, M.M. Gupta // International Journal of Computer Applications. – 2013. – V. 72. – № 2. – P. 23–35.
9. Ba D., Shi G.R. Forecasting petroleum production using the time-series prediction of artificial neural network // Advances in Petroleum Exploration and Development. – 2015. – V. 10. – № 2. – P. 1–6.
10. Uri N.D., Flanagan St.P. Short-term forecasting of crude petroleum and natural gas production // Applied Energy. – 1979. – V. 5 (4). – P. 297–310.
11. Hyndman R.J., Athanasopoulos G. Forecasting: principles and practice. URL: <https://otexts.com/fpp2> (дата обращения 12.12.2019).
12. Jabbarova K.I., Huseynov O.H. Forecasting petroleum production using chaos time series analysis and fuzzy clustering // ICTACT Journal on Soft Computing. – 2014. – V. 4. – Iss. 4. – P. 791–795.

13. Sarhani M., El Afia A. Electric load forecasting using hybrid machine learning approach incorporating feature selection // Proc. of the International Conference on Big Data Cloud and Applications. – Tetuan, Morocco, May 25–26, 2015. – P. 1–7.
14. ARIMA Model, Neural Networks and SSA in the Short Term Electric Load Forecast / K. Cassiano, M. Menezes, L.A. Junior, J. Pessanha, Raf. Souza, R. Souza // Economic Forecasting – Past, Present and Future: International Symposium of Forecasting ISF. – Rotterdam, 2014. – P. 1–23.
15. Тугашова Л.Г. Прогнозирование показателей качества нефтепродуктов на установках первичной переработки нефти // Ученые записки Альметьевского государственного нефтяного института. – 2015. – Т. 14. – С. 99–103.
16. Жуков И.В., Харазов В.Г. Результаты поэтапной модернизации и эксплуатации усовершенствованной системы управления (АРС-системы) // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2017. – № 41 (67). – С. 105–112.
17. Complex method of petroleum products demand forecasting considering economic, demographic and technological factors / T. Mitrova, V. Kulagin, D. Grushevenko, E. Grushevenko, A. Galkina // Economics and Business Letters. – 2015. – № 4 (3). – P. 98–107.
18. Cavallo A.J. Hubbert's petroleum production model: an evaluation and implications for World Oil Production Forecasts // Natural Resources Research. – 2004. – V. 13. – № 4. – P. 211–221.
19. Hook M. Depletion and decline curve analysis in crude oil production. – Uppsala: Uppsala University, 2009. – 112 p.
20. Кирхмеев Л.В., Бекеев Р.С. Моделирование и прогнозирование динамики производства нефтепродуктов в России // Молодой ученый. – 2015. – № 21. – С. 391–395.
21. Федеральная служба государственной статистики РФ. URL: <http://www.gks.ru> (дата обращения 12.12.2019).
22. Единая межведомственная информационно-статистическая система (ЕМИСС). URL: <https://www.fedstat.ru/indicators> (дата обращения 12.12.2019).
23. Афанасьев В.Н., Юзбашев М.М. Анализ временных рядов и прогнозирование. – М.: Финансы и статистика, 2001. – 228 с.
24. Ефимова М.Р. Статистика. – М.: ИНФРА-М, 2006. – 336 с.
25. Затонский А.В., Тугашова Л.Г. Моделирование объектов управления в MatLab. СПб.: Изд-во «Лань», 2019. – 144 с.

Поступила 05.05.2020 г.

#### Информация об авторах

**Тугашова Л.Г.**, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры автоматизации и информационных технологий Альметьевского государственного нефтяного института.

**Затонский А.В.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов Пермского национального исследовательского политехнического университета Березниковского филиала.

UDC 681.5

## MODELING AND FORECASTING OF PETROLEUM PRODUCTS PRODUCTION TAKING INTO ACCOUNT SEASONALITY ON THE BASIS OF AUTOREGRESSIVE MODELS

Larisa G. Tugashova<sup>1</sup>,  
tugashowa.agni@yandex.ru

Andrei V. Zatonkiy<sup>2</sup>,  
z Xenon@narod.ru

<sup>1</sup> Almeteyevsk State Oil Institute,  
2, Lenin street, Almeteyevsk, 423450, Russia.

<sup>2</sup> Perm National Polytechnic Research University Berezniki Branch,  
7, Telman street, Berezniki, 618404, Russia.

**The relevance.** Motor gasoline, diesel fuel and other oil products differ in seasonality of consumption, a way of transportation, the territory of realization. The change in demand for petroleum products under the influence of these factors leads to a change in the range and volume of production of various fuels. In this regard, the actual task is to plan the production of petroleum products. It is proposed to solve the problem of predicting the production of petroleum products using autoregressive models taking into account the seasonality factor.

**The main aim** of the research is to develop and select mathematical models suitable for forecasting generation and consumption of petroleum products production.

**Objects:** production of petroleum products. The models are based on the data of a single interdepartmental information and statistical system.

**Methods** are based on the use of methods of mathematical and simulation modeling.

**Results.** The authors have carried out the review of methods of modeling time series of production and consumption of fuel and energy resources. It compares various mathematical models for forecasting the production of motor gasoline through the example of the Volga federal district. The authors developed the models that differ in consideration of the seasonal components and the type of trend. The use of a multiplicative model containing a trend in the form of a linear, autoregressive, autoregressive-power model with the calculation of the seasonality index is proposed. The article shows that the best results as per the criterion of the average relative error were obtained using the model with autoregressive-power trend. The efficiency of the obtained model is shown on the example of federal districts of the Russian Federation to assess the production of motor gasoline and diesel fuel. The research results were obtained using the Matlab software package. The authors made post-forecast production of fuels according to the proposed model with an average relative error not exceeding 11 %.

### Key words:

Petroleum product, multiplicative model, production, time series, seasonality index, quality indicators.

### REFERENCES

- Dmitrievsky B.S., Zatonkiy A.V., Tugashova L.G. Task of managing the process of rectification of oil and method of its solution. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 2, pp. 136–145. In Rus.
- Eder L.V., Filimonova I.V., Provornaya I.V., Mishenin M.V. Dynamics of domestic consumption and export of oil and oil products in Russia. *Ecological Bulletin of Russia*, 2018, no. 2, pp. 1–9. In Rus.
- Totkalo G.V., Khripunova A.S. Some approaches to demand forecasting in the oil market. *Bulletin of University (State University of management)*, 2015, no. 8, pp. 75–79. In Rus.
- Makarov A.A., Grigoriev L.M., Mitrova T.A. *Evolutsiya mirovykh energeticheskikh rynkov i ee posledstviya dlya Rossii* [Evolution of world energy markets and its consequences for Russia]. Moscow, ERI RAS-ATS under the Government of the Russian Federation Publ., 2015. 400 p.
- We'll see. *Post-release of the 10<sup>th</sup> international conference «Motor fuels 2018»*. *World of petroleum products. Bulletin of oil companies*, 2018, no. 7, pp. 44–46.
- Cybatov V.A., Vazhenina L.V. Methodical approaches to the analysis and forecasting of development of fuel and energy complex in the region. *Regional Economy. Industry and inter-industry complexes*, 2014, no. 4, pp. 188–199. In Rus.
- Tugashova L.G. Primenenie filtra Kalmana dlya identifikatsii parametrov protsessov neftepererabotki [Application of the Kalman filter for identifying the parameters of the refining processes]. *Virtualnoe modelirovanie, prototipirovanie i promyshlenny dizayn* [Virtual modeling, prototyping and industrial design]. Tambov, 2018. pp. 602–606.
- Chakra N.C.C., Saraf D.N., Song K.Y., Gupta M.M. Production forecasting of petroleum reservoir applying Higher-Order Neural Networks (HONN) with limited reservoir data. *International Journal of Computer Applications*, 2013, vol. 72, no. 2, pp. 23–35.
- Ba D., Shi G. R. Forecasting petroleum production using the time-series prediction of artificial neural network. *Advances in Petroleum Exploration and Development*, 2015, vol. 10, no. 2, pp. 1–6.
- Uri N.D., Flanagan St.P. Short-term forecasting of crude petroleum and natural gas production. *Applied Energy*, 1979, vol. 5 (4), pp. 297–310.
- Hyndman R.J., Athanasopoulos G. *Forecasting: principles and practice*. Available at: <https://otexts.com/fpp2> (accessed 12 December 2019).
- Jabbarova K.I., Huseynov O.H. Forecasting petroleum production using chaos time series analysis and fuzzy clustering. *ICTACT Journal on Soft Computing*, 2014, vol. 4, Iss. 4, pp. 791–795.
- Sarhani M., El Afia A. Electric load forecasting using hybrid machine learning approach incorporating feature selection. *Proc. of the International Conference on Big Data Cloud and Applications*. Tetuan, Morocco, May 25–26, 2015. pp. 1–7.
- Cassiano K., Menezes M., Junior L.A., Pessanha J., Souza Raf., Souza R. ARIMA Model, Neural Networks and SSA in the Short Term Electric Load Forecast. *Economic Forecasting – Past, Present and Future: International Symposium of Forecasting ISF*. Rotterdam, 2014. pp. 1–23.
- Tugashova L.G. Prediction of quality parameters of oil products at primary oil refining. *Scientific notes of Almeteyevsk state oil Institute*, 2015, vol. 14, pp. 99–103. In Rus.
- Zhukov I.V., Kharazov V.G. Results of stage-by-stage modernization and operation of the improved control system (APC-system).

- Proceedings of the St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)*, 2017, no. 41 (67), pp. 105–112. In Rus.
17. Mitrova T., Kulagin V., Grushevenko D., Grushevenko E., Galkina A. Complex method of petroleum products demand forecasting considering economic, demographic and technological factors. *Economics and Business Letters*, 2015, no. 4 (3), pp. 98–107.
  18. Cavallo A.J. Hubbert's petroleum production model: an evaluation and applications for World Oil Production Forecasts. *Natural Resources Research*, 2004, vol. 13, no. 4, pp. 211–221.
  19. Hook M. *Deployment and decline curve analysis in crude oil production*. Uppsala, Uppsala University, 2009. 112 p.
  20. Kirchmer L.V., Bekeev R.S. Modeling and forecasting of dynamics of production of oil products in Russia. *Young scientist*, 2015, no. 21, pp. 391–395. In Rus.
  21. *Federalnaya sluzhba gosudarstvennoy statistiki RF* [Federal state statistics service of the Russian Federation]. Available at: <http://www.gks.ru> (accessed 12 December 2019).
  22. *Edinaya mezhdomstvennaya informatsionno-statisticheskaya sistema* [Unified interdepartmental information and statistics system (EMISS)]. Available at: <https://www.fedstat.ru/indicators> (accessed 12 December 2019).
  23. Afanasiev V.N., Yuzbashev M.M. *Analiz vremennykh ryadov i prognozirovaniye* [Time series analysis and forecasting]. Moscow, Finance and statistics Publ., 2001. 228 p.
  24. Efimova M.R. *Statistika* [Statistics]. Moscow, INFRA-M Publ., 2006. 336 p.
  25. Zatonkiy A.V., Tugashova L.G. *Modelirovaniye obektov upravleniya v MatLab* [Modelling of control objects in MatLab]. St-Petersburg, LAN Publ. house, 2019. 144 p.

Received: 5 May 2020.

#### Information about the authors

**Larisa G. Tugashova**, Cand. Sc., senior lecturer, Almeteyevsk State Oil Institute.

**Andrei V. Zatonkiy**, Dr. Sc., head of department, Perm National Polytechnic Research University Berezniki Branch.

УДК 622.276.53.054.4

## ВЛИЯНИЕ ГЕОЛОГО-ТЕХНИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА НАГРУЗКИ И УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ В ШТАНГОВОЙ КОЛОННЕ ВИНТОВЫХ НАСОСОВ

Уразаков Камил Рахматуллович<sup>1</sup>,  
urazakk@mail.ru

Латыпов Булат Маратович<sup>1</sup>,  
bulatti@hotmail.com

<sup>1</sup> Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Россия, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью повышения надежности и ресурса штанговых винтовых насосных установок, используемых для осложненных условий эксплуатации скважин, поскольку они имеют низкую надежность в сравнении с электроцентробежными насосами, что ограничивает их применение. Винтовые насосные установки используются в скважинных условиях, характеризующихся высокой вязкостью откачиваемой пластовой жидкости (более 30 мПа·с) и высоким содержанием механических примесей в ней (коэффициент взвешенных частиц более 500 мг/литр). Опыт эксплуатации винтовых насосных установок показывает, что надежность насосных установок зависит в первую очередь от надежности штанговой колонны. Помимо крутящей нагрузки, необходимой для передачи вращения от асинхронного двигателя к винтовому насосу, погруженному на расстояние более одного километра от устья скважины, штанговая колонна испытывает растягивающие нагрузки от веса насосных штанг и осевой нагрузки винтового насоса, а также изгибающие нагрузки, вызванные пространственным искривлением ствола скважины.

**Цель** исследования заключается в оценке влияния различных факторов эксплуатации на нагрузки, действующие на колонну насосных штанг в процессе эксплуатации скважины, а также на усталостную прочность насосных штанг.

**Методы:** методика расчета штанговых колонн винтовых насосных установок с учетом осевых, крутящих и изгибающих нагрузок, учитывающая процессы трения штанговой колонны о насосно-компрессорные трубы, возникающие от Эйлеровых сил прижатия штанг к трубам из-за пространственного искривления ствола скважины, реализованная на языке программирования Python; факторный анализ нагрузок, действующих на привод насосной установки.

**Результаты.** С помощью программного обеспечения, реализованного на языке программирования Python, произведены расчеты, показавшие влияние различных осложняющих факторов на величину нагрузок на штанговую колонну. Показано влияние нагрузок вследствие воздействия геолого-технических и технологических параметров на усталостную прочность насосных штанг. Разработанное программное обеспечение позволяет учесть степень влияния осложняющих факторов на стадии подбора компоновки винтовой насосной установки, а также в процессе эксплуатации и тем самым существенно увеличить межремонтный период работы штанговых винтовых насосных установок.

### Ключевые слова:

Добыча нефти, насосная штанга, винтовой насос, искривленная скважина, трение насосных штанг, python.

Установки штанговых винтовых насосов (УШВН) эксплуатируются уже более 30 лет. Они эксплуатируются в странах ОПЕК, в России, в Казахстане и многих других странах [1]. В течении 30 лет происходила модернизация как глубинного, так и поверхностного оборудования установки. До настоящего времени одним из наиболее часто выходящих из строя узлов установки остается штанговая колонна, особенно в искривленных скважинах [2, 3]. При эксплуатации УШВН в искривленных скважинах, штанговая колонна испытывает значительные крутящие, а также растягивающие и изгибающие нагрузки [3–5]. Кроме того, на этих участках в результате процессов граничного трения штанги подвержены интенсивному износу, особенно при наличии механических примесей [2, 6]. Основной задачей повышения надежности установки является правильный подбор как винтовой пары, так и колонны насосных штанг с учетом осложняющих эксплуатацию факторов [6, 7].

Условия работы штанговых колонн винтовых насосных установок во многом схожи с работой буровой колонны при роторном бурении. Влияние процессов граничного трения на энергетические за-

траты, возникающие при вращении буровой колонны в скважине, достаточно изучены. В работах А.Ш. Янтурина [8], С.А. Рекина [9], Л.Б. Хузиной и других [10] показано, что значения коэффициентов трения и энергетических затрат на вращение буровой колонны зависят от значения параметров упругодеформированного состояния буровой колонны. В то же время упругодеформированное состояние колонны штанг при эксплуатации УШВН и буровой колонны при роторном бурении отличаются. При эксплуатации УШВН колонна штанг находится полностью в подвешенном состоянии, а при роторном бурении нижняя часть буровой колонны находится в сжатом состоянии. Поэтому при бурении наибольший износ наблюдается в нижней, наиболее сжатой части буровой колонны и на участках искривления. При эксплуатации УШВН наибольший износ штанг наблюдается только на участках искривления скважины, при этом разница упругодеформированного состояния штанг и буровых труб существенно влияет на силу прижатия пар трения, а следовательно, и на процессы трения. Отличия работы буровой колонны и колонны насосных штанг приводят к необ-

ходимости детального исследования процессов граничного трения, возникающих при эксплуатации УШВН.

В работе [11] показано, что в процессе эксплуатации насосных штанг как для установок штанговых скважинных насосов (УШСН), так и для УШВН, значения коэффициентов трения в процессе приработки несколько снижаются и через некоторое время стабилизируются.

В отличие от рассмотренных исследований, в работе [12] для штанговой колонны в составе УШСН показано, что значения коэффициента трения штанговой колонны о трубы зависят от безразмерного числа Зоммерфельда, определяемого по зависимости (1):

$$So = \frac{\mu \times V}{N}, \quad (1)$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость жидкости (смазки), Па·с;  $N$  – прижимающая нагрузка контактирующих тел, Н/м.

Поэтому процессы трения, возникающие при контакте штанговой колонны со стенками НКТ, необходимо рассматривать с учетом силы их прижатия и относительной скорости их перемещения, а также вязкости среды, в которой происходит взаимодействие.

В работе [13] получены зависимости коэффициентов трения штанговых муфт о трубы во времени. Ими же получены зависимости значения коэффициентов трения штанговых муфт о трубы в зависимости от значения числа Зоммерфельда (в диапазоне от 0, до  $40 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{So}$ ), согласно которым при росте числа Зоммерфельда величина коэффициента трения сначала падает со значения  $\approx 0,3$  до  $\approx 0,15$ , а затем постепенно растет до значения  $\approx 0,5$ . Однако полученная зависимость определена для ограниченного диапазона чисел Зоммерфельда и не покрывает весь диапазон значений, характерных при эксплуатации УШВН. На основании этого было проведено комплексное экспериментальное исследование зависимостей коэффициентов трения от числа Зоммерфельда [14]. Полученная зависимость для пар трения муфта–труба и штанга–труба при вращательном движении представлена ниже

$$f = \exp(a + b \cdot \ln(100 \cdot \sqrt{So})). \quad (2)$$

Коэффициенты к регрессионной зависимости (2) приведены в работе [14].

При расчете штанговых колонн в искривленных скважинах коэффициенты трения необходимо учитывать при определении осевой и крутящей нагрузки. Разработанная методика расчета штанговых колонн в работе [15] не позволяет рассчитать штанговую колонну с учетом азимутальных углов искривления. Кроме того, расчеты по разработанной методике трудоемки, поэтому была поставлена задача доработки методики расчета и реализация ее на языке программирования Python.

В отличие от методики, представленной в работе [15], для расчета параметров в уравнениях (3)–(9) использовались уточненные зависимости.

Изменение осевой нагрузки в каждой точке определялось дифференциальным уравнением:

$$\frac{dT}{dS} = q \cdot \cos(\alpha) - f \cdot N, \quad (3)$$

где  $q$  – вес одного метра штанг, Н/м;  $\alpha$  – зенитный угол, °;  $f$  – коэффициент трения штанг о трубы;  $N$  – прижимающая сила, Н;  $dS$  – изменение расстояния, м.

Прижимающая сила насосных штанг к насосно-компрессорным трубам  $N$  определялась как [12]:

$$N = \sqrt{\left(T_e \frac{d\alpha}{dS} - \lambda q \cdot \sin(\alpha)\right)^2 + \left(T_e \cdot \sin(\alpha) \frac{d\varphi}{dS}\right)^2}, \quad (4)$$

где  $T_e$  – осевая сила, Н;  $\lambda = 1 - \rho_{ж}/\rho_{ст}$  – коэффициент Архимеда;  $\varphi$  – азимутальный угол оси скважины, °.

Для определения значений осевых усилий необходимо знать граничные условия к уравнению (2). В данном случае граничным условием будет осевая нагрузка, возникающая в роторе насоса при работе винтового насоса.

Нагрузка на ротор насоса при работе УШВН определялась по зависимости, учитывающей эффективную площадь поверхности ротора, на которую воздействует давление столба жидкости [16].

Определение изгибающих нагрузок и оценка их влияния на усталостную прочность были выполнены с учетом работ [17, 18].

Изгибающий момент в каждой точке скважины определялся с учетом радиуса искривления, определяемого по зависимости вида [19]:

$$R = \frac{\Delta L}{2 \cdot \sin(DL)}, \quad (5)$$

где  $DL$  – угол искривления в пространстве;  $\Delta L$  – шаг инклинометрии.

Угол искривления в пространстве определялся зависимостью [19]:

$$\cos(DL) = \cos(\Delta\alpha) - \sin(\alpha_1) \sin(\alpha_2) (1 - \cos(\Delta\varphi)). \quad (6)$$

Крутящий момент, необходимый для преодоления вязкого трения штанг в жидкости, определялся как [20]:

$$M_{тр} = \frac{10^{-2} \cdot d^3}{(D - d)} \cdot \mu_f \cdot L \cdot n \cdot \frac{\left(\frac{\mu_s}{\mu_f} - 1\right)}{\ln \frac{\mu_s}{\mu_f}}, \quad (7)$$

где  $L$  – длина насосных штанг, м;  $n$  – частота вращения, об/с;  $\mu_f$  – вязкость жидкости на входе в насос, мПа·с;  $d$  – диаметр насосных штанг, м;  $\mu_s$  – вязкость жидкости на устье скважины, мПа·с;  $D$  – диаметр НКТ, м.

Момент в насосе определялся суммой момента, затрачиваемого на подъем жидкости, и момента трения стального ротора о резиновый статор насоса. Момент, затрачиваемый на трение ротора винтового насоса в статоре, определяется как [21]:

$$M_{тр} = 1421,1 \cdot x^2 - 41,2 \cdot x, \quad (8)$$

где  $x$  – натяг ротора в эластомерной обкладке статоре, мм.

Необходимый напор (давление) жидкости, развиваемый насосом, может быть получен стандартными корреляциями течения жидкости в скважине либо задан. При откачке высоковязкой жидкости необходимо учесть потери на вязкое трение, например, по зависимости [20], которая выглядит как:

$$\Delta P_{mp} = \frac{7,05 \cdot 10^{-7}}{(D+d) \cdot (D-d)^3} \cdot Q \cdot \mu_f \cdot L \cdot \frac{\left(\frac{\mu_s}{\mu_f} - 1\right)}{\ln \frac{\mu_s}{\mu_f}}, \quad (9)$$

где  $D$  – внутренний диаметр НКТ, м;  $d$  – диаметр насосных штанг, м;  $Q$  – подача насоса, м<sup>3</sup>/сут;  $\mu_f$  – вязкость откачиваемой жидкости на входе в насос, мПа·с;  $\mu_s$  – вязкость жидкости на устье скважины, мПа·с;  $L$  – длина НКТ, м.

Программа работает следующим образом. На входе задаются исходные данные: геологические, параметры винтового насоса, конструкция скважины с инклинометрией. Далее пользователь может выбрать либо расчет напряжений в заданной штанговой колонне, либо подбор штанговой колонны по допускаемым напряжениям. На первом этапе расчета нагрузок определяются осевые и изгибающие нагрузки, затем с учетом вычисленных сил прижатия штанг к трубам определяются крутящие нагрузки. После определения всех нагрузок рассчитываются эквивалентные напряжения.

Подбор насосных штанг осуществляется циклическим изменением типоразмера насосных штанг до тех пор, пока расчетные напряжения не станут ниже допускаемых с учетом коэффициента запаса прочности, задаваемого пользователем.

#### Типовой расчет

В отличие от расчета штанговой колонны, предложенной в международном стандарте ISO 15136-1:2009 [22], в разработанной методике предлагается учитывать изгибающие нагрузки. Расчеты, проведенные для многих скважин, показывают необходимость учета изгибающих нагрузок.

В табл. 1 приведены исходные данные, необходимые для расчета.

На рис. 1 показаны результаты расчетов. На глубине 350–550 м в зоне ствола скважины с минимальными радиусами искривления ствола скважины возникает значительное повышение изгибающих напряжений, достигающих 40 МПа, что сопоставимо с величиной осевых нагрузок на штанговую колонну.

Для оценки влияния изгибающих напряжений на усталостную прочность был произведен расчет коэффициента запаса усталостной прочности при 10 млн циклов по методике [15]. Амплитуда крутящего момента была взята 10 % от номинального значения в соответствии с данными о неравномерности крутящего момента в винтовом насосе, представленными в работе [23]. Расчет приведен для насосных штанг из стали 40 с нормализацией. По рис. 2 видно, что минимальные коэффициенты запаса усталостной проч-

ности расположены на участке с минимальными радиусами изгиба ствола скважины.

**Таблица 1.** Исходные данные для расчета колонны насосных штанг

**Table 1.** Initial data for calculation of the sucker rod string

Показатель Parameter	Значение Value	Размерность Dimension
Подача насоса Pump rate	10	м <sup>3</sup> /сут m <sup>3</sup> /day
Диаметр вала насоса Pump rotor diameter	32	мм mm
Эксцентриситет винтовой пары насоса Screw pump eccentricity	4	мм mm
Давление на приеме насоса Pump intake pressure	4	МПа MPa
Давление на выкиде насоса Pump discharge pressure	12	МПа MPa
Внутренний диаметр НКТ Tubing inner diameter	62	мм mm
Частота вращения колонны штанг Rotation frequency of rod	100	об/мин rpm
КПД винтовой пары Efficiency of pump	90	%
Натяг Interference	0,2	мм mm
Длина колонны насосных штанг Rod string length	1000	м m
Диаметр насосных штанг Sucker rod diameter	25	мм mm
Вязкость жидкости на входе в насос Pump intake fluid viscosity	120	мПа·с mPa·s
Вязкость жидкости на устье скважины Fluid viscosity on the surface	480	мПа·с mPa·s
Средняя плотность откачиваемой жидкости Fluid density	846	кг/м <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>

**Таблица 2.** Исходные данные для факторного анализа влияния параметров насосной установки и свойств откачиваемой жидкости на крутящий момент привода

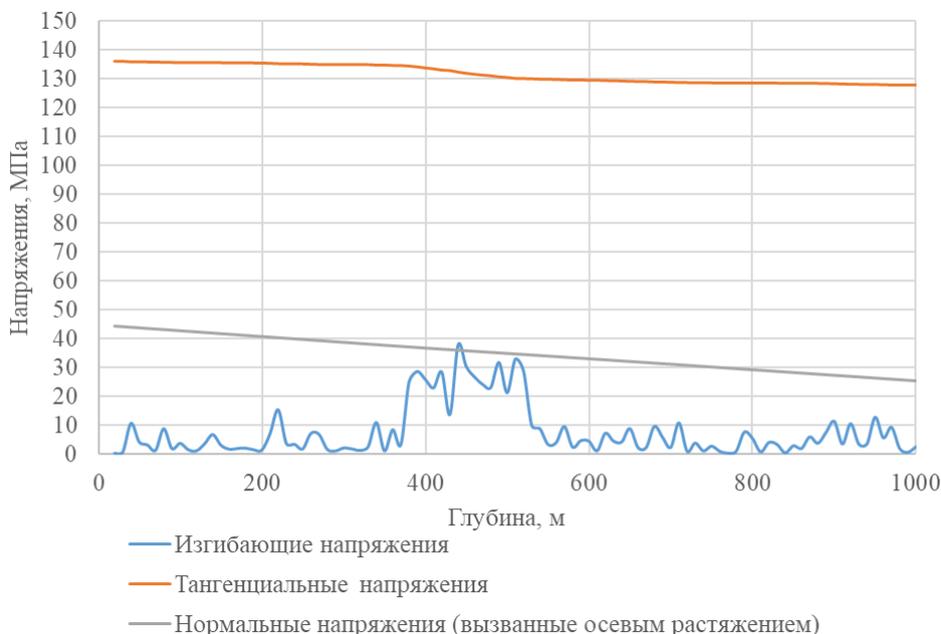
**Table 2.** Initial data for factor analysis of the influence of the parameters of the pumping unit and the properties of the pumped liquid on the drive torque

Параметры насосной установки Parameters of the pumping unit	Минимальное значение Minimum value	Максимальное значение Maximum value
Подача насоса, м <sup>3</sup> /сут Pump rate, m <sup>3</sup> /day	5	30
Вязкость жидкости, мПа·с Fluid viscosity, mPa·s	5	500
Плотность жидкости, кг/м <sup>3</sup> Fluid density, kg/m <sup>3</sup>	780	900
Диаметр ротора винтового насоса, мм Pump rotor diameter, mm	18	25
Эксцентриситет, мм Eccentricity, mm	4	7
Длина штанговой колонны, м Rod string length, m	600	1500
Перепад давления в насосе, Па Pump differential pressure, Pa	5000000	30000000
КПД насоса, % Efficiency, %	60	80
Натяг винтовой пары, мм Interference, mm	0,1	0,5

Для анализа влияния различных факторов эксплуатации на нагрузки в штанговой колонне были проведены серии расчетов (по 10000 расчетов). Варьируемыми параметрами были взяты основные факторы, влияющие на наработку винтовых насосных установок согласно исследованиям, приведенным в работе [6]: вязкость и частота вращения. Кроме того, для

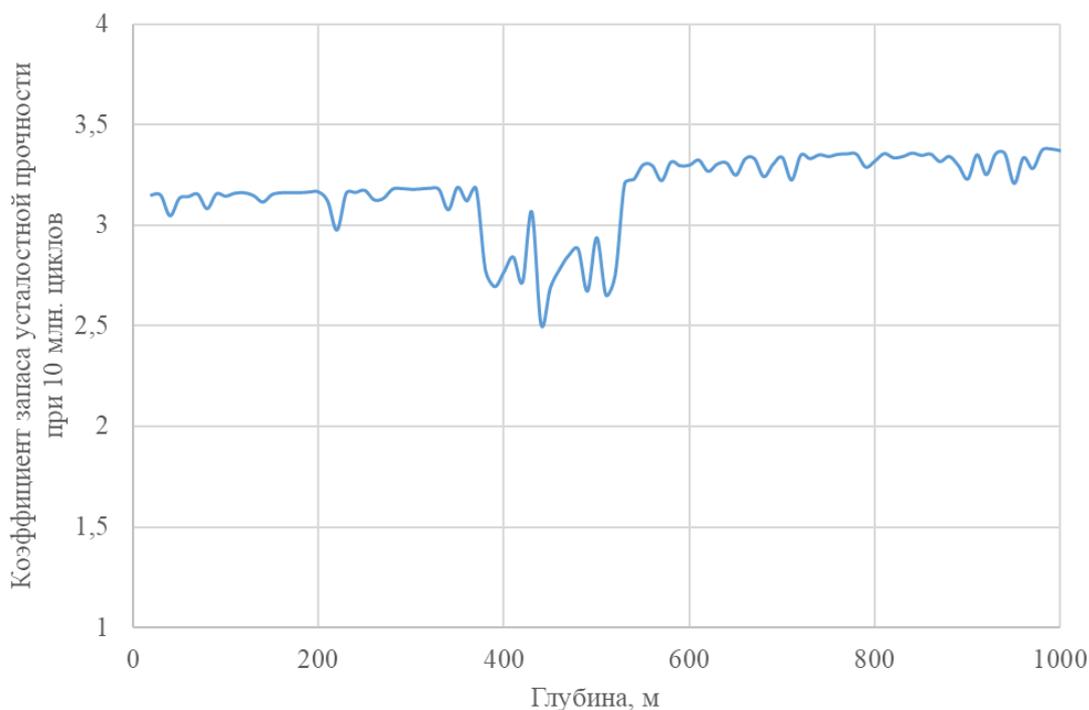
оценки работы винтового насоса выполнена серия расчетов по влиянию различных факторов на изменение осевой и крутящих нагрузок. Исходные данные для расчетов приведены в табл. 2.

В табл. 3 показана матрица корреляций параметров эксплуатации и характеристик насоса на осевую и крутящую нагрузку.



**Рис. 1.** Результаты расчетов колонны насосных штанг (распределение изгибающих, тангенциальных и нормальных напряжений по глубине колонны штанг)

**Fig. 1.** Results of calculations of the column of pump rods (dependency chart of bending, tangential and normal stresses along the depth of the sucker rod string)



**Рис. 2.** График распределения коэффициента запаса усталостной прочности (при 10 млн циклов нагружения) по глубине колонны штанг

**Fig. 2.** Graph of fatigue strength safety factor distribution (at 10 million loading cycles) along the depth of the rod string

**Таблица 3.** Матрица корреляций влияния параметров насосной установки и свойств откачиваемой жидкости на крутящий момент привода

**Table 3.** Correlation matrix of the influence of the pumping unit parameters and the properties of the pumped liquid on the drive torque

Параметры насосной установки Parameters of the pumping unit	Длина колонны штанг Rod string length	Диаметр ротора насоса Pump rotor diameter	Плотность жидкости Fluid density	КПД насоса Efficiency	Эксцентриситет Eccentricity	Частота вращения Rotation frequency	Перепад давления через насос Pump differential pressure	Вязкость жидкости Fluid viscosity	Подача насоса Pump rate	Напряг винтовой пары Interference	Крутящий момент Torque	Осевая нагрузка Axial load
Крутящий момент Torque	0,26	0,00	0,01	-0,04	0,01	0,17	0,23	0,37	0,09	0,84	1,00	0,22
Осевая нагрузка Axial load	0,83	0,42	-0,01	-0,02	0,22	0,01	0,84	0,01	0,00	-0,01	0,22	1,00

По табл. 3 видно, что наибольшее влияние на крутящий момент привода установки влияет длина колонны насосных штанг, перепад давления через насос, частота вращения, вязкость откачиваемой жидкости, натяг винтовой пары и осевая нагрузка. Наибольшее влияние на осевую нагрузку оказывает длина колонны насосных штанг, диаметр ротора насоса, эксцентриситет, перепад давления через насос и крутящий момент привода.

Для оценки влияния режимных параметров эксплуатации скважины на величину нагрузок были построены линейные регрессии (10) и (11).

Линейная регрессия (10) влияния длины колонны насосных штанг  $L$ , диаметра ротора насоса  $D$ , эксцентриситета  $e$ , перепада давления через насос  $\Delta P$  и крутящего момента привода  $M$  на осевую нагрузку  $A$  представлена в виде (коэффициент детерминации 0,967):

$$A = -60577 + 18,68 \cdot L + 2,096 \cdot 10^6 \cdot D + 1,995 \cdot 10^6 \cdot e + 1,548 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta P + 2,545 \cdot M. \quad (10)$$

Поскольку длина колонны насосных штанг, диаметр винта и эксцентриситет ротора в статоре для эксплуатируемой скважины постоянны, изменение осевой нагрузки на привод установки будет зависеть преимущественно от перепада давления и крутящего момента.

При наличии датчика осевой нагрузки на приводе насосной установки полученная зависимость позволяет оценить изменение перепада давления, интенсивный рост нагрузки может свидетельствовать об увеличении перепада давления, которое возникает при снижении динамического уровня жидкости в скважине. Тем самым наличие датчика осевых усилий позволит сигнализировать о необходимости привлечения оператора добычи нефти и газа для замеров динамического уровня, и позволит своевременно изменить режим работы установки при возникновении аварийной ситуации. Кроме того, данная зависимость может быть использована для более точного прогнозирования дебита при использовании моделей, предложенных в работах [24–26].

Линейная регрессия (11) влияния длины колонны насосных штанг  $L$ , частоты вращения  $n$ , перепада

давления через насос  $\Delta P$ , вязкости жидкости  $\mu$ , натяга  $T$  и осевой нагрузки  $A$  на крутящий момент привода  $M$  представлена в виде (коэффициент детерминации 0,938):

$$P = -344,91 + 0,126 \cdot L + 0,759 \cdot n + 2,715 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta P + 0,347 \cdot 10^6 \cdot \mu + 972,818 \cdot T + 1,498 \cdot 10^{-4} \cdot A. \quad (11)$$

Поскольку длина колонны насосных штанг для эксплуатируемой скважины постоянная, при неизменной частоте вращения изменение крутящего момента в приводе установки зависит от перепада давления, вязкости жидкости и натяга ротора в статоре.

При наличии моментомера на приводе установки либо при пересчете показателей потребляемого электрического тока, при известной вязкости жидкости и перепада давления по полученной зависимости можно определить натяг винтовой пары, свидетельствующий о техническом состоянии насоса, излишний натяг свидетельствует о набухании эластомера, уменьшение натяга свидетельствует об износе винтовой пары. Использование зависимостей из работ [27, 28] позволит более точно спрогнозировать наработку винтовой пары насоса.

#### Заключение

Предложенный комплексный метод анализа влияния осложняющих факторов на усталостную прочность штанговой колонны винтовых насосов позволяет учесть их степень на стадии проектирования и тем самым существенно увеличить межремонтный период работы скважин.

Получены зависимости параметров эксплуатации скважины на нагрузки, испытываемые приводом штангового насоса, что позволяет оценить техническое состояние винтового насоса и контролировать динамический уровень в скважине.

Разработанное программное обеспечение позволяет оперативно производить подбор компоновки равнопрочной штанговой колонны с учетом геолого-технических особенностей конкретной скважины.

Данная работа выполнена при поддержке гранта «УМНИК» № 11639ГУ/2017.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dunn L. Progressing cavity pumping systems overview with a focus on coal seam gas applications // Social Petroleum Engineers Queensland Brisbane Conference. – Society of Petroleum Engineers, March 9, 2015. URL: <https://www.spe-qld.org/useruploads/files/pcpspeaustraliafinalv1.pdf> (дата обращения 20.12.2019).
2. Латыпов Б.М. Установка штангового винтового насоса для добычи нефти в осложненных условиях // Нефтегазовое дело. – 2012. – Т. 10. – № 1. – С. 13–15.
3. Use of run-life measures in estimating artificial lift system reliability / P. Skoczylas, F. Alhanati, J. Sheldon, F. Trevisan // SPE Artificial Lift Conference and Exhibition-Americas. – Society of Petroleum Engineers, 2018. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-190962-MS> (дата обращения 20.12.2019).
4. Балденко Ф.Д., Кривенков С.В., Протасов В.Н. Монтаж и эксплуатация скважинных штанговых винтовых насосных установок. – М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2017. – 45 с.
5. Валовский В.М. Винтовые насосы для добычи нефти. – М.: Изд-во «Нефтяное хозяйство», 2012. – 248 с.
6. Влияние условий эксплуатации на наработку штанговых винтовых насосных установок / Б.М. Латыпов, А.С. Топольников, А.Г. Комков, Р.Р. Исмагилов // Нефтегазовое дело. – 2016. – Т. 14. – № 2. – С. 55–60.
7. Quick look methodology for progressive cavity pump sizing and performance monitoring / N. Agrawal, R. Baid, L. Mishra, P. Ghosh, M. Kushwaha // SPE Oil & Gas India Conference and Exhibition. – Society of Petroleum Engineers, 2015. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-178097-MS> (дата обращения 20.12.2019).
8. О методах расчета осевой нагрузки в колоннах штанг, бурильных, обсадных и насосно-компрессорных труб / Р.А. Янтурин, А.Ф. Зайнуллин, А.Ш. Янтурин, А.Х. Габзалилова // Нефтяное хозяйство. – 2012. – № 1. – С. 88–91.
9. Рекин С.А., Янтурин А.Ш. Устойчивость, упругая деформация, износ и эксплуатация бурильных и обсадных колонн (механика системы «колонна–скважина–пласт»): монография. – СПб.: Недра, 2005. – 460 с.
10. Хузина Л.Б., Петрова Л.В. Методы снижения сил трения при разработке месторождений горизонтальными скважинами // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». – 2012. – № 5. – С. 62–68.
11. Зубаиров С.Г. Исследование закономерностей изменения сил трения насосных штанг о трубы в процессе эксплуатации // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 1999. – № 5. – С. 20–24.
12. Уразаков К.Р. Эксплуатация наклонно направленных скважин. – М.: Недра, 1993. – 169 с.
13. Экспериментальные исследования коэффициента трения штанговых муфт о трубы / М.Д. Валеев, М.В. Ахметзянов, И.Р. Саттаров, А.Г. Газаров, А.М. Бадретдинов // Нефтепромысловое дело. – 2011. – № 3. – С. 29–31.
14. Уразаков К.Р., Латыпов Б.М., Исмагилов Р.Р. Экспериментальные исследования коэффициента трения элементов штанговой колонны винтовых насосных установок // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2015. – № 3. – С. 256–270. URL: [http://ogbus.ru/issues/3\\_2015/ogbus\\_3\\_2015\\_p256-270\\_UrazakovKR\\_ru.pdf](http://ogbus.ru/issues/3_2015/ogbus_3_2015_p256-270_UrazakovKR_ru.pdf) (дата обращения 20.12.2019).
15. Уразаков К.Р., Латыпов Б.М., Исмагилов Р.Р. Методика расчета штанговых колонн для винтовых насосных установок // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2015. – № 4. – С. 72–94. URL: [http://ogbus.ru/issues/4\\_2015/ogbus\\_4\\_2015\\_p72-94\\_UrazakovKR\\_ru.pdf](http://ogbus.ru/issues/4_2015/ogbus_4_2015_p72-94_UrazakovKR_ru.pdf) (дата обращения 20.12.2019).
16. Alhanati F., Skoczylas P. PCP axial load: theory and lab results // Social Petroleum Engineers Annual Technical Conference and Exhibition. – Society of Petroleum Engineers, 2004. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-90153-MS> (дата обращения 20.12.2019).
17. Skoczylas P. Drive string fatigue in PCP applications // Social Petroleum Engineers Artificial Lift Conference & Exhibition-North America. – Society of Petroleum Engineers, 2014. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-171352-MS> (дата обращения 20.12.2019).
18. System run life improvement for rod driven PCP in high deviation well / S. Khadav, S. Agarwal, P. Kumar, N. Pandey, A. Parasher, S. Kumar, V. Agarwal, S. Tiwari // Social Petroleum Engineers Artificial Lift Conference and Exhibition-Americas. – Society of Petroleum Engineers, 2018. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-190948-MS> (дата обращения 20.12.2019).
19. Amarin R., Broni-Bediako E. Application of minimum curvature method to wellpath calculations // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. – 2010. – V. 2. – № 7. – P. 679–686.
20. Cholet H. Progressing cavity pumps. – Paris: Editions Technip., 1997. – 112 p.
21. Three dimensional dynamics simulation of progressive cavity pump with stator of even thickness / Z. Zhou, X.C. Shi, G.G. Cao, C.L. Sun, Y. H., L. Holiday, W. Hanfu // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2013. – V. 106. – P. 71–76.
22. Standard I.S.O. 15136-2, Downhole equipment for petroleum and natural gas industries: progressing cavity pump systems for artificial lift. P. 2: Surface-drive systems. – Geneva: ISO copyright office, 2006. – 49 p.
23. Балденко Ф.Д., Балденко Ф.Д., Гноевых А.Н. Одновинтовые гидравлические машины. В 2 т. Т. 1. Одновинтовые насосы. – М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2005. – 488 с.
24. Andrianov N. A machine learning approach for virtual flow metering and forecasting // IFAC-PapersOnLine. – 2018. – V. 51. – № 8. – P. 191–196.
25. Al-Safran E., Aql A., Nguyen T. Analysis and prediction of fluid flow behavior in progressing cavity pumps // Journal of Fluids Engineering. – 2017. – V. 139. – № 12. URL: <https://doi.org/10.1115/1.4037057> (дата обращения 20.12.2019).
26. A novel digital approach to predict production rates from PCP wells / J. Alvarez, O. Espinola, C. Ramirez, A. Torres // Society of Petroleum Engineers. 2018. DOI: 10.2118/191228-MS. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-191228-MS> (дата обращения 20.12.2019).
27. Analysis of progressive cavity pumps specific wear processes using Finnie models / M. Popescu, A.I. Popovici, F.N. Petrescu, N.N. Antonescu // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2017. – V. 174. – № 1. – P. 012020. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/174/1/012020/pdf> (дата обращения 20.12.2019).
28. Analysis of progressive cavity pumps specific wear processes using Bitter and Hutchings models / M. Popescu, A.I. Popovici, F.N. Petrescu, N.N. Antonescu // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2017. – V. 174. – № 1. – P. 012022. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/174/1/012022/pdf> (дата обращения 20.12.2019).

Поступила 05.05.2020 г.

## Информация об авторах

**Уразаков К.Р.**, доктор технических наук, профессор кафедры машин и оборудования нефтегазовых промыслов Уфимского государственного нефтяного технического университета.

**Латыпов Б.М.**, кандидат технических наук, доцент кафедры машин и оборудования нефтегазовых промыслов Уфимского государственного нефтяного технического университета.

UDC 622.276.53.054.4

## INFLUENCE OF OPERATING CONDITIONS ON LOADS AND FATIGUE STRENGTH IN A ROD COLUMN OF PCP

**Kamil R. Urazakov<sup>1</sup>,**  
urazakk@mail.ru

**Bulat M. Latypov<sup>1</sup>,**  
bulatti@hotmail.com

<sup>1</sup> Ufa State Petroleum Technological University,  
1, Cosmonavtov street, Ufa, 450062, Russia

**The relevance** of the research is caused by the need to increase the reliability and resource of progressing cavity pumps, used in complicated well operating conditions, since they have low reliability in comparison with electrical submersible pumps, that limits their application. Progressing cavity pumps are used in well conditions characterized by a high viscosity of the pumped fluid (more than 30 mPa·s) and a high content of solid particles in it (the coefficient of suspended particles is more than 500 mg/liter). Experience in operating progressing cavity pumps shows that the reliability of pumping installations depends primarily on the reliability of the rod string. In addition to the torque load required to transfer the rotation from the induction motor to the screw pump, immersed on more than one kilometer from the wellhead, the sucker string experiences tensile loads from the weight of the pump rods and the axial load of the screw pump, as well as bending loads caused by the spatial curvature of the wellbore. The paper proposes the implementation of methodology for calculating the sucker rod columns of progressing cavity pumps with regard to axial, torsional and bending loads in the Python programming language. The proposed method for calculating the rod column of a screw pumping unit takes into account the rod column friction on tubing pipes arising from the Eulerian forces pressing the rods to the pipes due to the spatial curvature of the wellbore. Using software implemented in the python programming language, the authors have made calculations that showed the influence of various complicating factors on the magnitude of the loads on the rod string. As a result of calculations of the fatigue strength of the pump rods, cyclic loads during the rotation of the rods in the local sections of the local curvature of the wellbore was shown. The developed software allows you to take into account the degree of influence of complicated well operating conditions at the design stage, and thus, significantly increase the turnaround time of the rod screw pumping units.

**The main aim** of the research is to assess the influence of various operating factors on the loads acting on the string of pump rods during well operation, as well as on the fatigue strength of the pump rods.

**Methods.** Using software implemented in the python programming language, calculations were performed that showed the influence of various complicating factors on the magnitude of the loads on the rod string. The paper demonstrated the effect of loads on the fatigue strength of sucker rods caused by cyclic loads during rotation of the rods in the areas of local curvature of the wellbore. The developed software allows taking into account the degree of influence of complicating factors at the stage of selecting the layout of a PCP, as well as during operation, and thereby significantly increasing the overhaul period of PCP operation.

### Key words:

Oil production, sucker rod, progressing cavity pump, inclined well, friction, Python.

The research was supported by the grant «UMNIK» no. 11639TV/2017.

### REFERENCES

- Dunn L. Progressing cavity pumping systems overview with a focus on coal seam gas applications. *SPE Queensland Brisbane Conference*. Brisbane (Australia), March 9, 2015. Available at: <https://www.spe-qlld.org/useruploads/files/pcpspeaustraliafinalv1.pdf> (accessed 20 December 2019).
- Latypov B.M. Progressing cavity pump for oil production in complicated operating conditions. *Petroleum engineering*, 2012, vol. 10, no. 1, pp. 13–15. In Rus.
- Skoczylas P., Alhanati F., Sheldon J., Trevisan F. Use of run-life measures in estimating artificial lift system reliability. *SPE Artificial Lift Conference and Exhibition-Americas*. Society of Petroleum Engineers, 2018. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-190962-MS> (accessed 20 December 2019).
- Baldenko F.D., Krivenkov S.V., Protasov V.N. *Montazh i ekspluatatsiya skvazhinnykh shtangovykh vintovykh nasosnykh ustanovok* [Installation and operation of progressing cavity pump]. Moscow, RSU of oil and gas named after I.M. Gubkin Publ., 2017. 45 p.
- Valovskiy V.M. *Vintovye nasosy dlya dobychi nefi* [Progressing cavity pump for oil production]. Moscow, Neftyanoe khozyaystvo Publ., 2012. 248 p.
- Latypov B.M., Topolnikov A.S., Komkov A.G., Ismagilov R.R. The influence of operating conditions on the operating time of progressing cavity pump. *Petroleum engineering*, 2016, vol. 14, no. 2, pp. 55–60. In Rus.
- Agrawal N., Baid R., Mishra L., Ghosh P., Kushwaha M. Quick look methodology for progressive cavity pump sizing and performance monitoring. *SPE Oil & Gas India Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers, 2015. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-178097-MS> (accessed 20 December 2019).
- Yanturin R. A., Zaynullin A.F., Yanturin A.Sh., Gabzalilova A.Kh. On methods for calculating axial load in drill string, drill, casing and tubing. *Oil industry*, 2012, no. 1, pp. 88–91. In Rus.
- Rekin S.A., Yanturin A.Sh. *Ustoychivost, uprugaya deformatsiya, iznos i ekspluatatsiya burilnykh i obsadnykh kolonn (mekhanika sistemy «kolonna-skvazhina-plast»): monografiya* [Stability, elastic deformation, wear, and operation of drill and casing strings (mechanics of the «column–well–formation» system): monograph]. St-Petersburg, Nedra Publ., 2005. 460 p.
- Khuzina L.B., Petrova L.V. *Metody snizheniya sil treniya sil treniya pri razrabotke mestorozhdeniy gorizontalnymi skvazhinami* [Methods of reducing friction when developing fields by horizontal wells]. *Setevoe izdanie «Neftegazovoe delo»*, 2012, no. 5, pp. 62–68.
- Zubairov S.G. The study of the laws of change in the friction forces of sucker rods on pipes during operation. *Letters of higher educational institutions. Oil and gas*, 1999, no. 5. pp. 20–24. In Rus.

12. Urazakov K.R. *Ekspluatatsiya naklonno napravlennykh skvazhin* [Oil production from directional wells]. Moscow, Nedra Publ., 1993. 169 p.
13. Valeev M.D., Akhmetzyanov M.V., Sattarov I.R., Gazarov A.G., Badretdinov A.M. Experimental studies of the coefficient of friction of rod couplings on pipes. *Oil field*, 2011, no. 3, pp. 29–31. In Rus.
14. Urazakov K.R., Latypov B.M., Ismagilov R.R. Experimental studies of the coefficient of friction of the elements of the rod string of screw pump units. *Oil and gas business*, 2015, no. 3, pp. 256–270. In Rus. Available at: [http://ogbus.ru/issues/3\\_2015/ogbus\\_3\\_2015\\_p256-270\\_UrazakovKR\\_ru.pdf](http://ogbus.ru/issues/3_2015/ogbus_3_2015_p256-270_UrazakovKR_ru.pdf) (accessed 20 December 2019).
15. Urazakov K.R., Latypov B.M., Ismagilov R.R. Methodology for calculating sucker rod string of progressing cavity pump. *Oil and gas business*, 2015, no. 4, pp. 72–94. In Rus. Available at: [http://ogbus.ru/issues/4\\_2015/ogbus\\_4\\_2015\\_p72-94\\_UrazakovKR\\_ru.pdf](http://ogbus.ru/issues/4_2015/ogbus_4_2015_p72-94_UrazakovKR_ru.pdf) (accessed 20 December 2019).
16. Alhanati F., Skoczylas P. PCP axial load: theory and lab results. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers, 2004. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-90153-MS> (accessed 20 December 2019).
17. Skoczylas P. Drive string fatigue in PCP applications. *SPE Artificial Lift Conference & Exhibition-North America*. Society of Petroleum Engineers, 2014. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-171352-MS> (accessed 20 December 2019).
18. Khadav S., Agarwal S., Kumar P., Pandey N., Parasher A., Kumar S., Agarwal V., Tiwari S. System run life improvement for rod driven PCP in high deviation well. *SPE Artificial Lift Conference and Exhibition-Americas*. Society of Petroleum Engineers, 2018. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-190948-MS> (accessed 20 December 2019).
19. Amarin R., Broni-Bediako E. Application of minimum curvature method to wellpath calculations. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 2010, vol. 2, no. 7, pp. 679–686.
20. Cholet H. *Progressing cavity pumps*. Paris, Editions Technip, 1997. 112 p.
21. Zhou Z., Shi X.C., Cao G.G., Sun C.L., Y H., Holiday L., Hanfu W. Three dimensional dynamics simulation of progressive cavity pump with stator of even thickness. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2013, vol. 106, pp. 71–76.
22. *Standard I.S.O. 15136-2, Downhole equipment for petroleum and natural gas industries: progressing cavity pump systems for artificial lift. P. 2: Surface-drive systems*. Geneva, ISO copyright office, 2006. 49 p.
23. Baldenko D.F., Baldenko F.D., Gnoevyh A.N. *Odnovintovye gidravlicheskie mashiny. T. 1. Odnovintovye nasosy* [Screw hydraulic machines V. 1. Screw pumps]. Moscow, IRC Gazprom Publ., 2005. 488 p.
24. Andrianov N. A machine learning approach for virtual flow metering and forecasting. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, vol. 51, no. 8, pp. 191–196.
25. Al-Safran E., Aql A., Nguyen T. Analysis and prediction of fluid flow behavior in progressing cavity pumps. *Journal of Fluids Engineering*, 2017, vol. 139, no. 12. Available at: <https://doi.org/10.1115/1.4037057> (accessed 20 December 2019).
26. Alvarez J., Espinola O., Ramirez C., Torres A. *A novel digital approach to predict production rates from PCP wells*. Society of Petroleum Engineers. DOI: 10.2118/191228-MS. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-191228-MS> (accessed 20 December 2019).
27. Popescu M., Popovici A.I., Petrescu F.N., Antonescu N.N. Analysis of progressive cavity pumps specific wear processes using Finnie models. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2017. Vol. 174, no. 1. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/174/1/012020/pdf> (accessed 20 December 2019).
28. Popescu M., Popovici A.I., Petrescu F.N., Antonescu N.N. Analysis of progressive cavity pumps specific wear processes using Bitter and Hutchings models. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2017. Vol. 174, no. 1. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/174/1/012022/pdf> (accessed 20 December 2019).

Received: 5 May 2020.

#### Information about the authors

**Kamil R. Urazakov**, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University.

**Bulat M. Latypov**, Cand. Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technological University.

УДК 534.29.66.084:534-18

## УЛЬТРАЗВУКОВАЯ КОАГУЛЯЦИЯ В СКРУББЕРАХ ВЕНТУРИ: ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Хмелев Владимир Николаевич<sup>1</sup>,  
vnh@bti.secna.ru

Шалунов Андрей Викторович<sup>1</sup>,  
shalunov@bti.secna.ru

Цыганок Сергей Николаевич<sup>1</sup>,  
grey@bti.secna.ru

Нестеров Виктор Александрович<sup>1</sup>,  
nva@bti.secna.ru

<sup>1</sup> Алтайский государственный технический университет,  
Россия, 659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27.

**Актуальность** исследования обусловлена экологическими требованиями к дымовым газам предприятий ТЭЦ и ТЭС, работающих на угле. Обеспечение экологических требований осуществляется с помощью ультразвуковой коагуляции твердых золовых частиц с каплями жидкости, которая реализуется в устройствах мокрой очистки газов – в скрубберах Вентури.

**Цель:** увеличение эффективности скрубберов Вентури для мокрой очистки газов за счет улучшения условия поглощения золовых частиц каплями жидкости в акустических полях, которые создаются при ультразвуковой коагуляции.

**Объекты:** процессы ультразвуковой коагуляции золовых частиц с каплями орошаемой жидкости в скруббере Вентури.

**Методы.** Теоретические методы основывались на численном решении уравнений, описывающих движение газодисперсного потока в скруббере Вентури и коагуляцию золовых частиц в акустическом поле. Экспериментальные результаты были получены при проведении промышленных испытаний на котлоагрегате БКЗ-220-100Ф ТЭЦ, работающем на угле Харанорского месторождения, по утвержденной стандартом методике РД 153-34.1-27.301-2001.

**Результаты.** Разработана физико-математическая модель, описывающая движение газодисперсного потока в скруббере и взаимодействие дисперсных частиц между собой в акустическом поле. Модель позволила рассчитать эффективность газоочистки в различных условиях и определить оптимальные режимы ультразвукового воздействия: уровень звукового давления не менее 145 дБ, частота 22 кГц, зона воздействия во всем объеме скруббера Вентури, направление акустического поля перпендикулярно потоку газа. Критериями оптимальности являлись максимальная эффективность коагуляции золовых частиц в скруббере Вентури и максимальная степень очистки дымовых газов. Проведены испытания созданного ультразвукового оборудования на котлоагрегате БКЗ-220-100Ф ТЭЦ в золоулавливающей установке: в акустическом поле уменьшается концентрация золовых частиц в отводящих газах до четырех и более раз (эффективность не менее 98 %), процентное содержание золовых частиц (размером менее 5 мкм) снижается до 15 раз.

### Ключевые слова:

Ультразвуковая коагуляция, акустическое поле, скруббер Вентури, звуковое давление, очистка газов, золовая частица.

### Введение

Для удаления твердых частиц из газообразных сред применяются разные подходы, а именно: фильтрация, электрическая очистка, сухая и мокрая очистка. Конструктивными особенностями аппаратов, которые реализуют способ мокрой очистки, является улавливание твердых частиц жидкостью (пленкой или каплями), пузырьками газа, при воздействии газового потока с поверхностью жидкости и последующим удалением из аппарата их в виде шлама. Одними из наиболее распространенных пылеуловителей являются скрубберы Вентури. Они характеризуются лучшей эффективностью для промышленной очистки газов среди устройств мокрого типа. Могут применяться для удаления высокодисперсной (субмикронной) пыли (твердых частиц) из газообразных сред для широкого диапазона ее начальных концентраций – 0,05–100 г/м<sup>3</sup> [1, 2].

Количество удаленных твердых частиц в скрубберах Вентури зависит от многих параметров: размера и дисперсного состава частиц; относительных скоро-

стей движения; скорости газового потока на входе в горловину; расхода орошаемой жидкости. При увлечении относительной скорости газового потока и расхода жидкости для орошения повышается степень очистки. Максимальная эффективность улавливания частиц размером 1–2 мкм в скрубберах Вентури может достигать 60–65 %.

Несмотря на высокое качество очистки, эффективность применяемых скрубберов Вентури в ряде случаев не удовлетворяет действующим экологическим требованиям по уровню выбросов вредных частиц в атмосферу. Главным образом это зависит от физических эффектов, реализуемых в аппаратах мокрой очистки, и также от степени захватывания высокодисперсных частиц газовым потоком. Как показали исследования [1–4], улучшение процесса мокрой очистки с целью повышения эффективности коагуляции твердых частиц (фактически повышения вероятности столкновения их с каплями орошаемой жидкости) достигается при помощи оптимизации режимных или конструктивных параметров скрубберов Вентури.

К сожалению, такой подход к совершенствованию не позволяют увеличить эффективность улавливания частиц размером менее 1–2 мкм.

Одним из перспективных подходов, который не обуславливает внесение изменений в технологические режимы работы оборудования для газоочистки и может применяться для увеличения эффективности улавливания высокодисперсных частиц каплями жидкости, является ультразвуковая коагуляция в акустическом поле высокой интенсивности [5–8]. Ультразвуковая коагуляция является процессом сближения и объединения взвешенных твердых частиц в газовом потоке при помощи дополнительного соударения. Оно обусловлено тем фактом, что твердым частицам придается дополнительное колебательное встречное движение. В конечном итоге это приводит к их укрупнению и более эффективному осаждению. Повышение эффективности газоочистки с помощью ультразвукового воздействия имеет ряд преимуществ [6, 9].

#### Физико-математическая модель и ее решение

Существует два механизма взаимодействия близкорасположенных твердых частиц, находящихся в акустическом поле [10–15]:

- ортокинетический – разная степень вовлечения твердых частиц в колебательный процесс, которая

зависит от их массы и диаметра: мелкие твердые частицы, совершающие колебательные движения, соударяются неподвижными каплями жидкости (рис. 1, а);

- гидродинамический – сближение твердых частиц с каплями жидкости под действием силы Осеена с последующей коагуляцией. Сила сближения возникает из-за асимметрии акустического поля, в котором находятся дисперсные частицы при ультразвуковом воздействии (рис. 1, б).

Вероятность столкновения частиц (зола и капля воды) в трубе Вентури прямо пропорциональна разности их скоростей движения. Наложение дополнительного колебательного движения на частицы приводит к увеличению их относительных скоростей движения и в итоге позволяет улучшить эффективность улавливания. Степень укрупнения частиц зола в акустическом поле определяется частотой ультразвукового воздействия и уровнем звукового давления, создаваемого при этом [6–8]. Таким образом, если накладывать акустическое поле на высокодисперсные частицы (размером менее 5 мкм), траектория движения которых практически совпадает с потоком газа и огибающих капли жидкости, то должно обеспечиваться улучшение условий их столкновения с каплями жидкости.

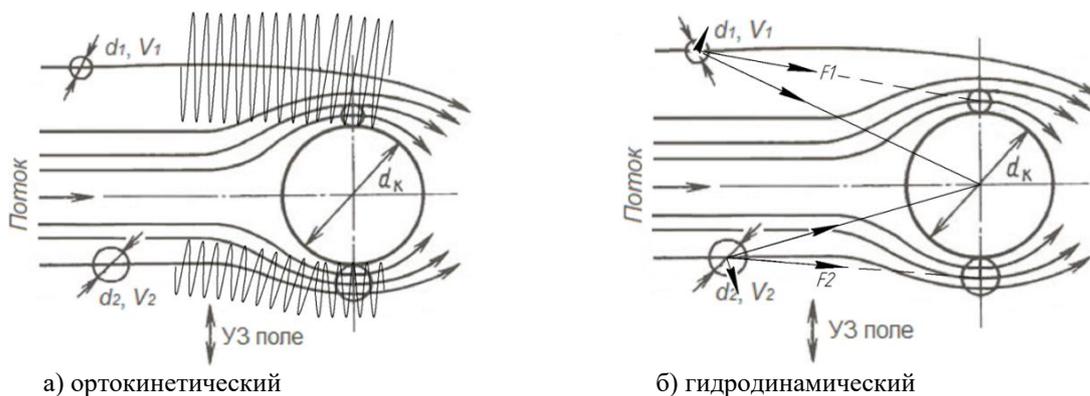


Рис. 1. Механизмы взаимодействия частиц, находящихся в акустическом поле:  $d_1, d_2$  – диаметры частиц;  $v_1, v_2$  – скорости частиц;  $d_k$  – диаметр капли;  $F_1, F_2$  – силы притяжения частиц

Fig. 1. Mechanisms of interaction of two particles in an acoustic field:  $d_1, d_2$  – diameters of particles;  $v_1, v_2$  – velocities of particles;  $d_k$  – diameter of the drop;  $F_1, F_2$  – the force of attraction of particles

Физико-математическая модель коагуляции основана на анализе движения газовой и дисперсных фаз. Макроскопический уровень (это движение газовой среды) описывался с помощью системы уравнений Навье–Стокса, теплопроводности и состояния газовой среды. Решение на макроскопическом уровне было получено при помощи метода конечных элементов, используя САЕ-систему OpenFOAM. Имеющиеся стандартные решатели, реализующие уравнения Навье–Стокса, позволили рассчитать движение фаз в скруббере Вентури.

Микроскопический уровень (это движение отдельных частиц и их взаимодействие) описывался с помощью второго закона Ньютона (в импульсной форме): частица изменяет свою скорость за счёт совокупного действия сил (1).

$$m_p \frac{d\bar{v}_p}{dt} = 3\pi\mu d C_{cor} (\bar{v}_f - \bar{v}_p) + \frac{\pi d^3 \rho_f}{6} \frac{d\bar{v}_f}{dt} + \frac{\pi d^3 \rho_f}{12} \left( \frac{d\bar{v}_f}{dt} - \frac{d\bar{v}_p}{dt} \right) - \frac{\pi d^3}{6} (\rho_p - \rho_f) \bar{\omega} \times (\bar{\omega} \times \bar{r}) - \frac{\pi d^3}{6} \rho_p (\bar{\omega} \times \bar{v}_p) + \bar{F}_e, \quad (1)$$

где  $m_p = \pi d^3 \rho_p / 6$  – масса частицы, кг;  $m$ ;  $\rho_p$  – плотность частицы, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_f$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $d$  – эквивалентный диаметр частицы;  $\bar{v}_p$  – скорость частицы, м/с;  $t$  – время, с;  $\bar{\omega}$  – угловая скорость вращения частицы, рад/с;  $\bar{v}_f$  – скорости газа, м/с;  $C_{cor}$  – коэффициент вязкого сопротивления (газовая среда);  $\mu$  – динамическая вязкость (газовая среда), Па·с;  $\bar{r}$  – радиус-вектор;  $\bar{F}_e$  – дополнительная внешняя сила (возмущающее воздействие ультразвукового поля), действующая на частицу.

Численное решение на микроскопическом уровне было также получено при помощи CAE-системы OpenFOAM, которая кроме стандартных приложений – решателей, позволяет применять и пользовательские разработки. В качестве входных данных для расчета движения и взаимодействия частиц использовалось поле скоростей газа. Первоначально дополнительная внешняя сила, приведенная в выражении (1), не учитывалась, т. е. решение было получено без ультразвукового воздействия. Определение эффективности трубы и скруббера Вентури было основано на расчете массового расхода дисперсных частиц:

$$\eta = \frac{\rho_p \cdot \sum_{k=1}^{N(\Delta t)} H_{d_{min}}(d_k) \cdot \frac{\pi d_k^3}{6}}{\alpha_{вх} \cdot G \cdot \Delta t} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где  $\rho_p$  – плотность золотых частиц, кг/м<sup>3</sup>;  $d_k$  – диаметр золотой частицы, м;  $\alpha_{вх}$  – начальная запыленность газового потока, кг/м<sup>3</sup>;  $N(\Delta t)$  – удельное число золотых частиц (через выходное сечение за время  $\Delta t$ );  $G$  – расход газа, м<sup>3</sup>/с;  $H_{d_{min}}(d_k)$  – функция-индикатор типа частицы, равная 1 при  $d_k < d_{min}$  и 0 при  $d_k > d_{min}$ ;  $d_{min}$  – минимальный диаметр капель воды, м.

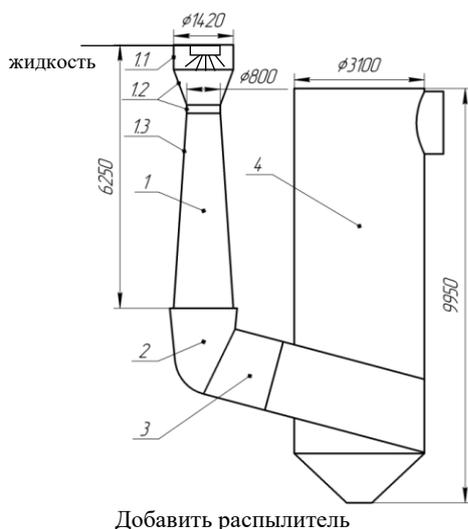
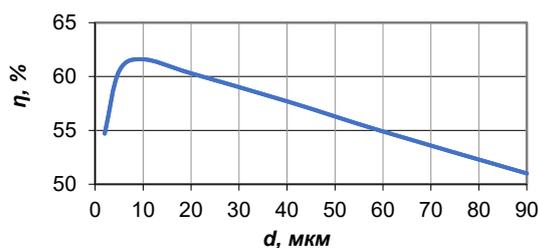


Рис. 2. Эскиз скруббера Вентури: 1 – труба Вентури; 1.1 – оголовок; 1.2 – конфузур; 1.3 – диффузор; 2 – колено; 3 – патрубков соединительный; 4 – каплеуловитель

Fig. 2. Sketch of the Venturi scrubber: 1 – Venturi tube; 1.1 – tip; 1.2 – confuser with a neck; 1.3 – diffuser; 2 – knee; 3 – connecting pipe; 4 – drip catcher



а) труба Вентури

Рис. 3. Зависимости эффективности улавливания частиц золы

Fig. 3. Dependences of ash particles trapping efficiency

На рис. 2 показан эскиз скруббера Вентури (расчетная область). В табл. 1 представлены исходные данные.

Подача жидкости осуществлялась путем ее гидравлического распыления в оголовке трубы Вентури. При этом дополнительного диспергирования капель жидкости под действием ультразвуковых колебаний не происходило.

Остаточная запыленность (на выходе) газа рассчитывалась по выражению:

$$\alpha_{ввых} = \frac{(100 - \eta)}{100} \cdot \alpha_{вх}. \quad (3)$$

Таблица 1. Исходные расчетные данные

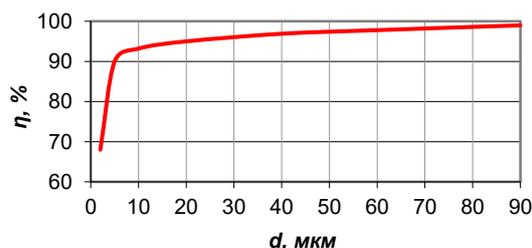
Table 1. Baseline data

Параметр/Parameter	Значение/Value
Несущая среда/Carrier medium	Воздух/Air
Входная температура /Input temperature	170, °C
Расход/Consumption	100 · 10 <sup>3</sup> , м <sup>3</sup> /ч
Плотность/Density	0,78, кг/м <sup>3</sup>
Скорость/Velocity	60 м/с
Твердая фаза/Solid phase	Зола/Ash
Плотность/Density	1000, кг/м <sup>3</sup>
Диаметр частиц/Particle diameter	2–90, мкм
Входная концентрация, г/м <sup>3</sup>	17
Жидкая фаза/Liquid phase	Вода/Water
Плотность/Density	1000, кг/м <sup>3</sup>
Расход/Consumption	20, т/ч
Удельный расход/ Specific consumption	0,2 л/м <sup>3</sup>
Размер капель/Droplet size	150, мкм

Применяя выражения (2), (3) были получены зависимости эффективности улавливания золотых частиц в трубе и скруббере Вентури (рис. 3).

Этот и последующие расчеты эффективности и остаточной запыленности как трубы Вентури, так и скруббера, выполнялись с учетом исходных данных, приведенных в табл. 1. Было принято допущение, что поток золотых частиц монодисперсный. Расчеты выполнялись для каждого размера золотых частиц в диапазоне от 2 до 90 мкм с начальной входной концентрацией 17 г/м<sup>3</sup>.

Анализ графика на рис. 3, а, показал, что с увеличением диаметра золотых частиц эффективность трубы Вентури снижается: максимум эффективности (62 %) для частиц диаметром 10 мкм. Это возникает из-за малых относительных скоростей частиц золы и капель воды. Эффективность скруббера (рис. 3, б) при увеличении диаметра частиц золы повышается от 68 % (для частиц диаметром 2 мкм) до 99 % (для частиц диаметром 90 мкм).



б) скруббер в целом

Полученные расчетные результаты хорошо согласуются с данными исследований подобных промышленных скрубберов, проведенных И.Б. Палатником [2], Л.И. Кропфом [1] и др. В работах показана небольшая эффективность улавливания высокодисперсных золых частиц (диаметром менее 5 мкм) в трубе Вентури (не более 65 %) и в скруббере (не более 85 %). Совпадение расчетных результатов с данными исследований доказало адекватность предложенной физико-математической модели.

Как было отмечено ранее, при ультразвуковом воздействии происходит повышение вероятности столкновения капель воды и золых частиц. Расчет процесса ультразвуковой коагуляции частиц основан на учете дополнительной силы  $\bar{F}_e$  (1). Эта сила возникает как из-за периодических возмущений газовой среды, так и из-за вторичных отражений акустических колебаний от соседних золых частиц. Наибольшая концентрация дисперсных частиц и основной эффект от их коагуляции обеспечивается именно в трубе Вентури. Поэтому дополнительная сила учитывалась только в момент нахождения золотой частицы именно в этой области. Сила  $F_e$  была рассчитана при помощи выражений, приведенных в работе Н.Н. Чернова [16]. В расчете было учтено, что форма золотой частицы отклоняется от сферической и представляет собой эллипсоид вращения:

$$F_e = \frac{4\pi d\mu(W^2 - 1)^{\frac{3}{2}}}{W} \times \left( \frac{\cos^2 \theta}{(W^2 - 2) \arctg \sqrt{W^2 - 1} - \sqrt{W^2 - 1}} + \frac{\sin^2 \theta}{(3W^2 - 2) \arctg \sqrt{W^2 - 1} - \sqrt{W^2 - 1}} \right) \times \bar{U}(r, t), \quad (4)$$

где  $d$  – наибольший диаметр, м;  $W$  – отношение полуосей эллипса;  $\mu$  – динамическая вязкость газового потока, Па·с;  $\theta$  – угол между меньшей полуосью эллипса и направлением акустического поля, рад;  $\bar{U}$  – возмущение скорости газового потока, м/с, (рассчитывается с учетом ортокинетического и гидромеханического механизмов с использованием выражений, описанных в работах G.X. Zhang, J.Zh. Liu [17]).

Численная реализация выражения (4) была получена также при помощи САЕ-системы OpenFOAM. Дополнительно в расчете учитывалось текущее движение отдельных групп реальных дисперсных частиц в зависимости от возмущающих сил (со стороны газового потока). Такой учет осуществлялся при помощи стохастической модели столкновения, описанной в работе М. Sommerfeld [18]. Согласно модели рассчитывается только траектория одной частицы (расчетной). При этом определяется вероятность ее столкновения с другой (виртуальной) частицей, которая генерируется на каждом временном шаге:

$$P_{col}(\Delta t) = \frac{\pi}{4} (d_{pr} + d_{pf})^2 \cdot |\bar{v}_{pr} - \bar{v}_{pf}| \cdot n_p \cdot \Delta t, \quad (5)$$

где  $d_{pr}$ ,  $d_{pf}$  – диаметры частиц, м;  $\bar{v}_{pr}$ ,  $\bar{v}_{pf}$  – скорости частиц, м/с;  $n_p$  – счетная концентрация частиц (для ячейки расчетной области), м<sup>-3</sup>;  $\Delta t$  – временной шаг, с.

Численное значение вероятности столкновения в формуле (5) произвольно взятых частиц на каждом временном шаге в одну секунду составляет от  $5 \cdot 10^{-16}$  до  $50 \cdot 10^{-16}$ . При концентрации золотых частиц  $17 \text{ г/м}^3$  их количество будет составлять порядка  $1,6 \cdot 10^{10}$ . При этом количество возможных пар золотых частиц, которые могут столкнуться, будет составлять около  $1,25 \cdot 10^{20}$ . Поэтому, несмотря на очень малое численное значение вероятности в каждый интервал времени, будет происходить столкновение как минимум одной пары частиц. Расчет ее эквивалентного диаметра и скорости движения приведен в формулах (6), (7):

$$d_{pr} = \sqrt[3]{d_{pr}^3 + d_{pf}^3}, \quad (6)$$

$$|\bar{v}_{pr}| = \left| \bar{v}_{pr} - \bar{v}_{pf} \right| \cdot \frac{m_{pr}}{m_{pr} + m_{pf}}, \quad (7)$$

где  $m_{pr}$ ,  $m_{pf}$  – масса частиц до столкновения, кг.

Граничные условия для численной модели: начальная скорость  $v_{вх0}$  (м/с), плотность  $\rho_{вх0}$  (кг/м<sup>3</sup>) входного газового потока и его температура  $T_{вх0}$  (°С); исходный диаметр твердых (золотых) частиц (м), их плотность  $\rho_{вх1}$  (кг/м<sup>3</sup>) и расход  $Q_{вх1}$  (кг/с); исходный диаметр капель воды  $d_{вх2}$  (м), их плотность  $\rho_{вх2}$  (кг/м<sup>3</sup>) и расход  $Q_{вх2}$  (кг/с).

Дополнительные граничные условия: скользящий газовый поток вдоль внутренних стенок скруббера; неупругое отражение дисперсных частиц в трубе Вентури; возможно прилипание дисперсных частиц в каплеуловителе; соударение частиц со стенкой исключаются; отражение акустических волн ультразвуковой частоты в трубе Вентури.

С учетом предложенных математических зависимостей, описывающих поведение частиц на микрокопическом уровне под действием ультразвуковых колебаний, а также используя выражения (2), (3) была рассчитана эффективность коагуляции частиц в трубе Вентури при разных частотах и на заданном уровне формируемого звукового давления (рис. 4).

Уровень звукового давления был принят равным 145 дБ. Расчеты были проведены при условии равномерного распределения ультразвуковых колебаний во всем объеме трубы Вентури.

Анализ графиков показал, что при увеличении частоты ультразвукового воздействия с 10 до 30 кГц эффективность трубы Вентури падает, но не более 5 %. Поэтому было принято решение осуществлять ультразвуковое воздействие на частотах около 22 кГц – начало ультразвукового диапазона. В слышимом диапазоне уровень звукового давления свыше 145 дБ опасен для обслуживающего персонала. А на более высоких частотах повышается затухание акустических колебаний в газодисперсной среде. Поэтому последующие численные расчеты проводились именно на частоте 22 кГц.

Анализ графиков расчетных зависимостей (эффективность улавливания золотых частиц диаметром 2–90 мкм) в трубе Вентури при разных уровнях звукового давления (рис. 5) показал следующее. Для

существенного увеличения эффективности газоочистки (особенно с 65 до 85 % для частиц размером 2 мкм) требуется создать акустическое поле с уровнем звукового давления не менее 140 дБ. Дальнейшее повышение уровня звукового давления до 155 дБ не приводит к существенному росту эффективности трубы Вентури.

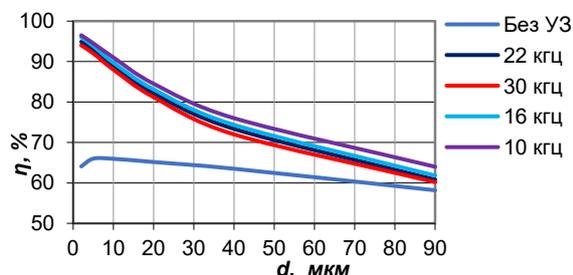


Рис. 4. Зависимость эффективности трубы Вентури от частоты

Fig. 4. Dependence of the Venturi tube efficiency on frequencies

Анализ графиков расчетных зависимостей (эффективность и остаточная запыленность) газового потока в трубе Вентури от диаметра золых частиц при двух значениях уровня звукового давления (рис. 6) показал следующее. Происходит снижение запыленности: примерно в два раза при улавливании золых частиц диаметром до 20 мкм и до полутора раз – для диаметра более 20 мкм.

Именно для высокодисперсных золых частиц (размером менее 5 мкм) достигается наибольший эффект от ультразвуковой коагуляции. Эффективность улавливания золых частиц диаметром 2 мкм при

уровне звукового давления в 150 дБ составляет около 99 %. Это значительно превышает степень газоочистки без применения ультразвуковой коагуляции (не более 65 %).

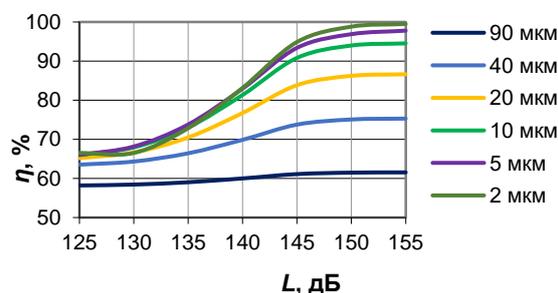
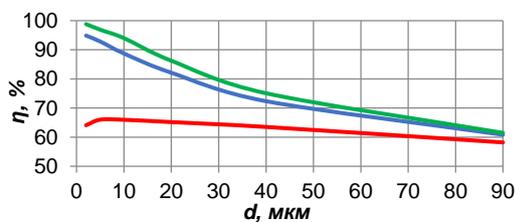


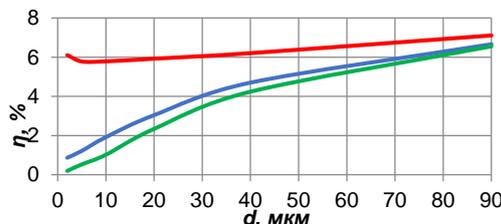
Рис. 5. Зависимость эффективности трубы Вентури от уровня звукового давления

Fig. 5. Dependence of the Venturi tube efficiency on the sound pressure level

Анализ графиков расчетных зависимостей (эффективность и остаточная запыленности газового потока) в скруббере от размера частиц золы при двух значениях уровня звукового давления (рис. 7) показал следующее. Ультразвуковое воздействие обеспечивает повышение эффективности скруббера для диаметров золых частиц в диапазоне 2–90 мкм свыше 96 %, особенно в области диаметров менее 5 мкм. Эффективность улавливания золых частиц в скруббере размером 2 мкм при уровне звукового давления 150 дБ составляет около 99 %. Это значительно превышает степень газоочистки без применения ультразвуковой коагуляции (не более 75 %).



а/а

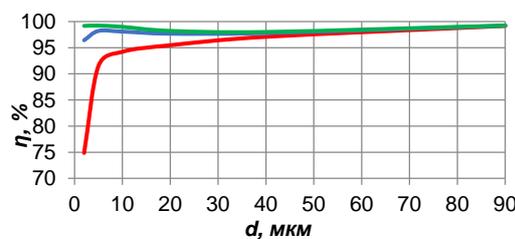


б/б

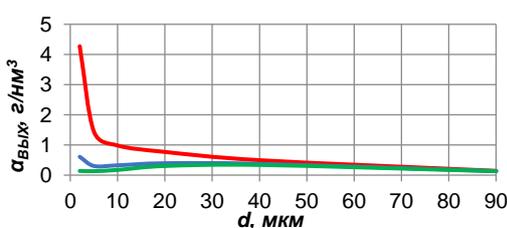
— Без УЗ — с УЗ 145 дБ — с УЗ 150 дБ

Рис. 6. Зависимость эффективности (а) и запыленности (б) газового потока на выходе трубы Вентури при различных уровнях звукового давления

Fig. 6. Dependence of efficiency (a) and dust content (b) at the outlet of the Venturi tube at various sound pressure levels



а/а



б/б

— Без УЗ — с УЗ 145 дБ — с УЗ 150 дБ

Рис. 7. Зависимость эффективности (а) и запыленности (б) выходного газового потока скруббера при различных уровнях звукового давления

Fig. 7. Dependence of efficiency (a) and dust content (b) at the output of the scrubber at various sound pressure levels

Полученные зависимости при разных уровнях ультразвукового воздействия в диапазоне диаметров частиц 2–40 мкм имеют экстремумы. Диаметру золотых частиц в 5 мм соответствует максимум эффективности (или минимум запыленности). Это обусловлено тем, что при меньших диаметрах снижается эффективность каплеуловителя, а при больших диаметрах уменьшается вероятность столкновения частиц дисперсной фазы внутри трубы Вентури вследствие снижения колебательной скорости золотых частиц в акустическом поле. Диаметрам золотых частиц 5–40 мкм соответствует минимум эффективности (или максимум запыленности).

Таким образом, анализ расчетных зависимостей показал, что ультразвуковое воздействие наиболее эффективно применять для уменьшения количества высокодисперсных золотых частиц (диаметром менее 5 мкм) в очищаемых газах.

**Экспериментальное подтверждение эффективности применения ультразвукового воздействия для интенсификации процесса мокрой газоочистки**

Источниками для создания акустических колебаний ультразвуковой частоты в газодисперсных средах являлись ультразвуковые излучатели. Конструктивно они представляли собой пьезоэлектрические ультразвуковые колебательные системы с изгибно-колеблющимся диском специального ступенчато-переменного сечения. Для питания ультразвуковых излучателей применялись электронные генераторы [19]. Внешний вид ультразвукового дискового излучателя (УЗДИ) приведен на рис. 8, а основные технические характеристики – в табл. 2.

**Таблица 2.** Основные параметры УЗДИ

**Table 2.** Main parameters of ultrasonic disk radiator (UDR)

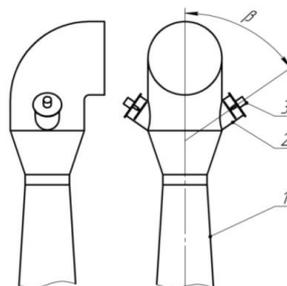
Наименование параметра Parameter name	$D_{изл.}$ , мм $D_{рад.}$ , mm		
	320	370	420
Площадь излучения $S_{изл.}$ , м <sup>2</sup> Radiation area, $S_{рад.}$ , m <sup>2</sup>	0,08	0,11	0,14
Максимальный уровень звукового давления, дБ, на расстоянии, м Maximum sound pressure level, dB, at a distance, m	0,20–0,25	151	158
	1,0	135	143
Частота воздействия, кГц Frequency impact, kHz	22±0,5		



**Рис. 8.** Ультразвуковой аппарат серии «Соловей», модель УЗАГС-0,6/22-0

**Fig. 8.** Ultrasonic device of the «Solovty» series, model UZAGS-0,6/22-0

Наиболее целесообразным местом установки УЗДИ является оголовок трубы Вентури (рис. 9), где обеспечивается максимальная концентрация частиц дисперсной фазы [2].



**Рис. 9.** Схема установки: 1 – труба Вентури; 2 – отвод для установки ультразвукового излучателя; 3 – ультразвуковой дисковый излучатель;  $\beta$  – угол между осью трубы Вентури и ультразвукового дискового излучателя

**Fig. 9.** Installation diagram: 1 – the Venturi tube; 2 – the tap for installation of an ultrasonic emitter; 3 – the ultrasonic disk radiator;  $\beta$  – the angle between the axis of the Venturi tube and the ultrasonic disk radiator

В качестве материала диска ступенчато-переменного сечения использовался титановый сплав ВТ1-0. Только такой материал или аналогичные сплавы способны работать при высокоамплитудной знакопеременной нагрузке на ультразвуковой частоте. Для исключения непосредственного контакта золотых частиц с поверхностью диска (наличие контакта приведет к абразивному износу поверхности и выходу из строя диска) УЗДИ должны устанавливаться не в самом газодисперсном потоке, а в металлических отводах под определенным углом к оси трубы Вентури. Кроме того, УЗДИ необходимо располагать симметрично для обеспечения равномерного распределения ультразвукового поля в трубе Вентури.

Величина оптимального угла установки УЗДИ была определена экспериментально в макетном образце трубы Вентури, в котором с помощью поворотного устройства перемещались два УЗДИ. При угле в 45 градусов обеспечивался наибольший уровень звукового давления в горловине.

Для определения оптимального количества УЗДИ (рис. 10) было проведено численное моделирование и определены зависимости эффективности и остаточной запыленности скруббера (рис. 11).

Из полученных результатов следует, что если происходит увеличение суммарной площади излучения, то повышается эффективность газоочистки (снижается запыленность) в скруббере.

На ТЭЦ и ТЭС в РФ широко применяется каменный уголь, который добывается в Харанорском месторождении и в месторождениях Экибастузского бассейна. Их дисперсный состав приведен на рис. 12. Выбор такого твердого топлива был обусловлен разнообразием дисперсного состава золы, получаемой при их сжигании. Для Харанорского угля модальный диаметр частиц составил 25 мкм, а для Экибастузского угля – 16 мкм.

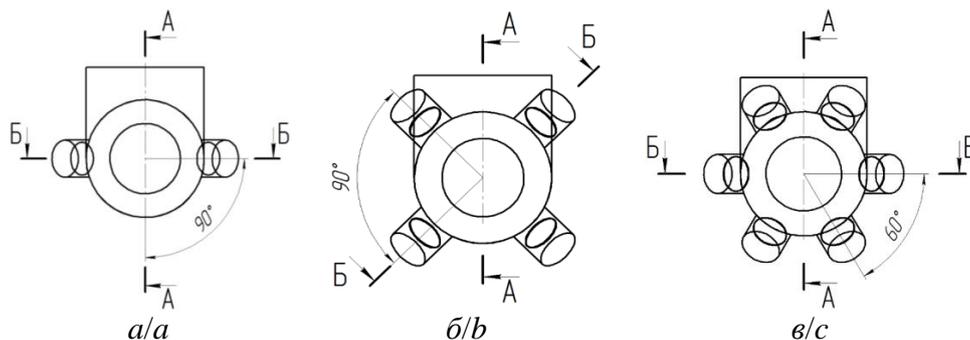


Рис. 10. Схема установки 2-х (а), 4-х (б), 6-ти (в) УЗДИ в трубу Вентури (вид сверху)  
 Fig. 10. Installation scheme of 2 (a), 4 (b), 6 (c) UDR in the Venturi tube (top view)

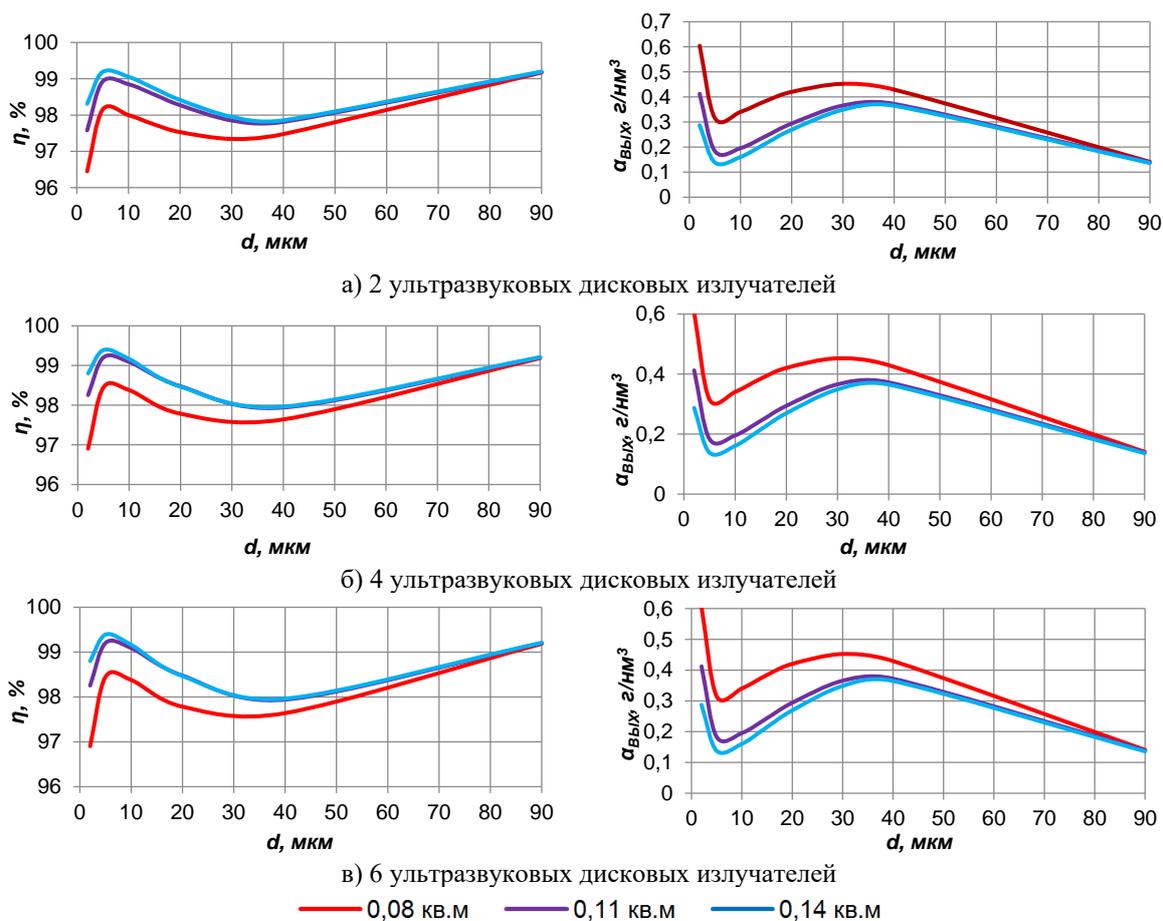


Рис. 11. Зависимости эффективности и остаточной запыленности скруббера от количества УЗДИ и площади излучения  
 Fig. 11. Dependences of the efficiency and residual dust content of a scrubber with different amounts and areas of UDR

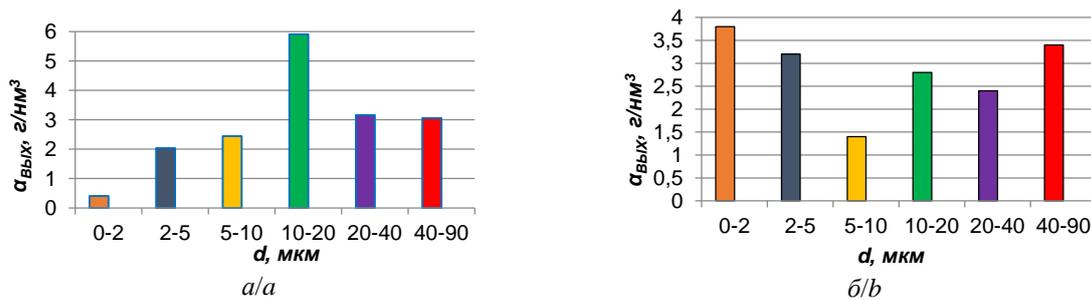


Рис. 12. Исходный дисперсный состав золы от Харанорского (а) и Экибастузского (б) углей  
 Fig. 12. Original dispersed composition of the ash formed during the combustion of Kharanor (a) and Ekibastuz (b) coals

Используя в качестве входных данных дисперсный состав золы, были рассчитаны зависимости остаточной запыленности выходного газового потока

скруббера при различном количестве УЗДИ и, следовательно, различной площади излучающей поверхности. Полученные результаты приведены на рис. 13.

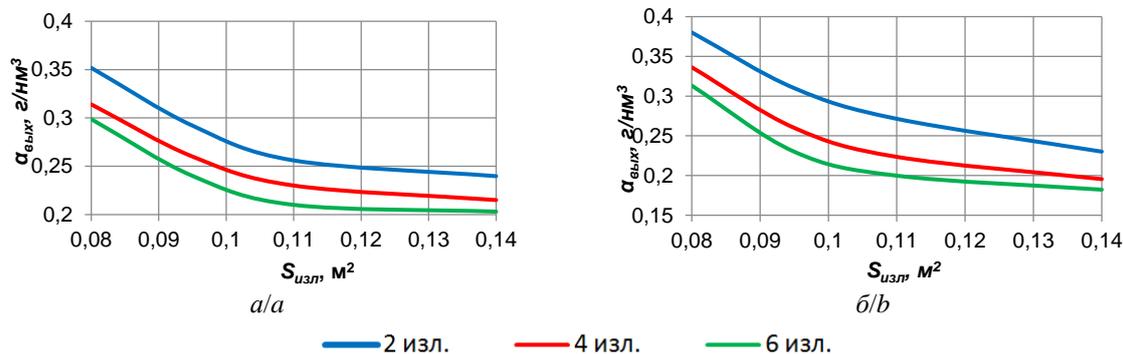


Рис. 13. Зависимости запылённости выходного газового потока в скруббере от площади УЗДИ при различном их количестве: зола Харанорского (а) и Экибастузского (б) углей

Fig. 13. Dependence of the dust content at the scrubber output on the area of UDR with their different amounts for the ash of Kharanor (a) and Ekibastuz (b) coals

Анализ полученных зависимостей показал, что современные экологические стандарты (норма удельных выбросов твердых частиц не должна превышать  $0,25 \text{ г/нм}^3$ ) могут быть обеспечены при использовании от четырех до шести УЗДИ площадью  $0,11 \text{ м}^2$  или двух и более площадью  $0,14 \text{ м}^2$ . При этом для шести УЗДИ, начиная с площади  $0,12 \text{ м}^2$ , остаточная запыленность практически не уменьшается.

Время ультразвукового воздействия на аэрозоль составляло от  $0,2-0,5 \text{ с}$  в зависимости от времени пребывания частицы в трубе Вентури. Время пребывания определялось скоростью частицы, которая обратно пропорциональна ее размеру.

Интенсивность ультразвукового воздействия для двух УЗДИ площадью  $0,14 \text{ м}^2$  достигала в горловине трубы Вентури за счет фокусировки ультразвуковых колебаний до  $500 \text{ Вт/м}^2$ . Из-за затухания акустического поля интенсивность ультразвукового воздействия уменьшалась: в диффузоре на расстоянии  $1 \text{ м}$  от горловины до  $100 \text{ Вт/м}^2$ ; в диффузоре на расстоянии  $3 \text{ м}$  от горловины до  $14 \text{ Вт/м}^2$ .

Сравнивая полученные данные с известными литературными источниками [20], можно сделать вывод о том, что время ультразвукового воздействия на аэрозоль в рассматриваемом процессе в 10 раз меньше, чем

при традиционной газоочистке. При этом полученная высокая эффективность воздействия достигается за счет значительно более высокой интенсивности ультразвукового воздействия (на порядок и выше).

Промышленные испытания были проведены на котлоагрегате БКЗ-220-100Ф ТЭЦ, работающем на угле Харанорского месторождения. На котлоагрегате установлено четыре золоуловителя типа МВ УО ОРГРЭС (труба Вентури), включенных параллельно [2]. Эффективность улавливания золовых частиц для обеспечения экологических норм должна быть не менее 98 %.

Для повышения эффективности газоочистки в оголовки труб Вентури были установлены по два УЗДИ диаметром  $420 \text{ мм}$  (площадь поверхности излучения каждого  $0,14 \text{ м}^2$ ), встречно направленные и под оптимальным углом  $45$  градусов относительно вертикальной оси трубы Вентури (рис. 14).

Общее количество установленных в золоулавливающую установку (ЗУУ) (для 4-х труб Вентури) УЗДИ – 8 шт. Результаты испытания, которые проводились в соответствии с РД 153-34.1-27.301-2001 «Методика испытаний золоулавливающих установок тепловых электростанций и котельных» [21] при различной нагрузке (паропроизводительности) котельного агрегата, представлены в табл. 3.



Рис. 14. Фото установленных УЗДИ в трубы Вентури золоулавливающей установки

Fig. 14. Photos of installed UDR in the Venturi tubes of the ash collection plant

Анализ результатов показал, что при работе ЗУУ с нагрузкой котла 180 т/ч без ультразвука обеспечивается эффективность очистки 95,07 %, а с ультразвуковым воздействием – 98,53 %. При нагрузке 220 т/ч эффективность без ультразвука – 94,87 %, а с ультразвуковым воздействием – 98,42 %.

Сравнение экспериментальных данных с расчетными данными показало, что эффективность газоочистки в реальной ЗУУ меньше расчетной. Это обусловлено тем, что в потоке исходного газа была малая

массовая доля высокодисперсных золовых частиц (диаметром менее 5 мкм), для которых ультразвуковое воздействие наиболее эффективно. Образование турбулентности потока из-за высоких скоростей газа привело к неравномерному движению дисперсных частиц, снижению их относительных скоростей и их уносу из зоны ультразвукового воздействия. Это явилось дополнительным фактором снижения эффективности реальной ЗУУ по сравнению с расчетными значениями.

**Таблица 3.** Основные параметры золоулавливающей установки (ЗУУ)

**Table 3.** Main parameters of the ash collecting unit (ACU)

Нагрузка котла, т/ч Boiler load, t/h	180								220							
	№ 1		№ 2		№ 3		№ 4		№ 1		№ 2		№ 3		№ 4	
Труба Вентури Venturi tube	№ 1		№ 2		№ 3		№ 4		№ 1		№ 2		№ 3		№ 4	
Место измерения Place of measurement	До ЗУУ Before ACU	После ЗУУ After ACU														
Объем газа, м <sup>3</sup> /ч·10 <sup>3</sup> Gas volume, m <sup>3</sup> /h·10 <sup>3</sup>	104,84		105,00		103,48		103,74		186,66		190,38		186,72		185,80	
Температура газа, °С Gas temperature, °С	167	76	177	77	179	77	178	76	194	97	198	96	196	96	197	96
Скорость газа, м/с Gas velocity, m/s	15,8	14,2	16,3	14,4	16,1	14,1	16,2	14,3	28,3	25,2	28,6	26,1	28,8	25,8	28,6	25,4
Плотность газа, кг/м <sup>3</sup> Gas density, kg/m <sup>3</sup>	0,78	0,97	0,74	0,97	0,74	0,96	0,75	0,96	0,71	0,91	0,70	0,90	0,71	0,91	0,70	0,90
Запыленность без УЗ, г/нм <sup>3</sup> Dustiness without ultrasound, g/nm <sup>3</sup>	15,22	0,68	15,17	0,76	16,13	0,81	15,64	0,82	15,59	0,70	14,52	0,78	15,37	0,81	14,98	0,82
Запыленность с УЗ, г/нм <sup>3</sup> Dustiness with ultrasound, g/nm <sup>3</sup>		0,23		0,25		0,21		0,23		0,246		0,24		0,23		0,25
Эффективность без УЗ, % Efficiency without ultrasound, %	95,07								94,87							
Эффективность с УЗ, % Efficiency with ultrasound, %	98,53								98,42							

Проведенные промышленные испытания подтвердили эффективность применения ультразвукового воздействия. Используя данные о дисперсном составе золы сжигаемого угля, теоретически доказано, что уменьшается суммарная доля золовых частиц на выходе ЗУУ в четыре и более раз. Уменьшение доли высокодисперсных частиц, которые практически не улавливаются без применения ультразвукового воздействия, достигает 15 раз.

#### Заключение

В результате выполнения работы показана возможность интенсификации процесса мокрой газоочистки в скрубберах Вентури, а именно повышение эффективности за счет ультразвуковой коагуляции высокодисперсных золовых частиц.

1. Разработана физико-математическая модель, описывающая движение газодисперсного потока в скруббере и взаимодействие дисперсных частиц между собой в акустическом поле. Предложенная

модель позволила рассчитать эффективность газоочистки при различных режимах и условиях воздействия.

2. Определены оптимальные режимы: уровень звукового давления не менее 145 дБ, частота 22 кГц, направление акустического поля под углом 45 градусов по отношению к потоку газа. Критерием оптимальности являлась максимальная эффективность коагуляции золовых частиц в трубе Вентури и максимальная степень очистки дымовых газов.
3. Определены требования к необходимому и достаточному количеству и местам установки ультразвуковых дисковых излучателей на скруббер Вентури для обеспечения эффективной коагуляции в ультразвуковом поле.
4. Проведены испытания созданного ультразвукового оборудования на котлоагрегате БКЗ-220-100Ф ТЭЦ в золоулавливающей установке: в акустическом поле уменьшается концентрация золовых частиц в отводящих газах до 4-х и более раз (эффе-

тивность не менее 98 %), процентное содержание золотых частиц (размером менее 5 мкм) снижает до 15 раз.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кропф Л.И., Акбрут Л.И. Золоуловители с трубами Вентури на тепловых электростанциях. – М.: Энергия, 1977. – 160 с.
2. Палатник И.Б. Пылеуловители с трубами-коагуляторами Вентури. – Алма-Ата: Наука, 1981. – 208 с.
3. Приемов С.И. Новый метод расчета эффективности улавливания пыли в скрубберах Вентури // Промышленная теплотехника. – 2011. – Т. 33. – № 1. – С. 82–87.
4. Аничков С.Н., Гиниятуллин С.Н., Зыков А.М. Повышение эффективности улавливания летучей золы в аппаратах мокрого золоулавливания // Электрические станции. – 2009. – № 8. – С. 59–62.
5. Ran W., Saylor J.R. A mechanistic explanation of the increase in particle scavenging in the ultrasonic scrubber // Journal of Aerosol Science. – 2015. – V. 87 – P. 88–101.
6. Ультразвуковая коагуляция аэрозолей: монография / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, К.В. Шалунова, С.Н. Цыганок, Р.В. Барсуков, А.Н. Сливин. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. – 241 с.
7. Повышение эффективности процесса коагуляции субмикронных частиц ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности / Р.С. Доровских, В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, Р.Н. Голых, К.В. Шалунова, В.А. Нестеров, А.В. Шалунова, А.Д. Абрамов // Вестник алтайской науки. – 2015. – № 1. – С. 298–307.
8. Gallego-Juarez J., Elvira-Segura L., Rodriguez G. A power ultrasonic technology for deliquoring // Ultrasonics. – 2013. – V. 41. – P. 255–259.
9. Ультразвук. Аппараты и технологии: монография / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, С.С. Хмелев, С.Н. Цыганок. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2015. – 688 с.
10. Theoretical study of acoustic coagulation of gas-dispersed systems / A.V. Shalunov, V.N. Khmelev, R.N. Golyh, K.V. Shalunova // International conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices. EDM 2010: Conference proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2010. – P. 328–333.
11. Sheng C., Shen X. Simulation of acoustic agglomeration processes of poly-disperse solid particles // Aerosol Science and Technology. – 2007. – V. 41. – Iss. 1. – P. 1–13.
12. Hoffmann T.L. An extended kernel for acoustic agglomeration simulation based on the acoustic wake effect // Journal of Aerosol Science. – 1997. – V. 28. – Iss. 6. – P. 919–936.
13. Экспериментальное исследование коагуляции и осаждения газозвеси в закрытой трубе при переходе к ударно-волновому режиму / Л.П. Шайдуллин, Д.А. Губайдуллин, Р.Г. Зарипов, Л.А. Ткаченко // Теплофизика высоких температур. – 2017 – Т. 55. – № 3 – С. 484–486.
14. Modeling and experimental study on acoustic agglomeration for dust particle removal / K. Zua, Y. Yao, M. Caib, F. Zhaob, D.L. Cheng // Journal of Aerosol Science. – 2017. – V. 114. – P. 62–76.
15. Шайдуллин Л.П. Разработка способа акустической коагуляции и осаждения аэрозоля в закрытой трубе применительно к миниградиентам // Молодежь и инновации Татарстана: Конференция молодых ученых. – Казань, 2018. – С. 51–54.
16. Чернов Н.Н. Акустические способы и средства осаждения взвешенных частиц промышленных дымов: дисс. ... д-ра техн. наук. – Таганрог, 2004. – 317 с.
17. Numerical simulation of acoustic wake effect in acoustic agglomeration under Oseen flow condition / Z. Guang Xue, L. Jian Zhong, W. Jie, Z. Jun Hu, C. Ke Fa // Chinese Science Bulletin. – 2012. – V. 57. – Iss. 19. – С. 2404–2412.
18. Multiphase flows with droplets and particles / C.T. Crowe, J.D. Schwarzkopf, M. Sommerfeld, Y. Tsuji. – New-York: CRC Press, 2011. – 509 p.
19. Modal analysis and nonlinear characterization of an airborne power ultrasonic transducer with rectangular plate radiator / R.R. Andrés, V.M. Acosta, M. Lucas, E. Riera // Ultrasonics. – 2018. – V. 82. – P. 345–356.
20. Страус В. Промышленная очистка газов / Пер. с англ. – М.: Химия, 1981. – 616 с.
21. Методика испытаний золоулавливающих установок тепловых электростанций и котельных. СО 34.27.301-2001 (РД 153-34.1-27.301-2001). – М.: ОАО «ВТИ», 2003. – 82 с.

Поступила 27.08.2019 г.

#### Информация об авторах

**Хмелев В.Н.**, доктор технических наук, профессор кафедры методов и средств измерений и автоматизации, заместитель директора по науке Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета.

**Шалунов А.В.**, доктор технических наук, заведующий кафедрой методов и средств измерений и автоматизации Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета.

**Цыганок С.Н.**, кандидат технических наук, доцент кафедры методов и средств измерений и автоматизации Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета.

**Нестеров В.А.**, кандидат технических наук, доцент кафедры методов и средств измерений и автоматизации Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета.

UDC 534.29.66.084:534-18

## ULTRASOUND COAGULATION IN VENTURI SCRUBBERS: FEATURES OF IMPLEMENTATION AND EFFICIENCY OF APPLICATION

Vladimir N. Khmelev<sup>1</sup>,  
vnh@bti.secna.ru

Andrey V. Shalunov<sup>1</sup>,  
shalunov@bti.secna.ru

Sergey N. Tsyganok<sup>1</sup>,  
grey@bti.secna.ru

Viktor A. Nesterov<sup>1</sup>,  
nva@bti.secna.ru

<sup>1</sup> Altai State Technical University,  
27, Trofimov street, Biysk, 659305, Russia.

**The relevance** of the research is caused by environmental requirements for flue gases from coal-fired TPPs and TPPs. Environmental requirements are ensured by ultrasonic coagulation of solid ash particles with liquid droplets, which is realized in devices for wet gas purification – in Venturi scrubbers.

**The main aim** of the research is to increase the efficiency of Venturi scrubbers for wet gas purification by improving the conditions for absorption of ash particles by liquid droplets in acoustic fields created by ultrasonic coagulation.

**Objects:** processes of ultrasonic coagulation of ash particles with drops of irrigated liquid in a Venturi scrubber.

**Methods.** Theoretical methods were based on the numerical solution of equations describing the motion of a gas-dispersed flow in a Venturi scrubber and the coagulation of ash particles in an acoustic field. Experimental results were obtained during industrial tests at the boiler unit BKZ-220-100F CHP, operating on the coal of the Kharanorsk deposit, according to the approved methodology RD 153-34.1-27.301-2001.

**Results.** The authors developed the physical and mathematical model that describes the gas-dispersed flow motion in a scrubber and the interaction of dispersed particles with each other in an acoustic field. The model made it possible to calculate the efficiency of gas purification under various conditions and determine the optimal modes of ultrasonic exposure: the sound pressure level is not less than 145 dB, the frequency is 22 kHz, the exposure zone in the entire volume of the Venturi pipe, the direction of the acoustic field is perpendicular to the gas flow. The maximum efficiency of ash particles coagulation in the Venturi scrubbers and the maximum degree of purification of flue gases were the criteria of optimality. The created ultrasonic equipment was tested at the BKZ-220-100F CHP unit in an ash collecting unit: the concentration of ash particles in the exhaust gases in the acoustic field decreases by four or more times (efficiency not less than 98 %), the percentage of ash particles (size less than 5 microns) is reduced to 15 times.

### Key words:

Ultrasonic coagulation, acoustic field, Venturi scrubber, sound pressure, gas purification, ash particle.

The research was financially supported by the RFBR and the Government of Altay region of the Russian Federation within the scientific project no. 19-48-220001.

### REFERENCES

- Kropp L.I., Akbrut L.I. *Zolouloviteli s trubami Venturi na teplovykh elektrostantsiyakh* [Ash collectors with Venturi tubes in thermal power plants]. Moscow, Energiya Publ., 1977. 160 p.
- Palatnik I.B. *Pyleuloviteli s trubami-koagulyatorami Venturi* [Dust collectors with Venturi coagulator tubes]. Alma-Ata, Nauka Publ., 1981. 208 p.
- Prienov S.I. A new method for calculating the efficiency of dust collection in Venturi scrubbers. *Industrial Heat Engineering*, 2011, vol. 33, no. 1, pp. 82–87. In Ukr.
- Anichkov S.N., Giniyatullin S.N., Zykov A.M. Improving the efficiency of fly ash capture in wet ash traps. *Electric stations*, 2009, vol. 8, pp. 59–62. In Rus.
- Ran W., Saylor J.R. A mechanistic explanation of the increase in particle scavenging in the ultrasonic scrubber. *Journal of Aerosol Science*, 2015, vol. 87, pp. 88–101.
- Khmelev V.N., Shalunov A.V., Shalunova K.V., Tsyganok S.N., Barsukov R.V., Slivin A.N. *Ultrazvukovaya koagulyatsiya aerozoley* [Ultrasonic coagulation of aerosols]. Biysk, Altai State Technical University Publ., 2010. 241 p.
- Dorovskikh R.S., Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golikh R.N., Shalunova K.V., Nesterov V.A., Shalunova A.V., Abramov A.D. Povyshenye effektivnosti protsesssa koagulyatsii submikronnykh chastits ultrazvukovymi kolebaniyami vysokoy intensivnosti [Improving the efficiency of the process of coagulation of submicron particles by high-intensity ultrasonic vibrations]. *Bulletin of Altay Science*, 2015, Iss. 1, pp. 298–307.
- Gallego-Juarez J., Elvira-Segura L., Rodriguez G. A power ultrasonic technology for deliquoring. *Ultrasonics*, 2013, vol. 41, pp. 255–259.
- Khmelev V.N., Shalunov A.V., Khmelev S.S., Tsyganok S.N. *Ultrazvuk. Apparaty i tekhnologii* [Ultrasonic. Devices and technologies]. Biysk, Altai State Technical University Publ., 2015. 688 p.
- Shalunov A.V., Khmelev V.N., Golyh R.N., Shalunova K.V. Theoretical study of acoustic coagulation of gas-dispersed systems. *International conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices. EDM 2010: Conference proceedings*. Novosibirsk, NSTU, 2010. pp. 328–333.
- Sheng C., Shen X. Simulation of acoustic agglomeration processes of poly-disperse solid particles. *Aerosol Science and Technology*, 2007, vol. 41, Iss. 1, pp. 1–13.
- Hoffmann T.L. An extended kernel for acoustic agglomeration simulation based on the acoustic wake effect. *Journal of Aerosol Science*, 1997, vol. 28, Iss. 6, pp. 919–936.
- Shaidullin L.R., Gubaidullin D.A., Zaripov R.G., Tkachenko L.A. Experimental study of coagulation and sedimentation of gas-

- particle suspension in closed tube under transfer to the shock-wave regime. *Thermophysics of high temperatures*, 2017, vol. 55, no. 3, pp. 484–486. In Rus.
14. Zua K., Yao Y., Caib M., Zhaob F., Cheng D.L. Modeling and experimental study on acoustic agglomeration for dust particle removal. *Journal of Aerosol Science*, 2017, vol. 114, pp. 62–76.
  15. Shaydullin L.R. Razrabotka sposoba akusticheskoy koagulyatsii i osazhdeniya aerolya v zakrytoy trube primentelno k minigradirnyam [Development of a method for acoustic coagulation and sedimentation of an aerosol in a closed pipe as applied to mini cooling towers]. *Konferentsiya molodykh uchenykh. Molodezh i innovatsii Tatarstana* [Conference of young scientists. Youth and Innovation of Tatarstan]. Kazan, 2018. pp. 51–54.
  16. Chernov N.N. *Akusticheskie sposoby i sredstva osazhdeniya vzheshnykh chastits promyshlennykh dymov. Dis. Dokt. nauk* [Acoustic methods and means for deposition of suspended particles of industrial smoke. Dr. Diss]. Taganrog, 2004. 317 p.
  17. Guang Xue Z., Jian Zhong L., Jie W., Jun Hu Z., Ke Fa C. Numerical simulation of acoustic wake effect in acoustic agglomeration under Oseen flow condition. *Chinese Science Bulletin*, 2012, vol. 57, Iss. 19, pp. 2404–2412.
  18. Crowe C.T., Schwarzkopf J.D., Sommerfeld M., Tsuji Y. *Multiphase flows with droplets and particles*. New-York, CRC Press, 2011. 509 p.
  19. Andrés R.R., Acosta V.M., Lucas M., Riera E. Modal analysis and nonlinear characterization of an airborne power ultrasonic transducer with rectangular plate radiator. *Ultrasonics*, 2018, vol. 82, pp. 345–356.
  20. Strauss W. *Promyshlennaya ochistka gazov* [Industrial gas cleaning]. Translated from English. Moscow, Khimiya Publ., 1981. 616 p.
  21. CO 34.27.301-2001 (RD 153-34.1-27.301-2001). *Metodika ispytaniy zoloulavlivayushchikh ustanovok teplovykh elektrostansiy i kotelnykh* [Testing method for ash collecting installations of thermal power plants and boiler houses]. Moscow, 2003. 82 p.

Received: 27 August 2019.

#### Information about the authors

**Vladimir N. Khmelev**, Dr. Sc., professor, Deputy Director for Science, Altai State Technical University.

**Andrey V. Shalunov**, Dr. Sc., Head of the Department of Methods and Means of Measuring and Automation, Altai State Technical University.

**Sergey N. Tsyganok**, Cand. Sc., associate professor, Altai State Technical University.

**Viktor A. Nesterov**, Cand. Sc., associate professor, Altai State Technical University.

УДК 622.276.342

## О СНИЖЕНИИ УРОВНЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ЗАВОДНЕНИЕМ ЗАЛЕЖЕЙ С ТРУДНОИЗВЛЕКАЕМЫМИ ЗАПАСАМИ

Мухаметшин Вячеслав Вячеславович<sup>1</sup>,  
vv@of.ugntu.ru

Кулешова Любовь Сергеевна<sup>2</sup>,  
markl212@mail.ru

<sup>1</sup> Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Россия, 450062, Уфа, ул. Космонавтов, 1.

<sup>2</sup> Филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Октябрьском,  
Россия, 452607, г. Октябрьский, ул. Девонская, 54а.

**Актуальность.** В условиях снижения прироста разведанных запасов нефти важной задачей перед нефтяной отраслью России является вовлечение в активную разработку залежей с трудноизвлекаемыми запасами, характеризующихся низкой степенью их выработки, но обладающих значительными остаточными запасами. К таким объектам относятся залежи в терригенных коллекторах меловых отложений Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции. Повышение эффективности их разработки позволит существенно расширить ресурсную базу страны.

**Цель:** создание комплекса алгоритмов и методик, позволяющих снизить степени неопределенности и риски принятия управляющих решений, направленных на повышение эффективности управления активами недропользователя.

**Методы.** Проведен геолого-промысловый анализ и обобщение опыта применения внутриконтурного заводнения в условиях различных групп относительно однородных объектов с использованием комплекса имеющейся информации о процессе заводнения с широким применением различных математических алгоритмов обработки данных и критериев информативности.

**Результаты.** Предложены алгоритмы, позволяющие оценивать степень взаимодействия добывающих и нагнетательных скважин на участках с различными значениями параметров, характеризующих геологическое строение при различном их размещении, выбирать добывающие скважины для перевода их под нагнетание, определять необходимость бурения новых скважин и боковых стволов, использовать скважины транзитного фонда, оценивать ожидаемые дебиты добывающих скважин, окружающих нагнетательные, а также решать ряд других задач разработки. Установлено, что в условиях различных групп объектов степень влияния геологических параметров на степень взаимодействия скважин различна, что обуславливает необходимость дифференцированного подхода не только к выбору расстояний между добывающими и нагнетательными скважинами для повышения эффективности закачки в пласт воды, но и при решении других задач управления разработкой объектов добычи нефти.

**Выводы.** Проведенное обобщение, полученные результаты и алгоритмы дополняют научно-методические основы повышения эффективности управления разработкой залежей нефти с трудноизвлекаемыми запасами с использованием закачки в пласт воды в пределах Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции с минимальными неопределенностями и рисками.

### Ключевые слова:

Трудноизвлекаемые запасы, степень неопределенности, риски, выработка запасов нефти, заводнение пластов.

### Актуальность

Заводнение продуктивных пластов было и остается одним из наиболее эффективных методов разработки нефтяных месторождений практически в любых геолого-физических условиях [1–7]. При этом степень эффективности определяется особенностями геологического строения залежей, плотностью сетки скважин и технологией закачки в пласт воды, а также соответствием технологии разработки того или иного объекта особенностям его геологического строения [8–14]. Это соответствие достигается не только посредством совершенствования методов проектирования, но и посредством принятия обоснованных управленческих решений в процессе эксплуатации залежей по мере получения дополнительной информации о процессе разработки того или иного объекта. При этом довольно часто при анализе и принятии решений, направленных зачастую на повышение степени выработки запасов и снижение издержек добычи, приходится сталкиваться с различного рода неопределенностями [15–20], которые обуславливают неод-

нзначность ответов на вопросы, важнейшими из которых являются:

- выбор добывающих скважин для перевода их под нагнетание;
- определение координат расположения скважин при бурении новых нагнетательных и боковых стволов;
- использование скважин транзитного фонда;
- оценка степени и характера взаимодействия добывающих и нагнетательных скважин при различном их размещении;
- оценка ожидаемых дебитов скважин, окружающих нагнетательные;
- определение расстояний, при которых скважины не взаимодействуют друг с другом на участках и залежах с различными характеристиками, отражающими фильтрационно-емкостные свойства и геологическое строение;
- возможность решения задач в условиях ограниченной информации о залежах и процессах, протекающих в них, с использованием косвенной информации;
- определение режимов добычи и закачки воды [21, 22].

Особую актуальность приобретает получение ответов на поставленные вопросы с учетом условий разработки объектов по месторождениям мелового возраста Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции, в которых сосредоточены колоссальные остаточные запасы нефти, причем структура этих запасов существенно изменилась за последние десять лет в сторону трудноизвлекаемых.

### Цель

Для получения ответов на обозначенные вопросы, снижения рисков и неопределенностей при принятии управляющих решений было проведено обобщение опыта заводнения продуктивных пластов групп объектов 10 и 15, идентифицированных в работе [23], с целью создания ряда методик и алгоритмов.

### Методы

Объекты группы 10 приурочены к ачимовским отложениям, расположенным равномерно в пределах Северо-Вартовской моноклинали, Сургутского и Нижневартовского сводов. Сюда же входят и отдельные залежи Ярсомовского прогиба.

Группа объектов 15 состоит в основном из залежей готеривского возраста Нижневартовского свода, а также отдельных залежей аптского возраста Северо-Вартовской моноклинали, готеривского – Сургутского, баремского – Нижневартовского сводов. Расположение этих групп объектов в осях двух первых канонических дискриминантных функций ( $y_1$  и  $y_2$ ) представлено на рис. 1.

В пределах каждой группы объектов были выделены свыше 500 пар скважин (добывающая–нагнетательная). По каждой паре анализировались временные ряды месячной добычи жидкости и закачки воды. По значениям взаимокорреляционных функций ( $R$ ) оценивалось взаимодействие скважин. Согласно [24], при  $R \leq 0,5$  добывающие скважины либо не испытывают влияние закачки, либо это влияние является слабым. Подтверждением этого явился анализ изменения прогнозных извлекаемых запасов нефти по добывающим скважинам до и после начала закачки в пласт воды. Прогноз проводился с использованием методики, предложенной в работе [25]. Анализ величины прироста извлекаемых запасов в результате закачки в пласт воды по добывающим скважинам показал, что 93 % скважин, характеризующихся величиной  $R \geq 0,5$ , имеют прирост, в то время как по скважинам с  $R < 0,5$  – лишь 12 % имеют этот прирост. Необходимо отметить, что хорошее взаимодействие скважин в отдельных случаях приводит к потере извлекаемых запасов ввиду прорыва воды по отдельным высокопроницаемым пропласткам и снижению при этом коэффициента охвата вытеснением. Именно большинство таких случаев отмечается в 7 % скважин с  $R \geq 0,5$ . С другой стороны, слабая гидродинамическая связь между нагнетательными и добывающими скважинами в отдельных случаях позволяет незначительно увеличить степень выработки запасов, однако при этом растягиваются сроки разработки и, естественно, возрастают затраты.

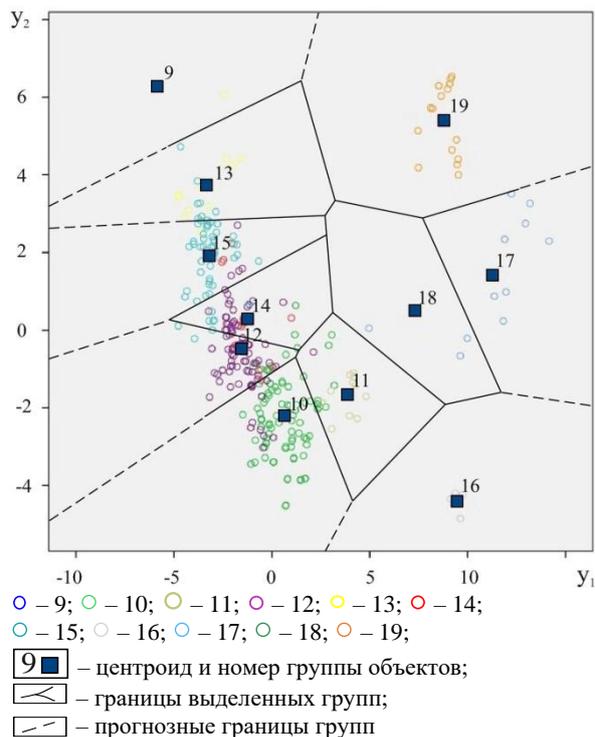


Рис. 1. Распределение групп объектов, приуроченных к залежам нижнего мела Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции

Fig. 1. Distribution of groups of objects associated with the West Siberian oil and gas province Lower Cretaceous deposits

Иначе говоря, степень взаимодействия определяет не только успешность организации закачки в пласт воды, но и определяет ее эффективность с точки зрения, прежде всего, выработки запасов нефти.

### Результаты

На первом этапе было изучено влияние на успешность заводнения различных геологических и технологических параметров. Успешность заводнения определялась соотношением скважин, прореагировавших на закачку, к общему количеству скважин. Были использованы значения параметров добывающих и нагнетательных скважин соответственно: общей ( $H_{\text{общ}}^D, H_{\text{общ}}^H$ ), перфорированной ( $H_{\text{перф}}^D, H_{\text{перф}}^H$ ), эффективной нефтенасыщенной ( $H_{\text{эф}}^D, H_{\text{эф}}^H$ ) толщин пласта; среднего значения ( $H_{\text{п}}^D, H_{\text{п}}^H$ ), среднеквадратичного отклонения ( $\sigma_{H_{\text{п}}}^D, \sigma_{H_{\text{п}}}^H$ ), вариации ( $W_{H_{\text{п}}}^D, W_{H_{\text{п}}}^H$ ), энтропии ( $\mathcal{E}_{H_{\text{п}}}^D, \mathcal{E}_{H_{\text{п}}}^H$ ), толщины нефтенасыщенных пропластков и их количества ( $n^D, n^H$ ); коэффициентов песчаности ( $K_{\text{п}}^D, K_{\text{п}}^H$ ), проницаемости ( $K_{\text{прон}}^D, K_{\text{прон}}^H$ ), пористости ( $m^D, m^H$ ), нефтенасыщенности ( $K_{\text{н}}^D, K_{\text{н}}^H$ ); относительной амплитуды ПС ( $\alpha_{\text{ПС}}^D, \alpha_{\text{ПС}}^H$ ); сопротивления пласта по ИК ( $\rho_{\text{ИК}}^D, \rho_{\text{ИК}}^H$ ), по двухметровому зонду ( $\rho_{2,25}^D, \rho_{2,25}^H$ ), по БК ( $M_{\text{БК}}^D, M_{\text{БК}}^H$ ); глубины залегания пласта ( $H_{\text{зал}}^D, H_{\text{зал}}^H$ ), а также значения рас-

стояния между добывающей и нагнетательной скважинами ( $F$ ), давления ( $P_{\text{зак}}$ ) и объема ( $Q_{\text{зак}}$ ) закачки воды в скважину. Другие геологические параметры и их влияние не рассматривались из-за незначительных интервалов их изменения либо отсутствия их массового определения по всем скважинам.

Анализ зависимостей успешности от рассматриваемых параметров показал, что в условиях рассматриваемых групп объектов имеет место высокий уровень неопределенности при использовании этих зависимостей в практических целях. Так, например, наилучшая зависимость позволяет однозначно ответить на вопрос об успешности заводнения лишь по 33 % скважин, а интервал однозначной оценки на графике составляет 39 % от общего интервала изменения значений параметра.

Последующее проведение перебора наиболее информативных параметров с использованием различных мер информативности после исключения взаимокоррелированных позволило получить параметры успешности заводнения (УЗ) в виде:

$$P_{\text{УЗ}} = \frac{H_{\text{Э}}^{\text{Д}} \cdot K_{\text{прон}}^{\text{Д}} \cdot H_{\text{Э}}^{\text{Н}} \cdot K_{\text{прон}}^{\text{Н}}}{F} \quad (1)$$

(по скважинам объектов группы 10);

$$P_{\text{УЗ}} = \frac{H_{\text{Э}}^{\text{Д}} \cdot K_{\text{прон}}^{\text{Д}} \cdot \rho_{\text{ИК}}^{\text{Д}} \cdot H_{\text{Э}}^{\text{Н}} \cdot K_{\text{прон}}^{\text{Н}} \cdot \rho_{\text{ИК}}^{\text{Н}}}{F} \quad (2)$$

(по скважинам объектов группы 15).

Связь успешности полученного параметра, представленная на рис. 2, показывает существенное увеличение разрешающей способности полученных зависимостей. Так, количество скважин, попавших в зону однозначной оценки успешности, возросло по группам 10 и 15 до 40 и 39 % соответственно, а интервалы однозначной оценки – до 80 и 94 %. Иначе говоря, предложенные параметры УЗ позволяют существенно снизить степень неопределенности при принятии решений, направленных на повышение эффективности управления разработкой аналогичных месторождений. При этом, например, при выборе очагов под нагнетание можно руководствоваться тем, что:

- при  $P_{\text{УЗ}} \geq P_{\text{УЗ}}^{\text{max}} = 3,5 \cdot 10^{-3}$  м·мкм<sup>2</sup> успешность будет равна 100 %;
- при  $P_{\text{УЗ}} \leq P_{\text{УЗ}}^{50} = 1,7 \cdot 10^{-3}$  м·мкм<sup>2</sup> успешность будет менее 50 % в условиях объектов группы 10;
- при  $P_{\text{УЗ}} \geq P_{\text{УЗ}}^{\text{max}} = 0,55$  мкм<sup>4</sup>·Ом<sup>2</sup>·м<sup>3</sup> успешность будет равна 100 %;
- при  $P_{\text{УЗ}} \leq P_{\text{УЗ}}^{50} = 0,20$  мкм<sup>4</sup>·Ом<sup>2</sup>·м<sup>3</sup> успешность будет менее 50 % в условиях объектов группы 15;
- при  $P_{\text{УЗ}}^{50} < P_{\text{УЗ}} < P_{\text{УЗ}}^{\text{max}}$  успешность будет изменяться от 50 до 100 % в условиях обоих групп объектов.

В то же время около 60 % скважин, представленных на рисунке, оказались в зоне неопределенности, что способствует сохранению высокой степени рисков при принятии решений.

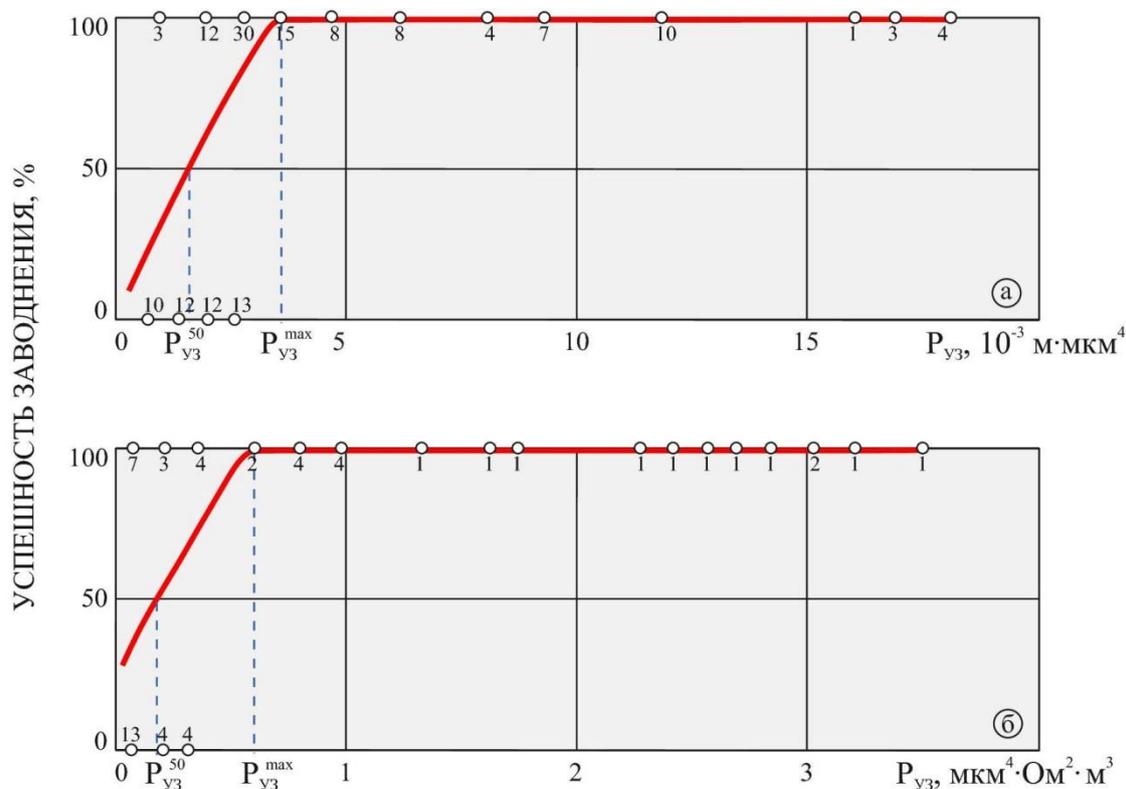


Рис. 2. Влияние параметров успешного заводнения на УЗ. Шифр точек – количество скважин; а, б) зависимости по группам объектов 10 и 15, соответственно

Fig. 2. Successful waterflooding parameters influence on waterflooding success. The number of points is the number of wells; а, б) dependencies in groups of objects 10 and 15, respectively

Поэтому на втором этапе для повышения точности однозначного ответа на вопрос о вероятности реакции добывающих скважин на закачку воды был использован дискриминантный анализ по скважинам, попавшим в зону неопределенности. В осях канонических дискриминантных функций было достигнуто разделение скважин на взаимодействующие и не взаимодействующие с определением границ раздела по первой дискриминантной функции.

Функции имеют следующий вид:

$$y_1 = 12,3 + 0,147H_{\text{общ}}^{\text{Д}} - 0,205H_{\text{перф}}^{\text{Д}} - 0,852n^{\text{Д}} - 0,884m^{\text{Д}} + 0,003K_{\text{прон}}^{\text{Д}} - 0,532\rho_{\text{ИК}}^{\text{Д}} + 0,07K_{\text{Н}}^{\text{Д}} - 0,142H_{\text{перф}}^{\text{Н}} + 0,718H_{\text{П}}^{\text{Н}} + 0,741n^{\text{Н}} + 0,262m^{\text{Н}} + 0,004K_{\text{прон}}^{\text{Н}} - 0,279\rho_{\text{ИК}}^{\text{Н}} + 0,09M_{\text{БК}}^{\text{Н}} - 0,0038F, \quad (3)$$

(по скважинам объектов группы 10);

$$y_1 = 5,236 + 0,0012H_{\text{общ}}^{\text{Д}} - 0,094H_{\text{Э}}^{\text{Д}} - 0,004K_{\text{прон}}^{\text{Д}} - 0,164\rho_{\text{ИК}}^{\text{Д}} - 0,048K_{\text{Н}}^{\text{Н}} + 0,0022F, \quad (4)$$

(по скважинам объектов группы 15).

Границами служат значения равные 0 по скважинам группы объектов 10 и равные 0,8 – по скважинам группы объектов 15. Процент верно разделенных скважин составил соответственно 92 и 90 %, т. е. степень неопределенности при планировании мероприятий снизилась более чем в 2 раза и существенно приблизилась к однозначной оценке.

Другим важным моментом устранения неопределенностей является не только качественная оценка степени взаимодействия скважин, но и количественная. Причем ценность этой оценки возрастает при использовании косвенной информации, а именно данных геолого-геофизических исследований скважин, что дает возможность прогнозирования эффективности, например, ввода простаивающих скважин в эксплуатацию или перевода скважин с одного горизонта.

Использование многомерного анализа на третьем этапе позволило получить уравнения множественной регрессии по скважинам со значениями  $R \geq 0,5$ :

$$R = -0,138 - 0,0084H_{\text{общ}}^{\text{Д}} - 0,020H_{\text{перф}}^{\text{Д}} + 0,030H_{\text{Э}}^{\text{Д}} + 0,038m^{\text{Д}} + 0,0115H_{\text{Э}}^{\text{Н}} + 0,0087\rho_{\text{ИК}}^{\text{Н}} - 0,0003F, \quad (r=0,821) \quad (5)$$

(по скважинам объектов группы 10);

$$R = 1,070 + 0,0003K_{\text{прон}}^{\text{Д}} - 0,009M_{\text{БК}}^{\text{Д}} + 0,010H_{\text{общ}}^{\text{Н}} + 0,010H_{\text{Э}}^{\text{Н}} + 0,044H_{\text{П}}^{\text{Н}} - 0,024m^{\text{Н}} - 0,036\rho_{\text{ИК}}^{\text{Н}} + 0,004K_{\text{Н}}^{\text{Н}} - 0,0002F, \quad (r=0,929) \quad (6)$$

(по скважинам объектов группы 15).

Высокие значения множественных коэффициентов корреляции ( $r$ ) – от 0,821 до 0,929 – позволяют предположить полученные зависимости к использованию на практике.

И наконец, на четвертом этапе проведено построение геолого-статистических моделей прогноза максимальных оптимальных дебитов жидкости добыва-

ющих скважин, окружающих нагнетательные, с использованием данных геофизических исследований скважин:

- при  $R < 0,5$ :

$$q_{\text{Ж}}^{\text{max}} = 163 + 7,74H_{\text{Э}}^{\text{Д}} - 24,5n^{\text{Д}} + 0,51K_{\text{прон}}^{\text{Д}} + 23,3\rho_{\text{ИК}}^{\text{Д}} - 4,86K_{\text{Н}}^{\text{Д}}; \quad (7)$$

- при  $R \geq 0,5$ :

$$q_{\text{Ж}}^{\text{max}} = \left( \begin{array}{l} 326 + 15,48H_{\text{Э}}^{\text{Д}} - 49n^{\text{Д}} + \\ + 1,02K_{\text{прон}}^{\text{Д}} + 46,6\rho_{\text{ИК}}^{\text{Д}} - 9,72K_{\text{Н}}^{\text{Д}} \end{array} \right) \times \left( \begin{array}{l} 1,070 + 0,0003K_{\text{прон}}^{\text{Д}} - 0,009M_{\text{БК}}^{\text{Н}} + \\ + 0,010H_{\text{общ}}^{\text{Н}} + 0,016H_{\text{Э}}^{\text{Н}} + 0,044H_{\text{П}}^{\text{Н}} - \\ - 0,024m^{\text{Н}} - 0,036\rho_{\text{ИК}}^{\text{Н}} + 0,004K_{\text{Н}}^{\text{Н}} - 0,0002F \end{array} \right) \cdot R \quad (8)$$

(по скважинам объектов группы 10);

- при  $R < 0,5$ :

$$q_{\text{Ж}}^{\text{max}} = 1014 - 3,358K_{\text{прон}}^{\text{Д}} + 2229\alpha_{\text{ПС}}^{\text{Д}} + 126H_{\text{общ}}^{\text{Д}} - 240H_{\text{Э}}^{\text{Д}} + 180H_{\text{П}}^{\text{Д}} - 39,8\rho_{\text{ИК}}^{\text{Д}}; \quad (9)$$

- при  $R \geq 0,5$ :

$$q_{\text{Ж}}^{\text{max}} = \left( \begin{array}{l} 2472 - 8,185K_{\text{прон}}^{\text{Д}} + 5433\alpha_{\text{ПС}}^{\text{Д}} + \\ + 0,306H_{\text{общ}}^{\text{Н}} - 584H_{\text{Э}}^{\text{Н}} + 439H_{\text{П}}^{\text{Н}} - 97\rho_{\text{ИК}}^{\text{Н}} \end{array} \right) \cdot R \quad (10)$$

(по скважинам объектов группы 15).

Значения  $r$  изменяются от 0,62 до 0,85.

Результаты исследований позволяют ответить на поставленные выше вопросы путем использования различных комбинаций полученных формул и зависимостей (1)–(10).

Так, например, при вводе простаивающих скважин в эксплуатацию или под закачку при переводе с другого горизонта или при выборе очагов под нагнетание необходимо знать, какие скважины будут испытывать влияние закачки и каков будет их дебит по жидкости.

Для получения ответа на эти вопросы для условий, например, объектов группы 15 может быть использован следующий алгоритм:

- по каждой паре скважин (добывающая–нагнетательная) по значениям  $H_{\text{Э}}^{\text{Д}}$ ,  $K_{\text{прон}}^{\text{Д}}$ ,  $\rho_{\text{ИК}}^{\text{Д}}$ ,  $H_{\text{Э}}^{\text{Н}}$ ,  $K_{\text{прон}}^{\text{Н}}$ ,  $\rho_{\text{ИК}}^{\text{Н}}$ ,  $F$  рассчитывается параметр успешности заводнения по формуле (2). Если  $P_{\text{уз}} \geq P_{\text{уз}}^{\text{min}} = 0,55 \text{ мкм}^4 \cdot \text{Ом}^2 \cdot \text{м}^3$ , то добывающая скважина однозначно будет испытывать влияние закачки и по формуле (6) рассчитывается значение взаимокорреляционной функции, после чего по формуле (10) определяется значение максимальной оптимальной месячной добычи жидкости. Если  $P_{\text{уз}} < P_{\text{уз}}^{\text{min}} = 0,55 \text{ мкм}^4 \cdot \text{Ом}^2 \cdot \text{м}^3$ , то по уравнению (4) рассчитывается значение канонической переменной  $y_1$ . При  $y_1 \geq 0,8 - R \geq 0,5$  проводятся расчеты, приведенные выше. При  $y_1 < 0,8 - R < 0,5$  определяются значения максимальной оптимальной месячной добычи жидкости по формуле (8).
- по полученным результатам принимается управляющее решение исходя из установок пользователя.

## Заключение

Проведенное обобщение, полученные результаты и алгоритмы дополняют научно-методические основы повышения эффективности управления разработкой

залежей нефти с трудноизвлекаемыми запасами с использованием закачки в пласт воды в пределах Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции с минимальными неопределенностями и рисками.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Муслимов Р.Х. Нефтеотдача: прошлое, настоящее, будущее (оптимизация добычи, максимизация КИН). – Казань: ФЭН, 2014. – 750 с.
2. Лысенко В.Д. Разработка нефтяных месторождений. Эффективные методы. – М.: Недра-Бизнесцентр, 2009. – 552 с.
3. Andreev A.V., Mukhametshin V.Sh., Kotenev Yu.A. Deposit productivity forecast in carbonate reservoirs with hard to recover reserves // SOCAR Proceedings. – 2016. – № 3. – P. 40–45. DOI: 10.5510/OGP20160300287.
4. Ghauri W.K., Osborne A.F., Magnuson W.L. Changing concepts in carbonate waterflooding – West Texas Denver unit project – an illustrative example // Journal of Petroleum Technology. – 1974. – V. 26. – Iss. 6. – P. 595–606. DOI: 10.2118/4683-PA.
5. Miller G.A. Some perspectives on various methods of oil shale extraction, Piceance Basin, Colorado // 27th Oil Shale Symposium Colorado School of Mines Golden. – Colorado, 2007. – 14 p.
6. Аналитическая методика оценки эффективности технологии отбора прикровельной нефти из водоплавающих залежей, верифицированная на гидродинамической модели / Р.Ф. Якупов, А.А. Гимазов, В.Ш. Мухаметшин, Р.И. Макаев // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 6. – С. 66–69. DOI: 10.24887/0028-2448-2018-6-66-69.
7. Abernathy B.F. Waterflood prediction methods compared to pilot performance in carbonate reservoirs // Journal of Petroleum Technology. – 1964. – V. 16. – Iss. 4. – P. 276–282. DOI: 10.2118/629-PA.
8. Рогачев М.К., Мухаметшин В.В. Контроль и регулирование процесса солянокислотного воздействия на призабойную зону скважин по геолого-промышленным данным // Записки Горного института. – 2018. – Т. 231. – С. 275–280. DOI: 10.25515/PMI.2018.3.275.
9. Технология ограничения притока подошвенных вод в скважинах / Р.С. Хисамов, Г.С. Абдрахманов, Р.Р. Кадыров, В.В. Мухаметшин // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 11. – С. 126–128. DOI: 10.24887/0028-2448-2017-11-126-128.
10. Наука и практика применения разветвленных и многозбойных скважин при разработке нефтяных месторождений / И.Н. Хакимянов, Р.С. Хисамов, Р.Р. Ибатуллин, Р.Т. Фазльев, А.И. Никифоров. – Казань: ФЭН, 2011. – 320 с.
11. Способ разработки контактных зон на примере Туймазинского нефтяного месторождения / Р.Ф. Якупов, В.Ш. Мухаметшин, Ю.В. Зейгман, А.Н. Червякова, М.Д. Валеев // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 10. – С. 36–40. DOI: 10.24887/0028-2448-2017-10-36-40.
12. Особенности выбора составов жидкостей глушения скважин в осложненных условиях эксплуатации скважин / Ю.В. Зейгман, В.Ш. Мухаметшин, А.Р. Хафизов, С.Б. Харина, Е.М. Абуталипова, А.Н. Авренюк // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 1. – С. 66–69.
13. Some testing results of productive strata wettability index forecasting technique / R.T. Akhmetov, V.V. Mukhametshin, A.V. Andreev, Sh.Kh. Sultanov // SOCAR Proceedings. – 2017. – № 4. – P. 83–87. DOI: 10.5510/OGP20170400334.
14. Hutton A.C. Petrographic classification of oil shales // International Journal of Coal Geology. – 1987. – V. 8. – № 3. – P. 3–231. DOI: 10.1016/0166-5162(87)90032-2.
15. Новые принципы и технологии разработки месторождений нефти и газа. Ч. 2 / С.Н. Закиров, И.М. Индрупский, Э.С. Закиров, И.С. Закиров, М.Т. Абасов, Р.Н. Фахретдинов, Д.П. Анিকেев, И.В. Рощина, А.А. Контарев, Я.А. Северов, А.А. Рошин, Э.А. Мамедов, О.В. Брадулина, А.Р. Лукманов. – М.–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2009. – 484 с.
16. Mukhametshin V.V., Kuleshova L.S. Justification of low-productive oil deposits flooding systems in the conditions of limited information amount // SOCAR Proceedings. – 2019. – № 2. – P. 16–22. DOI: 10.5510/OGP20190200384.
17. Quick look determination of oil-in-place in oil shale resource plays / M.W. Downey, J. Garvin, R.C. Lagomarsino, D.F. Nicklin // AAPG Annual Convention and Exhibition. –Houston, Texas, USA, April 10–13, 2011. – 21 p.
18. Economides J.M., Nolte K.I. Reservoir stimulation. – West Sussex, England: John Wiley and Sons, 2000. – 856 p.
19. Мухаметшин В.В. Устранение неопределенностей при решении задач воздействия на призабойную зону скважин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 7. – С. 40–50.
20. Щелкачев В.Н. Важнейшие принципы нефтеразработки: 75 лет опыта. – М.: «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2004. – 607 с.
21. Saboorian-Jooybari H., Dejam M., Chen Z. Half-century of heavy oil polymer flooding from laboratory core floods to pilot tests and field applications // SPE Canada Heavy Oil Technical Conference. – Calgary, Alberta, Canada, 9–11 June, 2015. – Canada: Society of Petroleum Engineers, 2015. – 26 p. DOI: 10.2118/174402-MS.
22. Mogollon J.L., Lokhandwala T. Rejuvenating viscous oil reservoirs by polymer injection: lessons learned in the field // SPE Enhanced Oil Recovery Conference. – Kuala Lumpur, Malaysia, 2–4 July, 2013. – Malaysia: Society of Petroleum Engineers, 2013. – 12 p. DOI: 10.2118/165275-MS.
23. Мухаметшин В.В. Обоснование трендов повышения степени выработки запасов нефти нижнемеловых отложений Западной Сибири на основе идентификации объектов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 5. – С. 117–124.
24. Мирзаджанзаде А.Х., Степанова Г.С. Математическая теория эксперимента в добыче нефти и газа. – М.: Недра, 1977. – 288 с.
25. Пермяков И.Г. Экспресс-метод расчета технологических показателей разработки нефтяных месторождений. – М.: Недра, 1975. – 128 с.

Поступила 05.05.2020 г.

## Информация об авторах

**Мухаметшин В.В.**, доктор технических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газонефтяных месторождений, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

**Кулешова Л.С.**, старший преподаватель кафедры разведки и разработки нефтяных и газовых месторождений, филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Октябрьском.

UDC 622.276.342

## ON UNCERTAINTY LEVEL REDUCTION IN MANAGING WATERFLOODING OF THE DEPOSITS WITH HARD TO EXTRACT RESERVES

Vyacheslav V. Mukhametshin<sup>1</sup>,  
vv@of.ugntu.ru

Lyubov S. Kuleshova<sup>2</sup>,  
markl212@mail.ru

<sup>1</sup> Ufa State Petroleum Technological University,  
1, Kosmonavtov street, Ufa, 450062, Russia.

<sup>2</sup> Ufa State Petroleum Technological University, Branch of the University in the City of Oktyabrsky,  
54a, Devonskaya Street, Oktyabrsky, 452607, Russia.

**Relevance.** In the context of the decline in growth of explored oil reserves, the Russian oil industry faces an important task of involving the deposits with hard-to-recover reserves characterized by a low recovery level but with significant residual reserves in active development. The West Siberian oil and gas province Terrigenous reservoirs of Cretaceous deposits refer to such objects. Increase of efficiency of their development will significantly expand the country resource base.

**The aim** of the research is to develop the complex of algorithms and techniques that reduce the uncertainty and risks in making management decisions aimed at improving the efficiency of asset management by subsurface users.

**Methods.** The authors have carried out the geological and commercial analysis and the experience generalization of contour waterflooding using in the conditions of various groups of relatively homogeneous objects applying a set of available information on waterflooding with the wide various mathematical algorithms for data processing and information criteria application.

**Results.** The paper introduces the algorithms which allow estimating producing and injection wells interaction degree at sites with different parameters values characterizing the geological structure in different locations, choosing producing wells for transferring them for injection ones, determining the need to drill new wells and sidetracks, using the transit fund wells, estimating the expected production rate of producing wells surrounding the injection ones, as well as solving a number of other tasks of reserves development. It was found out that under the different groups of objects conditions, the degree of influence of geological parameters on the degree of interaction between the wells is different, that causes the differentiated approach not only to the choice of distances between production and injection wells to increase the injection efficiency but also for other tasks of oil production facilities managing.

**Conclusions.** The generalization conducted, the results and the algorithms obtained complement the scientific and methodological foundations for increasing the efficiency of hard-to-recover oil deposits development managing by injecting water into the reservoir within the West Siberian oil and gas province with minimal uncertainties and risks.

### Key words:

Hard-to-recover reserves, uncertainty degree, risks, oil reserves development, waterflooding.

### REFERENCES

- Muslimov R.Kh. *Neftotdacha: proshloe, nastoyashchee, budushchee (optimizatsiya dobychi, maksimizatsiya KIN)* [Oil recovery: past, present, future (production optimization, maximization of recovery factor)]. Kazan, FEN Publ., 2014. 750 p.
- Lysenko V.D. *Razrabotka nefyanykh mestorozhdeniy. Effektivnyye metody* [Development of oil fields. Effective methods]. Moscow, Nedra-Business-centre Publ., 2009. 552 p.
- Andreev A.V., Mukhametshin V.Sh., Kotenev Yu.A. Deposit productivity forecast in carbonate reservoirs with hard to recover reserves. *SOCAR Proceedings*, 2016, no. 3, pp. 40–45. DOI: 10.5510/OGP20160300287.
- Ghuri W.K., Osborne A.F., Magnuson W.L. Changing concepts in carbonate waterflooding – West Texas Denver unit project – an illustrative example. *Journal of Petroleum Technology*, 1974, vol. 26, Iss. 6, pp. 595–606. DOI: 10.2118/4683-PA.
- Miller G.A. Some perspectives on various methods of oil shale extraction, Piceance Basin, Colorado. *27<sup>th</sup> Oil Shale Symposium Colorado School of Mines Golden*, Colorado, 2007. 14 p.
- Yakupov R.F., Gimazov A.A., Mukhametshin V.Sh., Makaev R.I. Analytical method for estimating efficiency of oil recovery technology in case of bottom water-drive reservoir, verified on the hydrodynamic model. *Oil Industry*, 2018, no. 6, pp. 66–69. In Rus. DOI: 10.24887/0028-2448-2018-6-66-69.
- Abernathy B.F. Waterflood prediction methods compared to pilot performance in carbonate reservoirs. *Journal of Petroleum Technology*, 1964, vol. 16, Iss. 4, pp. 276–282. DOI: 10.2118/629-PA.
- Rogachev M.K., Mukhametshin V.V. Control and regulation of the hydrochloric acid treatment of the bottomhole zone based on field-geological data. *Journal of Mining Institute*, 2018, vol. 231, pp. 275–280. In Rus. DOI: 10.25515/PML.2018.3.275.
- Khisamov R.S., Abdrakhmanov G.S., Kadyrov R.R., Mukhametshin V.V. New technology of bottom water shut-off. *Oil industry*, 2017, no. 11, pp. 126–128. In Rus. DOI: 10.24887/0028-2448-2017-11-126-128.
- Khakimzyanov I.N., Khisamov R.S., Ibatullin R.R., Fazlyev R.T., Nikiforov A.I. *Nauka i praktika primeneniya razvetvlenykh i mnogozaboynykh skvazhin pri razrabotke nefyanykh mestorozhdeniy* [Science and practice of branched and multi-hole wells using in the oil fields development]. Kazan, FEN Publ., 2011. 320 p.
- Yakupov R.F., Mukhametshin V.Sh., Zeigman Yu.V., Chervyakova A.N., Valeev M.D. Metamorphic aureole development technique in terms of Tuymazinskoye oil field. *Oil industry*, 2010, no. 10, pp. 36–40. In Rus. DOI: 10.24887/0028-2448-2017-10-36-40.
- Zeigman Yu.V., Mukhametshin V.Sh., Khafizov A.R., Kharina S.B., Abutalipova E.M., Avrenyuk A.N. Peculiarities of selecting well-killing fluids composition for difficult conditions. *Oil industry*, 2017, no. 1, pp. 66–69. In Rus.
- Akhmetov R.T., Mukhametshin V.V., Andreev A.V., Sultanov Sh.Kh. Some testing results of productive strata wettability index forecasting technique. *SOCAR Proceedings*, 2017, no. 4, pp. 83–87. DOI: 10.5510/OGP20170400334.
- Hutton A.C. Petrographic classification of oil shales. *International Journal of Coal Geology*, 1987, vol. 8, no. 3, pp. 203–231. DOI: 10.1016/0166-5162(87)90032-2.
- Zakirov S.N., Indrupskiy I.M., Zakirov E.S., Zakirov I.S., Abasov M.T., Fakhretudinov R.N., Anikeev D.P., Roshchina I.V., Kontarev A.A., Severov Ya.A., Roshchin A.A., Mamedov E.A.,

- Bradulina O.V., Lukmanov A.R. *Novye printsipy i tekhnologii razrabotki mestorozhdeniy nefiti i gaza. Ch. 2* [New Principles and technologies for oil and gas fields development. P. 2]. Moscow–Izhevsk, Institute of Computer Science, 2009. 484 p.
16. Mukhametshin V.V., Kuleshova L.S. Justification of low-productive oil deposits flooding systems in the conditions of limited information amount. *SOCAR Proceedings*, 2019, no. 2, pp. 16–22. DOI: 10.5510/OGP20190200384.
  17. Downey M.W., Garvin J., Lagomarsino R.C., Nicklin D.F. Quick look determination of oil-in-place in oil shale resource plays. *AAPG Annual Convention and Exhibition*. Houston, Texas, USA, April 10–13, 2011. 21 p.
  18. Economides J.M., Nolte K.I. *Reservoir stimulation*. West Sussex, England, John Wiley and Sons, 2000. 856 p.
  19. Mukhametshin V.V. Eliminating uncertainties in solving bottom hole zone stimulation tasks. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 7, pp. 40–50. In Rus.
  20. Shchelkachev V.N. *Vazhneyshie printsipy nefterazrabotki: 75 let opyta* [Main principles of oil field development: 75 years of experience]. Moscow «Oil and Gas» Publ. House, Gubkin RSU of Oil and Gas, 2004. 607 p.
  21. Saboorian-Jooybari H., Dejam M., Chen Z. Half-century of heavy oil polymer flooding from laboratory core floods to pilot tests and field applications. *SPE Canada Heavy Oil Technical Conference*. Calgary, Alberta, Canada, 9–11 June, 2015. Canada, Society of Petroleum Engineers, 2015. 26 p. DOI: 10.2118/174402-MS.
  22. Mogollon J.L., Lokhandwala T. Rejuvenating viscous oil reservoirs by polymer injection: lessons learned in the field. *SPE Enhanced Oil Recovery Conference*. Kuala Lumpur, Malaysia, 2–4 July, 2013. Malaysia, Society of Petroleum Engineers, 2013. 12 p. DOI: 10.2118/165275-MS.
  23. Mukhametshin V.V. Rationale for trends in increasing oil reserves depletion in Western Siberia cretaceous deposits based on targets identification. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 5, pp. 117–124. In Rus.
  24. Mirzadzhanzade A.Kh., Stepanova G.S. *Matematicheskaya teoriya eksperimenta v dobyche nefiti i gaza* [Mathematical theory of the experiment in oil and gas production]. Moscow, Nedra Publ., 1977. 288 p.
  25. Permyakov I.G. *Ekspress-metod rascheta tekhnologicheskikh pokazateley razrabotki nefityanykh mestorozhdeniy* [Express-method of technological indicators calculation for oil fields development]. Moscow, Nedra Publ., 1975. 128 p.

Received: 5 May 2020.

#### Information about the authors

**Vyacheslav V. Mukhametshin**, Dr. Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technological University.

**Lyubov S. Kuleshova**, senior lecturer, Ufa State Petroleum Technological University, Branch of the University in the City of Oktyabrsky.

УДК 550.47:552.57(571.62)

## ОРГАНИЧЕСКАЯ ГЕОХИМИЯ КАЙНОЗойСКИХ ПОРОД УШУМУНСКОГО БУРОУГОЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ СРЕДНЕАМУРСКОГО ОСАДОЧНОГО БАССЕЙНА

Тимошина Ирина Дмитриевна<sup>1</sup>,  
TimoshinalD@ipgg.sbras.ru

Фомин Александр Николаевич<sup>1,2</sup>,  
FominAN@ipgg.sbras.ru, a.fomin@g.nsu.ru

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

<sup>2</sup> Новосибирский Государственный Университет,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью расширения российской ресурсной базы Дальнего Востока. Изучение осадочных бассейнов и их углеводородного потенциала, разработка новых технологий прогноза традиционных и нетрадиционных месторождений углеводородного сырья остается приоритетным направлением Российской АН на многие годы. Оценка обогащенности пород органическим веществом и его генерационного потенциала поможет в работах по бассейновому моделированию. Настоящие исследования нужны также для: уточнения обстановок накопления органического вещества; реконструкции ландшафтов и биологического мира в кайнозое.

**Цель:** охарактеризовать биологический источник органического вещества, условия его накопления, обстановки диагенеза и уровень катагенетической зрелости в породах Ушумунского бурогольного месторождения.

**Объекты:** угли, глины и алевриты Ушумунского бурогольного месторождения Среднеамурского осадочного бассейна.

**Методы:** сопоставление данных пиролиза и изотопного анализа органического вещества и характеристик углеводородов-биомаркеров, полученных с помощью хромато-масс-спектрометрии в насыщенной и ароматической фракциях битумоидов, оценка источников, диагенетических обстановок и катагенетической преобразованности органического вещества.

**Результаты.** Породы палеогена и неогена Ушумунского бурогольного месторождения Среднеамурского осадочного бассейна впервые изучены методами органической геохимии. Органическое вещество исследованных образцов имеет признаки как террагенного (гумусового), так и аквагенного (сапротелевого) типов. Изотопный состав углерода органического вещества, распределение *n*-алканов, наличие каурана, биерана, филлокладанов (биомаркеров высших растений *Podocarpaceae* и *Agasacae*) в насыщенной фракции битумоидов, ретена (биомаркера хвойных растений) в ароматической фракции свидетельствуют о террагенной природе органического вещества. Вместе с тем в большинстве образцов характеристики ароматической фракции соответствуют аквагенному органическому веществу: низкие концентрации фенантронов, высокие – моно- и триароматических стероидов, распределение метилдибензотиофенов, вероятное присутствие длинноцепочечных алкилнафталинов – биомаркеров озерных водорослей *Botrysococcus braunii*. Также в большинстве образцов концентрации фитана значительно выше, чем пристана, и половина образцов согласно водородному индексу HI относится к типу II (аквагенный морской). Морских отложений в районе исследований нет, по-видимому, тип II является смесью типов I (аквагенный озерный) III (континентальный). Причем, судя по изменениям HI по разрезу, режим осадконакопления менялся неоднократно с озерного до торфяно-болотного и обратно. В ряде образцов максимумы в составе ациклических изопреноидов приходятся на *i*-C<sub>21</sub> и *i*-C<sub>22</sub>, возможно, из-за значительного вклада организмов домена архея в исходное живое вещество. Согласно высоким концентрациям дибензотиофенов, органическое вещество пережило диагенез с избытком серы в осадке. Вероятно, двойственность признаков (террагенные и аквагенные) связана со специфичностью исходной биоты этого бассейна и является характерной для ее возрастной и/или географической локализации. Низкие значения показателей отражательной способности витринита, пиролитические характеристики, резкое преобладание соединений с нечетным числом атомов в молекуле в *n*-алканах, наличие биогепанов и гопенов при почти полном отсутствии типичных стеранов и терпанов, распределение триароматических стероидов соответствуют катагенетически незрелому органическому веществу, и, возможно, недостаточная зрелость усиливает эту двойственность характеристик.

### Ключевые слова:

Дальний Восток, палеоген, неоген, бурые угли, пиролиз, изотопы, углеводороды-биомаркеры, генезис и катагенез органического вещества.

### Введение

Ушумунское бурогольное месторождение находится в пределах одноименного прогиба на юго-западе Среднеамурского осадочного бассейна и сложено болотно-озерно-аллювиальными отложениями Бирофельдского грабена, образовавшегося в процессе проявления кайнозойского рифтогенеза на тихоокеанской окраине Азии [1]. Пласты угля приурочены к терригенным толщам верхней подсвиты чернореченской свиты (олигоцен) и ушумунской свите (миоцен).

До настоящего времени эти отложения не были изучены методами органической геохимии, которые стали важными инструментами и широко используются для определения генетического типа органического вещества (ОВ), и даже восстановления биологических сообществ и среды обитания его источников, выяснения обстановок трансформации ОВ в диагенезе и уровня его катагенетической преобразованности. Для определения генетического типа ОВ наряду с оценкой керогена по водородному индексу (HI) пиролиза [2, 3]

и обогащенностью органического углерода изотопом  $^{12}\text{C}$  [4 и др.] используются исследования распределений углеводородов (УВ): нормальных алканов, ациклических изопреноидов, стеранов, терпанов, ароматических и серосодержащих соединений [5–10 и др.]. Можно предполагать участие в исходной биоте организмов домена архея при высоких концентрациях ациклических изопреноидов состава  $>\text{C}_{20}$ , озерных водорослей по наличию длинноцепочечных алкилнафталинов, констатировать вклад высших растений по наличию ретена, а также каурана, биерана, филлокладанов [5 и др.]. По некоторым соединениям насыщенной и ароматической фракций битумоидов определяют литологический состав осадка в бассейне накопления ОВ, например, избыток диастеранов указывает на глинистые материнские породы [5, 6 и др.], повышенное значение 4-метилдибензотиофена к фенантрону – на кремнистые [11]. При высоких концентрациях гомогопана  $\text{C}_{35}$  и дибензотиофенов делают заключение о сероводородном заражении осадка в диагенезе [5–7, 12, 13 и др.]. В дополнение к определению катагенетической преобразованности ОВ посредством углепетрографических и пиролитических исследований, которые иногда не применимы (например, при отсутствии мацералов и при насыщенности толщ битумами) используют многочисленные углеводородные показатели: отношения стеранов, гомогопанов, соединений ароматической фракции [5–10 и др.]; обилие биогопанов и гопенов, присутствие каурана, биерана, филлокладанов при отсутствии стеранов и терпанов, характерные также для ОВ, катагенетически не преобразованного или слабо преобразованного [6, 14–18 и др.].

Для расширения российской ресурсной базы Дальнего Востока необходимы работы по бассейновому моделированию, в котором используются данные по обогащенности пород ОВ, оценка его катагенетической преобразованности и генерационного потенциала – не реализованных способностей ОВ производить УВ, а также концентрации автохтонных и аллохтонных битумоидов. В научном плане исследования ОВ нужны для уточнения обстановок накопления органического вещества, для реконструкции ландшафтов и биологического мира в кайнозое. Цель настоящей работы – уточнить степень обогащенности пород ОВ, его генетический тип и состав исходной биоты, диагенетические обстановки преобразования и уровень катагенетических изменений ОВ угленосной толщи Ушумунского месторождения.

#### Объект и методы исследований

На переданной В.В. Крапивенцевой для изучения в лабораторию органической геохимии ИНГГ СО РАН коллекции образцов верхней части верхней под-свиты чернореченской ( $\text{P}_3^{1-2}\text{cr}$ ) свиты (залежи III и IV), бирофельдской ( $\text{P}_3^2\text{bf}$ ) свиты (кровля залежи III) и ушумунской ( $\text{N}_1^1\text{us}$ ) свиты (залежь II) из скв. 1138, 1157 и 1180 Ушумунского месторождения (табл. 1) проведены следующие геохимические исследования: определены содержания органического углерода ( $\text{C}_{\text{орг}}$ )

в породах [19], его изотопный состав по методике [20, 21], пиролитические характеристики [2, 3] и уровень зрелости органического вещества. В этих же пробах проведена экстракция битумоидов хлороформом и определение их группового состава по традиционным методикам [19], состав УВ насыщенных фракций методом газожидкостной хроматографии [22], состав соединений насыщенной и ароматических фракций методом хромато-масс-спектрометрии [22]. В процессе настоящих исследований выяснены условия формирования, тип и уровень катагенетической преобразованности ОВ глин, алевроитов и углей Ушумунского месторождения. Результаты были частично доложены на конференциях [23, 24].

**Таблица 1.** Положение и состав изученных образцов в разрезе Ушумунского бурогоугольного месторождения Среднеамурского осадочного бассейна

**Table 1.** Position and composition of the studied samples in the section of the Ushumunskoe brown coal field of the Middle Amur sedimentary basin

Образец Sample	Скважина/Well	Глубина, м Depth, m	Возраст Age	Свита Formation	Состав пород Lithology
1	1138	96,60–96,70	$\text{N}_1^1\text{us}$	ушумунская ushumun	глина углистая carbonaceous clay
2		121,40–121,50			
3		122,80–123,08			
4		132,10–132,40			
5	1157	133,70–134,50	$\text{P}_3^2\text{bf}$	бирофельд- ская birofeld	глина/clay
6		63,75–63,90			
7	65,00–67,00				
8	1180	101,35–101,40	$\text{P}_3^2\text{cr}$	черноречен- ская black River	глина углистая carbonaceous clay
9		102,50–102,70			бурый уголь brown coal
10		105,90–106,20			алевроит глинистый clayey silt
11		111,80–112,00			глина углистая carbonaceous clay
12		112,00–112,25			
13		116,02–116,12			
14		117,30–117,40			$\text{P}_3^1\text{cr}$
15	117,80–118,00				
16	162,20–162,40	глина углистая carbonaceous clay			
17	164,70–164,75		бурый уголь/brown coal		
18	164,75–164,80		глина углистая carbonaceous clay		
19	165,80–165,90	алевроит/silt			

#### Геохимия органического вещества Ушумунского месторождения

Все изученные толщи обогащены рассеянным ОВ –  $\text{C}_{\text{орг}}$  составляет от 0,8–7,1 % в алевроитах до 1,5–23,0 % в глинистых породах (табл. 2), причем рассеянным ОВ наиболее обогащены ушумунские глины (11,7–23,0 %). Согласно изотопному составу углерода органическое вещество является террагенным – ( $\delta^{13}\text{C} \geq 27\text{‰}$  – табл. 2, рис. 1, Б) [4]. Повышенная обогащенность ОВ, судя по прямо пропорциональной зависимости его изотопного состава  $\delta^{13}\text{C}$  (рис. 2) от концентраций  $\text{C}_{\text{орг}}$ ,

связана именно с вкладом террагенного керогена типа III (рис. 2). Две исследованные пробы угля чернореченской свиты находятся на рисунке вне общего тренда повышения  $\delta^{13}\text{C}$  с ростом концентрации  $C_{\text{орг}}$ , но их изотопный состав не опровергает общую закономерность.

По данным пиролиза более половины образцов также относится к керогену типа III ( $\text{HI} \leq 160$  мг УВ/г  $C_{\text{орг}}$ ) [2, 3, 25], среди них все глины бирюфельдской свиты, все алевролиты и три пробы глины чернореченской свиты (табл. 2, рис. 1, А, 2). Судя по высо-

кому водородному индексу  $\text{HI}$ , кероген типа II (аквагенный морской) отмечается во всех глинах ушумунской и углях чернореченской свиты. В глинах чернореченской свиты также обнаружено три стратиграфических уровня (102,50–102,70 м; 116,02–117,40 м; 164,70–164,80 м) обогащенности аквагенным ОВ (табл. 2, рис. 1, А, 2). В образцах этих трех уровней данные пиролиза (кероген типа II по  $\text{HI}$ ) не соответствуют выводам по изотопному анализу углерода (террагенный кероген).

**Таблица 2.** Концентрации, пиролитические и изотопные характеристики органического углерода, концентрации и групповой состав битумоидов

**Table 2.** Concentrations, pyrolytic and isotopic characteristics of organic carbon; and concentration and group composition of bitumen extracts

Образец Sample	$C_{\text{орг}}/\text{ТОС}$	Пиролиз Pyrolysis				$\delta^{13}\text{C}$	$b_{\text{хл}}$ bitumen	$\beta$	Групповой состав, % на $b_{\text{хл}}$ Group composition, % per bitumen			
		S1	S2	$T_{\text{max}}$	HI				насыщенные УВ saturated HC	ароматические УВ aromatic HC	смолы resins	асфальтены asphaltenes
1	17	2,2	29	408	198	-25,0	0,71	2,9	10,2	4,3	75,4	10,1
2	23	2,8	51	416	298	-25,1	0,66	2,0	7,7	3,0	79,8	9,5
3	12	1,4	22	373	231	-24,0	0,58	3,5	8,1	6,3	70,0	15,6
4	6,5	0,2	5,8	408	97	-25,3	0,08	0,9	10,7	4,6	76,7	8,0
5	5,1	0,2	3,7	431	75	-25,4	0,06	0,8	13,4	7,5	68,6	10,6
6	2,4	0,1	2,2	429	76	-25,8	0,05	1,5	13,1	7,1	75,9	3,9
7	1,5	0,0	1,0	425	46	-26,5	0,03	1,3	16,0	12,7	68,1	3,1
8	5,6	0,2	9,1	432	160	-26,7	0,08	1,0	10,3	4,3	77,7	7,7
9	56	4,7	116	401	279	-24,4	2,25	2,8	8,1	4,4	66,0	21,5
10	6,5	0,3	5,6	425	89	-26,1	0,08	0,8	9,1	7,9	69,4	13,6
11	7,1	0,5	8,1	424	114	-26,7	0,11	1,0	12,8	9,0	72,8	5,4
12	5,4	0,3	6,6	428	119	-25,9	0,10	1,3	13,6	4,6	77,1	4,8
13	10	1,3	21	417	207	-25,0	0,31	2,1	6,9	1,1	80,4	11,6
14	14	1,0	33	428	257	-25,7	0,30	1,6	4,1	11,9	79,6	4,5
15	2,8	0,1	2,7	424	87	-26,3	0,06	1,5	14,0	6,7	74,2	5,1
16	9,2	0,2	7,6	420	84	-24,9	0,09	0,7	10,1	5,8	80,6	3,5
17	52	3,8	77	404	181	-24,7	1,55	2,1	5,9	4,9	70,3	18,9
18	7,6	1,2	20	423	248	-25,8	0,54	4,9	3,5	4,2	76,8	15,5
19	0,8	0,0	0,7	423	52	-26,4	0,03	2,8	14,8	20,6	61,1	3,6

Примечание:  $C_{\text{орг}}$  – концентрация органического углерода в % на породу; S1 – количество свободных углеводородов (УВ), мг УВ/г породы; S2 – количество УВ, полученных в процессе крекинга керогена, мг УВ/г породы; HI – водородный индекс ( $S2/C_{\text{орг}} \times 100$ ), мг УВ/г  $C_{\text{орг}}$ ;  $T_{\text{max}}$  – температура (°C) максимального выхода УВ пика S2 в процессе крекинга керогена;  $\delta^{13}\text{C}$  – изотопный состав  $C_{\text{орг}}$ , ‰;  $b_{\text{хл}}$  – концентрация экстрагируемых хлороформом битумоидов в % на породу;  $\beta$  – битумоидный коэффициент, процентное содержание  $b_{\text{хл}}$  по сравнению с  $C_{\text{орг}}$ .

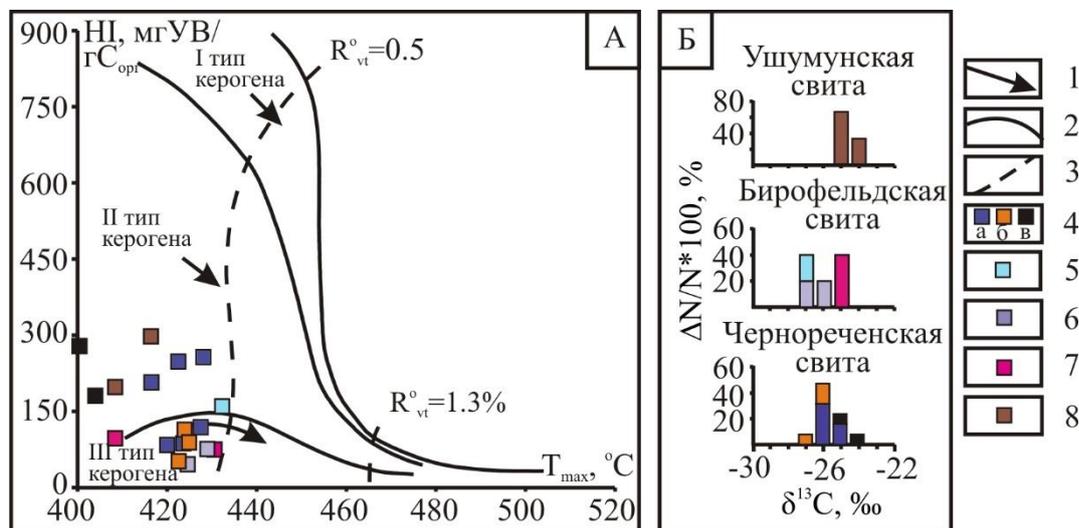
Note: TOC – total organic carbon, % per rock; S1 – volatile hydrocarbons (HC), mg HC/g rock; S2 – HC generated by cracking of kerogen, mg HC/g rock; HI – hydrogen index ( $S2/\text{TOC} \times 100$ ), mg HC/g TOC;  $T_{\text{max}}$  – the temperature (°C) at which the maximum amount of S2 is generated from the kerogen;  $\delta^{13}\text{C}$  – TOC isotope composition, ‰; bitumen – organic matter extracted from rock using chloroform, % per rock;  $\beta$  – bitumen ratio, the ratio of extractable bitumen to TOC, %.

Возможно, противоречивость результатов изотопного и пиролитического анализов ОВ на его генетический тип примерно в половине образцов коллекции обусловлена специфичностью исходной биоты этого бассейна, характерной, вероятно, для ее географической локализации и/или возраста. Однако такое несоответствие отмечалось ранее и в незрелом девонском

органическом веществе Кузбасса [26]. Бурые угли, изученные в работе [14] в верхней части разреза, также имеют  $\text{HI} > 60$  мг УВ/г  $C_{\text{орг}}$ . Следовательно, еще одной причиной подобных изотопных и пиролитических характеристик может быть низкий уровень катагенетической преобразованности ОВ. Соотношение концентраций  $C_{\text{орг}}$  и водородного индекса  $\text{HI}$  (рис. 2)

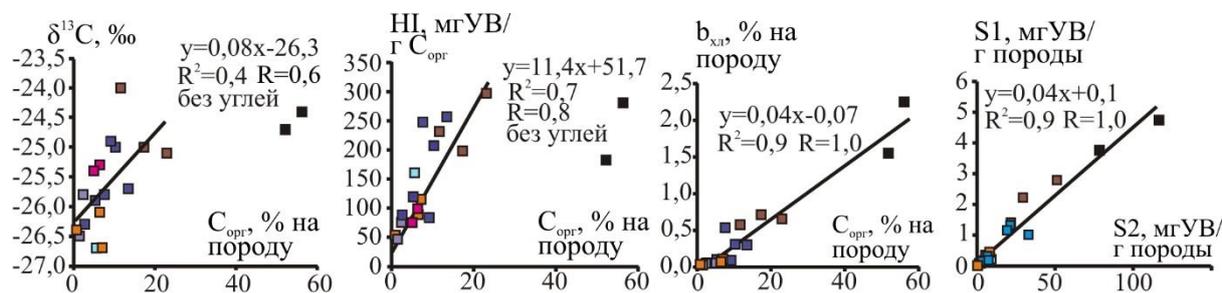
присуще автохтонному ОВ, относящемуся к типу III и II, сохранившему генерационный потенциал и не содержащему битумов. От общей тенденции отклоняются два чернореченских угля, в которых высокий  $C_{орг}$  не сопровождается значительным повышением генерационных свойств, однако, судя по их взаимному расположению на рис. 2, обогащенность ОВ связана с вкладом террагенного керогена типа III. По-

скольку морских отложений кайнозойского возраста в пределах месторождения нет, тип II, вероятно, является смесью типов I (аквагенный озерный) и III (террагенный). Во всех изученных образцах ОВ незрелое по данным пиролиза (табл. 2, рис. 1), что подтверждается результатами углепетрографии в углях – отражательная способность витринита  $R_{vt}^o$  составляет 0,42 и 0,43 %.



**Рис. 1.** Диаграмма  $HI-T_{max}$  и изотопный состав ( $\delta^{13}C$ , ‰) органического вещества в образцах Ушумунского бурогольного месторождения Среднеамурского осадочного бассейна: 1 – направленность изменений величин  $HI$  и  $T_{max}$  в катагенезе; 2 – линии, ограничивающие максимальные значения водородного индекса для трех типов органического вещества (I – аквагенного озерного, II – аквагенного морского, III – террагенного); 3 – изолинии отражательной способности витринита ( $R_{vt}^o$ ), ограничивающие главную зону нефтеобразования; 4 – глины (а), алевриты (б) и угли (в) чернореченской свиты ( $P_3^{1-2}чр$ ) скв. 1180; 5 – глина бирюфельдской свиты ( $P_3^{2bf}$ ) скв. 1180; 6 – глины бирюфельдской свиты ( $P_3^{2bf}$ ) скв. 1157; 7 – глины бирюфельдской свиты ( $P_3^{2bf}$ ) скв. 1138; 8 – глины ушумунской свиты ( $N_1^{1уш}$ ) скв. 1138

**Fig. 1.**  $HI-T_{max}$  diagram and isotopic composition ( $\delta^{13}C$ , ‰) of organic matter in samples from the Ushumunskoe brown coal field of the Middle Amur sedimentary basin: 1 – direction of changes in hydrogen index ( $HI$ ) and  $T_{max}$  during catagenesis; 2 – lines delimiting the maximum values of the  $HI$  for three types of organic matter (I – sapropelic lake, II – sapropelic marine, III – terrestrial); 3 –  $R_{vt}^o$  contours of the oil window; 4 – clay (a), silt (b) and coal (c) of the Black River Fm ( $P_3^{1-2}чр$ ) in well 1180; 5 – the Birofeld Fm clay ( $P_3^{2bf}$ ) in well 1180; 6 – the Birofeld Fm clays ( $P_3^{2bf}$ ) in well 1157; 7 – the Birofeld Formation clays ( $P_3^{2bf}$ ) in well 1138; 8 – the Ushumun Fm clays of ( $N_1^{1уш}$ ) in well 1138



**Рис. 2.** Взаимосвязь между концентрациями органического вещества ( $C_{орг}$ ), его изотопным составом ( $\delta^{13}C$ ) и водородным индексом ( $HI$ ), а также с концентрациями битумоидов ( $b_{хл}$ ), соотношения  $S1$  и  $S2$  (условные обозначения на рис. 1)

**Fig. 2.** Relationship between concentrations of the organic matter ( $TOC$ ), its isotopic composition ( $\delta^{13}C$ ) and hydrogen index ( $HI$ ), as well as with concentrations of the bitumen extracts; relationship between  $S1$  and  $S2$  (legend in Fig. 1)

Наиболее обогащены битумоидами чернореченские угли, а рассеянное ОВ содержит наиболее высокий процент битумоида в ушумунских глинах, и также в среднем довольно высокие концентрации отмечаются в чернореченских глинах в интервалах, обо-

гащенных керогеном с высоким  $HI$  (табл. 2, рис. 2). Низкий битумоидный коэффициент  $\beta$  ( $<5$  %) и соотношение концентраций  $C_{орг}$  и  $b_{хл}$ , а также «битумоидной» ( $S1$ ) и «керогеновой» ( $S2$ ) составляющих ОВ (табл. 2, рис. 2) указывают на автохтонность битумо-

идов коллекции, следовательно, выводы по геохимическому изучению битумоидов можно распространить на вмещающие толщи. В битумоидах всех образцов преобладают смолы (61,1–80,6 %), насыщенных УВ <15 %, ароматических УВ <10 %, за исключением 3 образцов (11,9–20,6 %), в двух из них и еще в одной глине содержания ароматических УВ больше, чем насыщенных, тогда как в основном насыщенных УВ примерно вдвое больше, чем ароматических, а в трех пробах глин это превышение увеличивается до 2,6–6,3 раз (табл. 2). Концентрации асфальтенов в среднем составляют 9,3 %, но варьируют широко – от 3,5 % в пробе из чернореченских глин до 18,9 и 21,5 % в зольных углях.

Распределение нормальных алканов соответствует террагенному незрелому ОВ – максимумы на  $nC_{29}$  и на  $nC_{27}$ ,  $nC_{27}/nC_{17} > 1,7$  и коэффициенты нечетности  $CPI > 2$  (табл. 3, рис. 3). Соотношение  $n$ -алканов  $nC_{27}/nC_{31}$ , по которому определяют пропорции вклада древесных и травянистых растений [27 и др.] высокое (в основном  $> 1$ ) и указывает на высокий процент древесных растений по сравнению с травами. Судя по соотношению  $n$ -алканов ( $Paq = (nC_{23} + nC_{25}) / (nC_{23} + nC_{25} + nC_{29} + nC_{31})$ ), по которому определяют характер озерных растений [27, 28 и др.], источник ОВ не был исключительно наземным – в изученной коллекции нет образцов с  $Paq < 0,1$ . В основном  $Paq$  составляет 0,2–0,4, что характерно для растений, имеющих надводную часть, а в трех образцах  $Paq = 0,5$ , что свидетельствует о высоком вкладе подводных растений. Этот вывод согласуется с выводом по результатам пиролиза (стратиграфические уровни с высокими значениями  $HI$ ) о периодическом возникновении озерных обстановок осадконакопления. В ациклических изопреноидах чаще фитан имеет более высокие концентрации, чем пристан, что свойственно аквагенному ОВ, и в ряде образцов с высокими концентрациями фитана присутствуют необычные максимумы на  $iC_{21}$  и  $iC_{22}$  (рис. 3). Высокие концентрации ациклических изопреноидов состава  $> C_{20}$  могут указывать на значительный вклад археа в исходное живое вещество [6]. Возможно, эти особенности связаны с незрелостью террагенного керогена при довольно высоких концентрациях ОВ или со специфичностью исходной биоты этого бассейна.

В циклических насыщенных биомаркерах типичные пики стеранов и терпанов отсутствуют или совершенно теряются на фоне интенсивных выходов соединений, свойственных незрелому органическому веществу. Отсутствие стеранов и терпанов или очень низкие их концентрации, наличие каурана, биерана, филлокладанов, биогпанов и гопенов (рис. 4) характерно для незрелого ОВ [14–18]. Наличие тетрациклических битерпанов, таких как биеран, кауран, филлокладаны, свидетельствует об участии в комплексе исходного живого вещества смол высших растений *Podocarpaceae* и *Araucareaceae* [5, 6, 29].

В большинстве образцов концентрация фенантронов (<65 %), моно- и триароматических стероидов (>3 %), отношение ТАС/МАС (>2) (табл. 4, рис. 5) соответствуют аквагенному ОВ [7]. ОВ, судя по низ-

кому отношению 4МДВТ/Р, накапливалось в бассейне с глинистой седиментацией, за исключением образцов № 6, 18, 19, в которых повышенные значения 4МДВТ/Р указывают на кремнистые материнские породы [11]. Почти во всех образцах (рис. 5) аквагенное «V»-образное распределение метилдibenзотиофенов [8–10] и почти в половине образцов высокие концентрации дибензотиофенов свидетельствуют об избытке серы в осадке в диагенезе [7, 12, 13]. Отношение триароматических стероидов ТАСИ=ТАС<sub>20-21</sub>/(ТАС<sub>20-21</sub>+ТАС<sub>26-28</sub>) в основном низкое ( $\leq 0,1$ ) (табл. 4), что соответствует концу протокатагенеза и началу мезокатагенеза (градация МК<sub>1</sub><sup>1</sup>) [5, 30], по остальным ароматическим параметрам оценка катагенетической преобразованности в основном получается завышенной, возможно, из-за низких концентраций ароматической фракции.

Таблица 3. Характеристики ациклических углеводородов-биомаркеров

Table 3. Characteristics of acyclic biomarker hydrocarbons

Образец Sample	Максимум в $n$ -алканах Maximum in $n$ -alkanes	$nC_{27}/nC_{17}$	CPI	$nC_{27}/nC_{31}$	Paq	Максимум в $iso$ -алканах Maximum in $iso$ -alkanes	Pr/Ph	Pr/ $nC_{17}$	Ph/ $nC_{18}$
1	C <sub>29</sub>	13,0	4,4	0,7	0,3	C <sub>20</sub>	0,9	0,2	0,2
2	C <sub>29</sub>	14,3	3,2	1,3	0,4	C <sub>20</sub>	0,8	0,3	0,2
3	C <sub>29</sub>	27,0	3,2	1,1	0,5	C <sub>22</sub>	0,6	0,3	0,2
4	C <sub>29</sub>	20,6	3,2	1,1	0,3	C <sub>21</sub>	0,6	0,2	0,2
5	C <sub>29</sub>	2,6	3,2	1,2	0,3	C <sub>19</sub>	1,0	0,2	0,2
6	C <sub>27</sub> , C <sub>29</sub>	2,8	2,9	1,6	0,4	C <sub>20</sub>	0,9	0,3	0,4
7	C <sub>29</sub>	3,8	3,2	1,4	0,4	C <sub>20</sub>	0,9	0,3	0,3
8	C <sub>27</sub>	4,6	3,0	1,7	0,5	C <sub>20</sub>	0,8	0,2	0,3
9	C <sub>29</sub>	5,1	3,4	0,6	0,2	C <sub>22</sub>	0,8	0,2	0,4
10	C <sub>29</sub>	23,0	2,2	1,9	0,4	C <sub>21</sub>	0,5	0,3	0,3
11	C <sub>29</sub>	6,7	2,9	1,8	0,4	C <sub>19</sub>	1,1	0,3	0,3
12	C <sub>29</sub>	2,8	3,2	1,7	0,3	C <sub>19</sub>	1,1	0,2	0,2
13	C <sub>29</sub>	11,8	2,9	0,9	0,4	C <sub>22</sub>	0,7	0,3	0,2
14	C <sub>29</sub>	4,0	2,2	1,3	0,5	C <sub>19</sub>	1,1	0,3	0,3
15	C <sub>29</sub>	1,7	2,6	1,4	0,4	C <sub>22</sub>	1,0	0,3	0,3
16	C <sub>29</sub>	1,8	2,7	0,9	0,4	C <sub>20</sub>	0,5	0,2	0,3
17	C <sub>29</sub>	24,8	2,9	0,8	0,2	C <sub>20</sub>	0,8	1,1	0,6
18	C <sub>29</sub>	7,2	2,2	0,9	0,4	C <sub>20</sub>	0,7	0,3	0,4
19	C <sub>29</sub>	3,5	3,0	0,7	0,3	C <sub>20</sub>	0,6	0,6	0,8

$$CPI = [nC_{23} + 2(nC_{25} + nC_{27} + nC_{29} + nC_{31}) + nC_{33}] / 2 / (nC_{24} + nC_{26} + nC_{28} + nC_{30} + nC_{32})$$

$$Paq = (nC_{23} + nC_{25}) / (nC_{23} + nC_{25} + nC_{29} + nC_{31})$$

В образцах обнаружен биомаркер хвойных растений ретен [6 и др.], отчетливо определяемый по  $m/z$  219, 234 [31]. Концентрации его увеличиваются вниз по разрезу и наибольшие обнаружены в образцах 17–19 (рис. 6), где на хроматограммах общего тока они образуют абсолютный максимум. Другие высокие пики на хроматограмме ароматических соединений (рис. 6) определить не удалось, возможно, пик 1, судя по масс-фрагментограммам по  $m/z$  141, 142 содержит длинноцепочечные алкилнафталины, источником которых являются водоросли *Botryococcus Braunii*, характерные для озерных обитателей [6 и др.], а пик 2, проявляющийся на масс-фрагментограмме по  $m/z$  253, относится к моноароматическим соединениям.

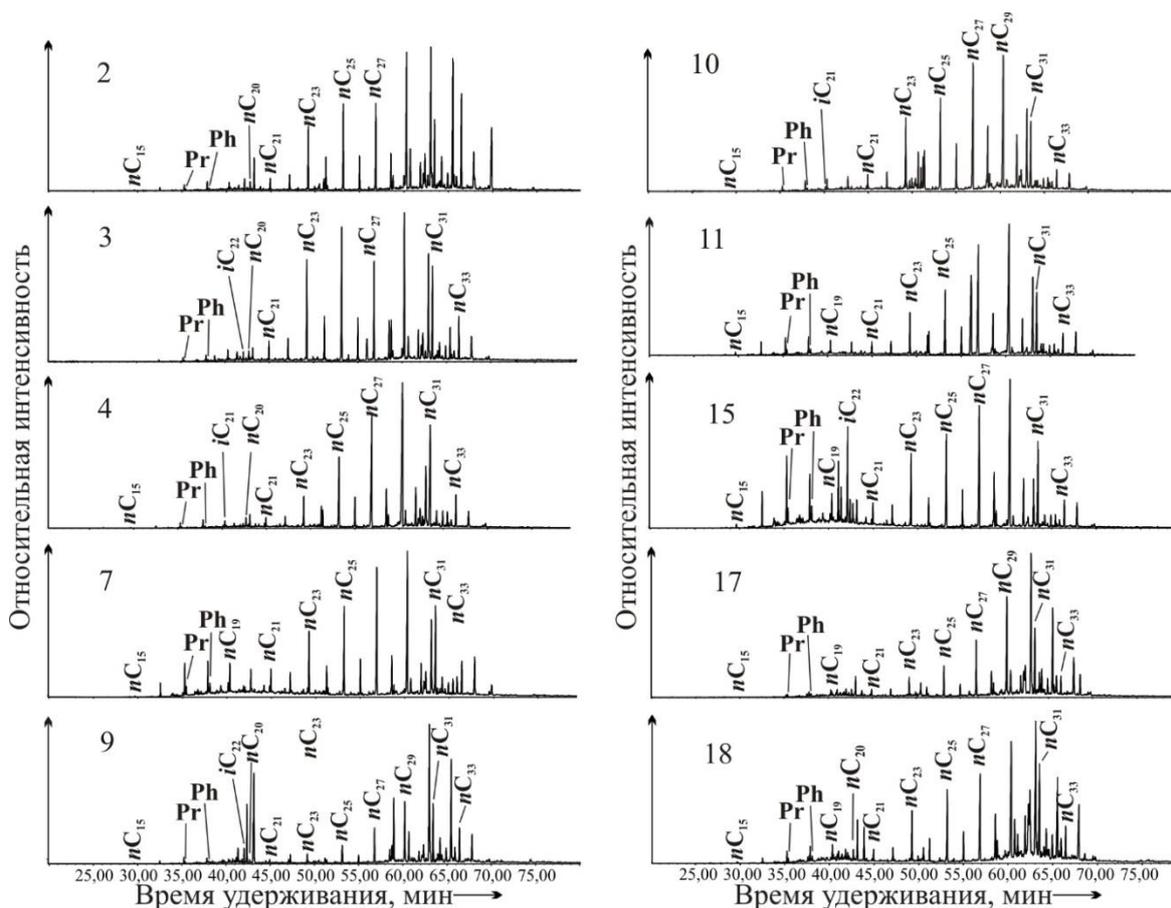


Рис. 3. Основные газожидкостные хроматограммы ( $nC_{15+}$  –  $n$ -алканы, Pr и Ph – пристан и фитан,  $iC_{21}$  и  $iC_{22}$  – ациклические изопреноиды), номера образцов соответствуют табл. 3

Fig. 3. Main gas-liquid chromatograms ( $nC_{15+}$  –  $n$ -alkanes, Pr and Ph – pristane and phytane,  $iC_{21}$  and  $iC_{22}$  – acyclic isoprenoids); the sample numbers correspond to Table 3

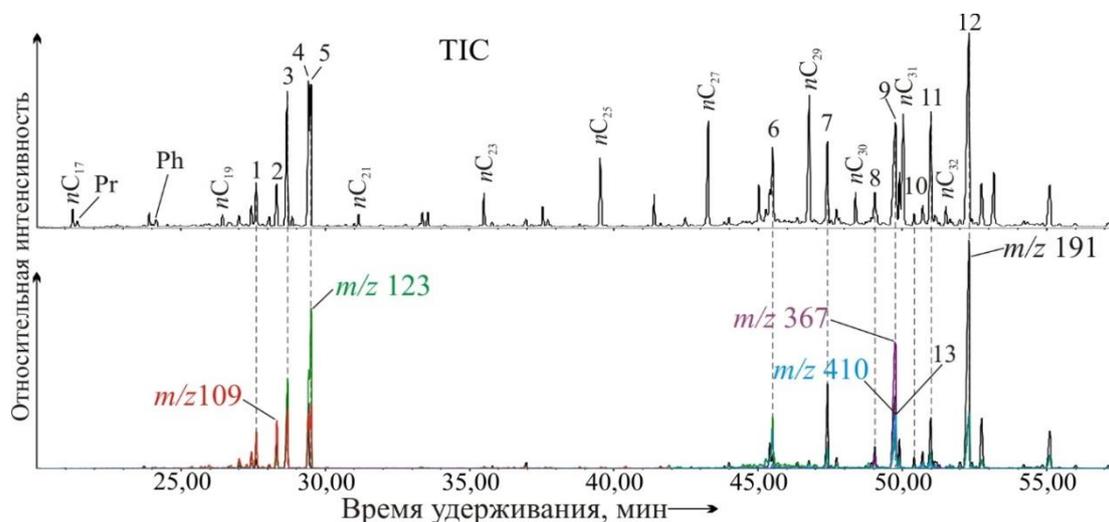
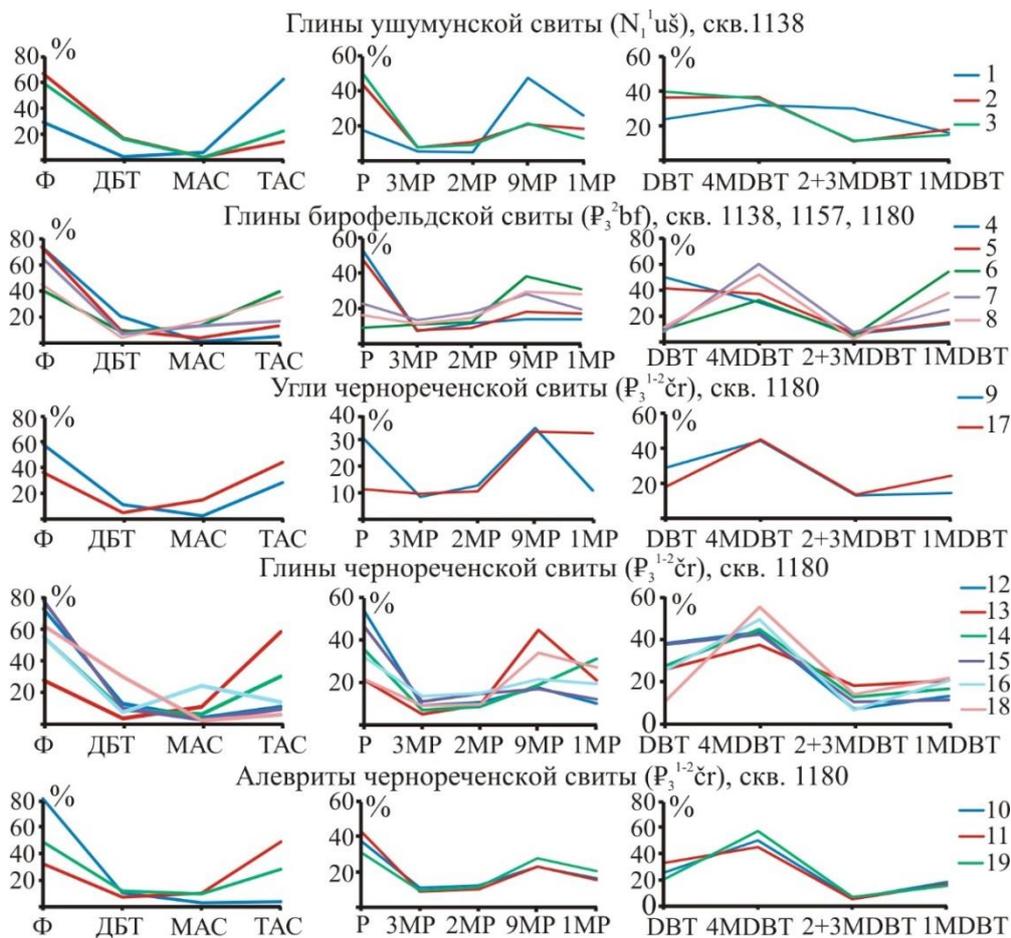


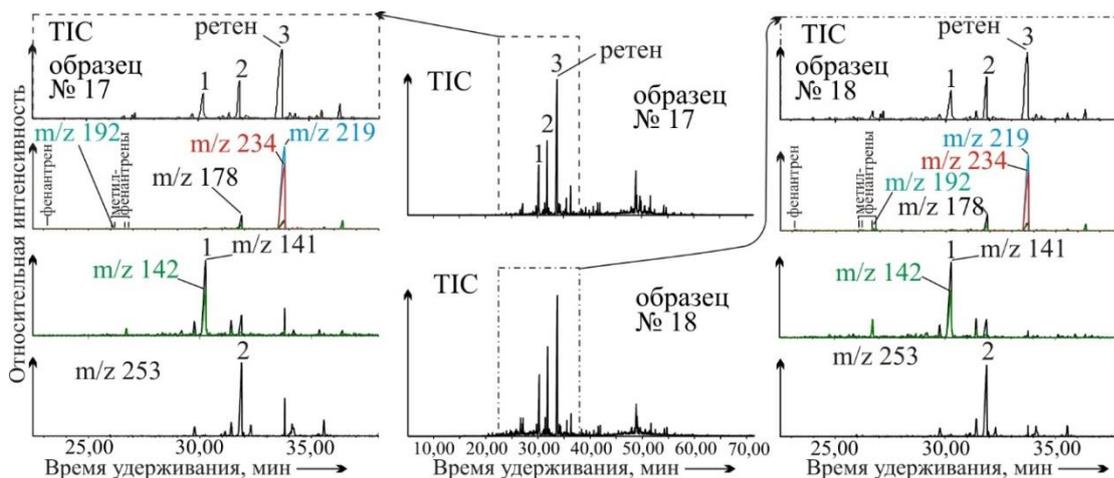
Рис. 4. Масс-хроматограмма по общему ионному току (TIC) и масс-хроматограммы терпановых углеводородов по ионам  $m/z$  191, 123, 109, 367, 410, 193 из битумоида угля № 9 чернореченской свиты ( $nC_{17+}$  –  $n$ -алканы, Pr и Ph – пристан и фитан, 1 – бейеран, 2 – изопимаран, 3 –  $\beta$ -филлокладан, 4 –  $\beta$ -кауран, 5 –  $\alpha$ -филлокладан, 6 – гопен 17(21)  $C_{27}$ , 7 –  $\beta\beta$ -гопан  $C_{27}$ , 8 – гопен  $C_{30}$ ?, 9 – гопен 17(21)  $C_{30}$ , 10 –  $\alpha\beta$ -гопан  $C_{30}$ , 11 – моретан  $C_{30} + \beta\beta$ -гопан  $C_{29}$ , 12 –  $\alpha\beta$ -гопан  $C_{31}R + \beta\beta$ -гопан  $C_{30}$ , 13 – олеанен?)

Fig. 4. Mass chromatogram by total ion current (TIC) and mass chromatograms of terpane hydrocarbons by ions  $m/z$  191, 123, 109, 367, 410, 193 in the coal bitumen extract from sample no. 9 of the Black River Fm ( $nC_{17+}$  –  $n$ -alkanes, Pr and Ph – pristane and phytane, 1 – beyerane, 2 – isopimarane, 3 –  $\beta$ -phyllocladane, 4 –  $\beta$ -kaurane, 5 –  $\alpha$ -phyllocladane, 6 – hopene 17 (21)  $C_{27}$ , 7 –  $\beta\beta$ -hopane  $C_{27}$ , 8 – hopene  $C_{30}$ ?, 9 – hopene 17 (21)  $C_{30}$ , 10 –  $\alpha\beta$ -hopane  $C_{30}$ , 11 – moretane  $C_{30} + \beta\beta$ -hopane  $C_{29}$ , 12 –  $\alpha\beta$ -hopane  $C_{31}R + \beta\beta$ -hopane  $C_{30}$ , 13 – oleanene?)



**Рис. 5.** Концентрации ароматических и серосодержащих соединений (Ф – фенантрены, ДБТ – дибензотиофены, МАС и ТАС – моно- и триароматические стероиды), распределение фенантренов (Р – фенантрен; 1МР, 2МР, 3МР, 9МР – 1-, 2-, 3-, 9-метилфенантрены) и дибензотиофенов (ДБТ – дибензотиофен; 1МДБТ, 2+3МДБТ, 4МДБТ – 1-, 2- и 3-, 4-метилдибензотиофены), номера проб соответствуют табл. 4

**Fig. 5.** Concentrations of aromatic and sulfur-containing compounds (P – phenanthrenes, DBT – dibenzothiophenes, MAS and TAS – mono- and triaromatic steroids), distribution of phenanthrenes (P – phenanthrene; 1MP, 2MP, 3MP, 9MP – 1-, 2-, 3-, 9-methylphenanthrenes) and dibenzothiophenes (DBT – dibenzothiophene; 1MDBT, 2+3MDBT, 4MDBT – 1-, 2+3-, 4-methyldibenzothiophenes), the sample numbers correspond to the Table 4



**Рис. 6.** Хроматограммы соединений ароматической фракции по общему ионному току и синтетические масс-фрагментограммы ( $m/z$  178, 192, 219, 234 и по 141, 142), а также масс-фрагментограмма моноароматических соединений ( $m/z$  253) в образцах чернореченской свиты из скв. 1180 Ушумунского месторождения

**Fig. 6.** Chromatograms of compounds of aromatic fraction by TIC and synthetic mass fragmentograms ( $m/z$  178, 192, 219, 234 and 141, 142), and a mass fragmentogram of monoaromatic compounds ( $m/z$  253) in samples no. 17, 18 from the Black River Fm, well 1180 of the Ushumunskoe field

**Таблица 4.** Характеристики ароматических и серосодержащих соединений

**Table 4.** Characteristics of aromatic and sulfur-containing compounds

Образец/Sample	TAC/MAC TAS/MAS	TACI=(TASC <sub>20+</sub> + TASC <sub>21</sub> )/TAC TASI=(TASC <sub>20+</sub> + TASC <sub>21</sub> )/TAS	4MDBT/1MDBT	(2MP+3MP) (1MP+9MP)	4MDBT/P	$T_{max}=5 \times (4MDBT/1MDBT)+423$	$R^2=0,07 \times (4MDBT/1MDBT)+0,52$
1	11,1	0,01	2,0	0,1	0,2	433	0,66
2	6,5	0,00	2,1	0,5	0,2	433	0,66
3	12,3	0,00	2,4	0,5	0,2	435	0,69
4	5,1	0,03	2,2	0,7	0,2	434	0,68
5	3,5	0,01	2,5	0,5	0,1	435	0,69
6	3,1	0,2	0,6	0,3	0,7	426	0,56
7	1,3	0,1	2,4	0,7	0,3	435	0,69
8	2,1	0,03	1,4	0,4	0,3	430	0,62
9	12,6	0,1	3,1	0,5	0,3	439	0,74
10	1,3	1,0	2,7	0,6	0,2	437	0,71
11	4,8	0,02	2,7	0,5	0,2	437	0,71
12	2,8	0,01	3,4	0,7	0,1	440	0,76
13	5,5	0,05	1,8	0,2	0,2	432	0,65
14	4,9	0,1	2,7	0,3	0,2	437	0,71
15	3,6	0,01	3,8	0,9	0,1	442	0,79
16	0,6	0,04	2,4	0,7	0,2	435	0,69
17	3,0	0,02	1,9	0,3	0,5	432	0,65
18	2,7	0,04	2,6	0,3	1,2	436	0,70
19	2,9	0,03	3,7	0,4	0,5	441	0,78

#### Заключение

Выполненные исследования позволяют определить следующие основные геохимические характеристики органического вещества Ушумунского месторождения:

- все изученные толщи содержат катагенетически незрелое (результаты углепетрографии, пиролиза) ОБ;
- по изотопному составу углерода ОБ является *террагенным*, а по пиролитическим характеристикам в половине образцов – *аквагенным*;
- автохтонные (низкий битумоидный коэффициент β, низкие концентрации углеводородов) битумоиды являются по распределению *n*-алканов *террагенными незрелыми* (исходная биота представлена преимущественно древесными растениями, но с большим вкладом водных растений, имеющих надводную часть), по соотношению Pr/Ph

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Среднеамурский осадочный бассейн: геологическое строение, геодинамика, топливно-энергетические ресурсы / отв. ред. Г.Л. Кириллова. – Владивосток: Дальневосточное отделение Российской академии наук, 2009. – 424 с.
2. Лопатин Н.В., Емец Т.П. Пиролиз в нефтегазовой геохимии. – М.: Наука, 1987. – 144 с.
3. Меленевский В.Н. Методические рекомендации по применению пиролитических методов моделирования в органической геохимии: методическое рук-во. – Новосибирск: СНИИГ-ГиМС, 1991. – 50 с.
4. Изотопный состав углерода рассеянного органического вещества и битумоидов и некоторые спорные вопросы теории образования нефти / А.Э. Конторович, Н.А. Верховская, И.Д. Тимошина, А.С. Фомичев // Геология и геофизика. – 1986. – № 5. – С. 3–12.

большей частью соответствуют аквагенному ОБ, и в ряде образцов максимумы в составе ациклических изопреноидов приходятся на *i*-C<sub>21</sub> и *i*-C<sub>22</sub>, возможно, из-за значительного вклада организмов домена архея в исходное живое вещество;

- низкие концентрации или отсутствие стеранов и терпанов, присутствие биогпанов и гопенов характерно для незрелого ОБ;
- наличие каурана, биерана, филлокладанов также характерно для незрелого ОБ и свидетельствует об участии в комплексе исходного живого вещества смол высших растений Podocarpaceae и Araucareaceae;
- наличие биомаркера хвойных растений ретена и, возможно, присутствие длинноцепочечных алкилнафталинов, биомаркеров озерных водорослей *Botryococcus Braunii* указывают на основную флору, участвовавшую в исходном ОБ;
- в большинстве образцов характеристики ароматической фракции соответствуют *аквагенному* ОБ, пережившему диагенез часто с избытком серы в осадке;
- отношение триароматических стероидов TACI соответствует концу протокатагенеза и началу мезокатагенеза (градация МК<sub>1</sub><sup>1</sup>).

Возможно, особенности в характеристиках (террагенность по изотопному анализу, распределению *n*-алканов во всех образцах и по наличию биомаркеров высших наземных растений и аквагенность по пиролитическим данным, по ароматическим параметрам и ациклическим изопреноидам в большей части образцов) связаны с возрастной спецификой кайнозойского ОБ и с его катагенетической незрелостью при довольно высоких концентрациях, а также с неоднократными сменами режима осадконакопления изученных толщ Ушумунского месторождения с озерного до торфяно-болотного и обратно.

*Авторы благодарят В.В. Крапивенцеву за предоставление коллекции пород Ушумунского месторождения для геохимических исследований и В.А. Каширцева за консультации по индикации и интерпретации биомаркеров незрелого органического вещества.*

*Работа выполнена при поддержке проекта ФНИ № 0331-2019-0022 «Органическая геохимия и история геологического развития доминантных нефтегазовых систем верхнего протерозоя и фанерозоя Сибири».*

5. Peters K.E., Moldowan J.M. The biomarker guide: interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments. – New Jersey, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1993. – 363 p.
6. Peters K.E., Walters C.C., Moldowan J.M. The biomarker guide. – Cambridge: Cambridge University Press, 2007. – 1155 p.
7. Фенантрены, ароматические стераны и дибензотиофены в юрских отложениях Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна и их значение для органической геохимии / А.Э. Конторович, В.Н. Меленевский, Е.Н. Иванова, А.Н. Фомин // Геология и геофизика. – 2004. – Т. 45. – № 7. – С. 873–883.
8. Radke M., Welte D.H., Willsch H. Maturity parameters based on aromatic hydrocarbons: Influents of the organic matter type // Organic Geochemistry. – 1986. – V. 10. – P. 51–63.
9. Aromatic components of coal: relation of distribution pattern to rank / M. Radke, H. Willsch, D. Leuthaeuser, M. Teichmuller // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1982. – V. 46. – P. 1831–1848.

10. Schou L., Myhr M.B. Sulfur aromatic compounds as maturity parameters // *Organic Geochemistry*. – 1988. – V. 13. – P. 61–66.
11. Geochemical characteristics of Tertiary oils derived from siliceous sources in Japan, Russia and USA / A. Chakhmakhchev, M. Suzuki, A. Waseda, K. Takayama // *Organic Geochemistry*. – 1997. – V. 27. – № 7–8. – P. 523–536.
12. Дахнова М.В. Геохимия сераорганических соединений и ее роль в прогнозе нефтегазоносности. – М.: Геоинформмарк, Геоинформ, 2000. – 50 с.
13. Конторович А.Э., Парфенова Т.М., Иванова Е.Н. Ароматические углеводороды-биомаркеры и дибензотиофены в битумоидах куонамской свиты (северо-восток Сибирской платформы) // *Доклады Академии Наук*. – 2005. – Т. 402. – № 6. – С. 804–806.
14. Coal characteristics and biomarker investigations of Dombayova coals of Late Miocene-Pliocene age (Afyonkarahisar-Turkey) / A. Bechtel, A.I. Karayigit, Y. Bulut, M. Mastalerz, R.F. Sachsenhofer // *Organic Geochemistry*. – 2016. – V. 94. – P. 52–67.
15. Каширцев В.А., Конторович А.Э., Москвин В.И. Биомаркеры в органическом веществе палеогеновых отложений юга Западной Сибири (Омское Прииртышье) // *Нефтехимия*. – 2008. – Т. 48. – С. 269–276.
16. Терпановые и стерановые углеводороды в углях различных генетических типов Сибири / В.А. Каширцев, В.И. Москвин, А.Н. Фомин, О.Н. Чалая // *Геология и геофизика*. – 2010. – Т. 51. – № 4. – С. 516–524.
17. Геохимия биомаркеров и катагенез органического вещества меловых и кайнозойских отложений Индигиро-Зырянского прогиба / В.А. Каширцев, В.В. Гайдук, О.Н. Чалая, И.Н. Зуева // *Геология и геофизика*. – 2012. – Т. 53. – № 8. – С. 1027–1039.
18. Characterisation of lignite lithotypes from the «Kovin» deposit (Serbia) – implications from petrographic, biomarker and isotopic analysis / D. Mitrović, N. Doković, D. Životić, A. Bechtel, O. Svetković, K. Stojanović // *Journal of the Serbian Chemical Society*. – 2017. – V. 82. – № 6. – P. 739–754.
19. Современные методы анализа в органической геохимии / под ред. А.Э. Конторовича. – Новосибирск: Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья, 1973. – 100 с.
20. Matthews D.E., Hayes J.M. Isotope-ratio-monitoring gas chromatography-mass spectrometry // *Analytical Chemistry*. – 1978. – V. 50. – № 11. – P. 1465–1473.
21. Werner R.A., Brand W.A. Referencing strategies and techniques in stable isotope ratio analysis. // *Rapid Communications in Mass Spectrometry*. – 2001. – V. 15. – № 7. – P. 501–519.
22. Чалая О.Н., Каширцев В.А. Основы хроматографии. – Якутск: Якутский государственный университет, 1997. – 156 с.
23. Organic geochemistry of the coal-bearing strata of the Ushumunskoe field (Khabarovsk territory) / V.V. Krapiventseva, I.D. Timoshina, A.N. Fomin, V.N. Melenevsky // *The 28th International meeting on organic geochemistry*. – Florence, Italy, 17–22 September 2017. URL: <http://imog2017.org/wp-content/uploads/2017/04/130.pdf> (дата обращения 20.12.2019).
24. Тимошина И.Д. Органическая геохимия палеогеновых и неогеновых пород Ушумунского месторождения Среднеамурского осадочного бассейна // *Новые идеи в геологии нефти и газа: Международная научно-практическая конференция*. – М., 23–24 мая. – М., Московский государственный университет, 2019. – С. 474–475.
25. Тиссо Б., Вельте Д. Образование и распространение нефти. – М.: Мир, 1981. – 502 с.
26. Organic geochemistry of the Devonian bituminous shales and lipobiotite coals of the Kuznetsk basin / A.E. Kontorovich, I.D. Timoshina, A.N. Fomin, V.N. Melenevsky // *The 28th International meeting on organic geochemistry*. – Florence, Italy, 17–22 September 2017. URL: <http://imog2017.org/wp-content/uploads/2017/04/157.pdf> (дата обращения 20.12.2019).
27. Affouri H., Sahraoui. The sedimentary organic matter from a Lake Ichkeul core (far northern Tunisia): Rock-Eval and biomarker approach // *Journal of African Earth Sciences*. – 2017. – V. 129. – P. 248–259.
28. 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. – V. 31. – P. 745–749.
29. Tetracyclic diterpenoid hydrocarbons in some Australian coals, sediments and crude oils / R.A. Noble, R. Alexander, R.I. Kagi, J. Knox // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1985. – V. 49. – P. 2141–2147.
30. Чухмахчев В.А., Карцев А.А., Прасолов Э.М. Геохимические показатели биогенной природы нафтидов // *Геология нефти и газа*. – 2005. – № 1. – С. 47–52.
31. Биомаркеры-фенантрены в органическом веществе докембрийских и фанерозойских отложений и в нефтях Сибирской платформы / В.А. Каширцев, Т.М. Парфенова, А.К. Головкин, Б.Л. Никитенко, И.Н. Зуева, О.Н. Чалая // *Геология и геофизика*. – 2018. – Т. 59. – № 10. – С. 1720–1729.

Поступила 20.09.2019 г.

#### Информация об авторах

**Тимошина И.Д.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории геохимии нефти и газа Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН.

**Фомин А.Н.**, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории геохимии нефти и газа Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН; заведующий кафедрой геологии месторождений нефти и газа Геолого-геофизического факультета Новосибирского Государственного Университета.

UDC 550.47:552.57(571.62)

## ORGANIC GEOCHEMISTRY OF CENOZOIC ROCKS IN THE USHUMUNSKOE BROWN COAL FIELD OF THE MIDDLE AMUR SEDIMENTARY BASIN

Irina D. Timoshina<sup>1</sup>,  
TimoshinaID@ipgg.sbras.ru

Alexander N. Fomin<sup>1,2</sup>,  
FominAN@ipgg.sbras.ru, a.fomin@g.nsu.ru

<sup>1</sup> Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,  
3, Academician Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

<sup>2</sup> Novosibirsk State University,  
1, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russia.

**The relevance** of the research is conditioned by the necessity to expand the resource base of the Russian Far East. The study of sedimentary basins and their hydrocarbon potential, the development of new forecast technologies for traditional and unconventional hydrocarbon fields is a priority for the Russian Academy of Sciences for many years. The evaluation of source rocks based on levels of their enrichment with the organic matter and its generation potential will provide valuable data for basin modeling. Besides, given that the Ushumunskoe source rocks have not been studied by organic geochemical methods, the present study sets out to clarify the conditions of the organic matter accumulation, and to reconstruct landscapes and biota in the Cenozoic Era.

**The aim** of the research is to characterize the biological source of the organic matter, conditions of its accumulation, diagenetic settings and the level of the Ushumunskoe source rocks maturity.

**Objects** of the research are the Ushumunskoe coals, clays and siltstones from the Middle Amur sedimentary basin.

**Methods:** comparison of the results of pyrolysis and isotope analysis of the organic matter and characteristics of biomarker hydrocarbons obtained using chromatography-mass spectrometry in saturated and aromatic fractions of bitumen extracts, evaluation of sources, as well as diagenetic and catagenetic conditions of organic matter.

**Results.** The Paleogene–Neogene source rocks of the Ushumunskoe brown coal field in the Middle Amur sedimentary basin were studied by the methods of organic geochemistry for the first time. The organic matter of the studied samples has signs of both terrestrial and sapropelic types. The organic carbon isotopic composition, *n*-alkanes distribution, the presence of kaurane, beyerane, phyllocladanes (biomarkers of higher plants Podocarpaceae and Araucareaceae) in the saturated fraction of extractable bitumens, retene (biomarker of conifers) in the aromatic fraction indicate the terrestrial (humic) nature of organic matter. At the same time, in most samples the aromatic fraction characteristics correspond to the sapropelic organic matter, which is evidenced by low concentrations of phenanthrenes, high concentrations of mono- and triaromatic steroids, distributions of methyl dibenzothiophenes, and probable presence of long-chain alkylnaphthalenes (biomarkers of lake algae *Botryococcus braunii*). Phytane concentrations are significantly higher, than pristane, and half of the samples according to the hydrogen index (HI) values belong to type II. Due to the absence of marine deposits in the study area, type II is probably a mixture of type I (lacustrine) and III (continental). Moreover, judging by the HI variations throughout the section, depositional environments changed repeatedly from lacustrine to peatbog and vice versa. In some samples, the maxima in the acyclic isoprenoids fall on *i*-C<sub>21</sub> and *i*-C<sub>22</sub>, possibly due to the significant contribution of archaea to the original living substance. According to the high concentrations of dibenzothiophenes, the organic matter underwent diagenesis with high content of hydrogen sulfide in sediment. Probably, the duality of signatures (terrestrial and sapropelic) is associated with the specificity of the initial biota in this basin and is characteristic of its age and/or geographical localization. The vitrinite reflectance data, pyrolytic characteristics, high carbon preference index in *n*-alkanes, the presence of biohopanes and hopanes, almost complete absence of typical steranes and terpanes, and distribution of triaromatic steroids are interpreted as indications of immature organic matter, with the latter potentially enhancing such a duality of characteristics.

### Key words:

The Far East, Paleogene, Neogene, brown coal, pyrolysis, isotopes, biomarker hydrocarbons, genesis and catagenesis of organic matter.

The authors thank V.V. Krapiventseva for providing a collection of rocks from the Ushumunskoe field for geochemical research and V.A. Kashirtsev for consulting on the identification and interpretation of biomarkers in immature organic matter.

The research was supported by the FSR project no. 0331-2019-0022 «Organic geochemistry and history of geological development of dominant oil and gas systems of upper Proterozoic and Phanerozoic of Siberia».

### REFERENCES

1. *Sredneamurskiy osadochny basseyn: geologicheskoe stroeniye, geodinamika, toplivno-energeticheskie resursy* [Middle Amur sedimentary basin: geological structure, geodynamics, fuel and energy resources]. Ed. by G.L. Kirillova. Vladivostok, Dalnevostochnoe otdelenie Rossiyskoy akademii nauk Publ., 2009. 424 p.
2. Lopatin N.V., Yemets T.P. *Pirolyz v neftegazovoy geokhimii* [Pyrolysis in oil and gas geochemistry]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 144 p.
3. Melenevskiy V.N. *Metodicheskie rekomendatsii po primeneniyu piroliticheskikh metodov modelirovaniya v organicheskoy geokhimii: metodicheskoye rukovodstvo* [Guidelines for the use of pyrolytic modeling methods in organic geochemistry: methodological guide]. Novosibirsk, SNIIGiMS Publ., 1991. 50 p.
4. Kontorovich A.E., Verkhovskaya N.A., Timoshina I.D., Fomichev A.S. Izotopny sostav ugleroda rasseyannogo organicheskogo veshchestva i bitumoidov i nekotorye spornyye voprosy teorii obrazovaniya nefiti [The carbon isotopic composition of dispersed organic matter and bitumoids and some controversial issues in the theory of oil formation]. *Geologiya i geofizika*, 1986, no. 5, pp. 3–12.

5. Peters K.E., Moldowan J.M. *The biomarker guide: interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments*. New Jersey, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1993. 363 p.
6. Peters K.E., Walters C.C., Moldowan J.M. *The biomarker guide*. Cambridge, Cambridge University Press, 2007. 1155 p.
7. Kontorovich A.E., Melenevskiy V.N., Ivanova E.N., Fomin A.N. Fenantreny, aromaticeskije sterany i dibenzotiofeny v yurskikh otlozheniyakh Zapadno-Sibirskogo neftegazonosnogo basseyna i ikh znachenie dlya organicheskoy geokhimii [Phenanthrenes, aromatic steranes and dibenzothiophenes in the Jurassic deposits of the West Siberian oil and gas basin and their importance for organic geochemistry]. *Geologiya i geofizika*, 2004, vol. 45, no. 7, pp. 873–883.
8. Radke M., Welte D.H., Willsch H. Maturity parameters based on aromatic hydrocarbons: Influens of the organic matter type. *Organic Geochemistry*, 1986, vol. 10, pp. 51–63.
9. Radke M., Willsch H., Leuthaeuser D., Teichmuller M. Aromatic components of coal: relation of distribution pattern to rank. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1982, vol. 46, pp. 1831–1848.
10. Schou L., Myhr M.B. Sulfur aromatic compounds as maturity parameters. *Organic Geochemistry*, 1988, vol. 13, pp. 61–66.
11. Chakhmakhchev A., Suzuki M., Waseda A., Takayama K. Geochemical characteristics of Tertiary oils derived from siliceous sources in Japan, Russia and USA. *Organic Geochemistry*, 1997, vol. 27, no. 7–8, pp. 523–536.
12. Dakhnova M.V. *Geokhimiya seraorganicheskikh soedineniy i ee rol v prognoze neftegazonosnosti* [The geochemistry of organosulfur compounds and its role in the prediction of oil and gas]. Moscow, Geoinformmark, Geoinform Publ., 2000. 50 p.
13. Kontorovich A.E., Parfenova T.M., Ivanova E.N. Aromaticeskije uglevodorody-biomarkery i dibenzotiofeny v bitumoidakh kuonamskoy svity (severo-vostok Sibirskoy platformy) [Aromatic biomarker hydrocarbons and dibenzothiophenes in the bitumoids of the Kuonam Formation (northeast of the Siberian Platform)]. *Doklady Akademii Nauk*, 2005, vol. 402, no. 6, p. 804–806.
14. Bechtel A., Karayigit A.I., Bulut Y., Mastalerz M., Sachsenhofer R.F. Coal characteristics and biomarker investigations of Dombayova coals of Late Miocene-Pliocene age (Afyonkarahisar-Turkey). *Organic Geochemistry*, 2016, vol. 94, pp. 52–67.
15. Kashirtsev V.A., Kontorovich A.E., Moskvina V.I. Biomarkery v organicheskom veshchestve paleogenovykh otlozheniy yuga Zapadnoy Sibiri (Omskoe Priirtyshye) [Biomarkers in the organic matter of the Paleogene deposits of the south of Western Siberia (Omsk Irtysh)]. *Neftekhimiya*, 2008, vol. 48, pp. 269–276.
16. Kashirtsev V.A., Moskvina V.I., Fomin A.N., Chalaya O.N. Terpanic and steranic hydrocarbons in coals of various genetic types of Siberia. *Russian Geology and Geophysics*, 2010, vol. 51, no. 4, pp. 516–524. In Rus.
17. Kashirtsev V.A., Gayduk V.V., Chalaya O.N., Zueva I.N. Geochemistry of biomarkers and catagenesis of organic matter of the Cretaceous and Cenozoic deposits of the Indigiro-Zyryansk trough. *Russian Geology and Geophysics*, 2012, vol. 53, no. 8, pp. 1027–1039. In Rus.
18. Mitrović D., Doković N., Životić D., Bechtel A., Cvetković O., Stojanović K. Characterisation of lignite lithotypes from the «Kovin» deposit (Serbia) – implications from petrographic, biomarker and isotopic analysis. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 2017, vol. 82, no. 6, pp. 739–754.
19. *Sovremennye metody analiza v organicheskoy geokhimii* [Modern methods of analysis in organic geochemistry]. Ed. by A.E. Kontorovich. Novosibirsk, Siberian research institute of geology, geophysics and minerals Publ., 1973. 100 p.
20. Matthews D.E., Hayes J.M. Isotope-ratio-monitoring gas chromatography-mass spectrometry. *Analytical Chemistry*, 1978, vol. 50, no. 11, pp. 1465–1473.
21. Werner R.A., Brand W.A. Referencing strategies and techniques in stable isotope ratio analysis. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2001, vol. 15, no.7, pp. 501–519.
22. Chalaya O.N., Kashirtsev V.A. *Osnovy khromatografii* [The basics of chromatography]. Yakutsk, Yakutsk State University Publ., 1997. 156 p.
23. Krapiventseva V.V., Timoshina I.D., Fomin A.N., Melenevskiy V.N. Organic geochemistry of the coal-bearing strata of the Ushumunskoe field (Khabarovsk territory). *The 28<sup>th</sup> International meeting on organic geochemistry*. Florence, Italy, 17–22 September 2017. Available at: <http://imog2017.org/wp-content/uploads/2017/04/130.pdf> (accessed 20 December 2019).
24. Timoshina I.D. Organicheskaya geokhimiya paleogenovykh i neogenovykh porod Ushumunskogo mestorozhdeniya Sredneamurskogo osadochnogo basseyna [Organic geochemistry of Paleogene and Neogene rocks of the Ushumunsky deposit of the Middle Amur sedimentary basin]. *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya. Novye idei v geologii nefiti i gaza* [New ideas in oil and gas geology]. Moscow, May 23–24, 2019. Moscow, Moscow State University Publ., 2019. pp. 474–475.
25. Tissot B., Velte D. *Obrazovanie i rasprostranenie nefiti* [Oil formation and distribution]. Moscow, Mir Publ., 1981. 502 p.
26. Kontorovich A.E., Timoshina I.D., Fomin A.N., Melenevskiy V.N. Organic geochemistry of the Devonian bituminous shales and liptobiolithe coals of the Kuznetsk basin. *The 28<sup>th</sup> International meeting on organic geochemistry*. Florence, Italy, 17–22 September 2017. Available at: <http://imog2017.org/wp-content/uploads/2017/04/157.pdf> (accessed 20 December 2019).
27. Affoury H., Sahaoui. The sedimentary organic matter from a Lake Ichkeul core (far northern Tunisia): Rock-Eval and biomarker approach. *Journal of African Earth Sciences*, 2017, vol. 129, pp. 248–259.
28. 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.
29. Noble R.A., Alexander R., Kagi R.I., Knox J. Tetracyclic diterpenoid hydrocarbons in some Australian coals, sediments and crude oils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1985, vol.49, pp. 2141–2147.
30. Chakhmakhchev V.A., Kartsev A.A., Prasolov E.M. Geochemical indicators of the biogenic nature of naphthides. *Oil and Gas Geology*, 2005, no. 1, pp. 47–52. In Rus.
31. Kashirtsev V.A., Parfenova T.M., Golovko A.K., Nikitenko B.L., Zueva I.N., Chalaya O.N. Phenanthrene biomarkers in the organic matter of Precambrian and Phanerozoic deposits and in oils of the Siberian platform. *Russian Geology and Geophysics*, 2018, vol. 59, no. 10, pp. 1720–1729. In Rus.

Received: 20 September 2019.

#### Information about the authors

**Irina D. Timoshina**, Cand. Sc., senior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS.  
**Alexander N. Fomin**, Dr. Sc., chief researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS;  
 Head of Oil and Gas Field Geology Section, Novosibirsk State University.

УДК 661.717.5

## ГИДРОЛИЗ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ РАСТВОРОВ НИТРАТА КАРБАМИДА

Островский Дмитрий Юрьевич<sup>1</sup>,  
dyostrovsky@sibmail.com

Заборцев Григорий Михайлович<sup>1</sup>,  
zabortsev56@list.com

Островский Юрий Владимирович<sup>2</sup>,  
ostrovsky@sibmail.com

<sup>1</sup> ООО НПЦ «ЭЙДОС»,  
Россия, 630075, г. Новосибирск, ул. Богдана Хмельницкого, 2.

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет,  
Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20.

**Актуальность** исследования обоснована целесообразностью утилизации нитрата карбамида, образующегося в разработанном ранее процессе карбамидной денитрации рафинатов азотнокислого аффинажа урана для предприятий фабрикаций ядерного топлива. В данной работе рассматриваются результаты исследования процесса гидролиза нитрата карбамида в нитрат аммония, используемого в гидрometаллургии урана.

**Объекты:** модельные растворы нитрата карбамида с концентрацией 100–500 г/л с добавлением различных реагентов: азотной кислоты, нитрата аммония.

**Методы:** ИК-спектроскопия, pH-метрия, спектрофотометрия, газовая хроматография.

**Результаты.** Изучен процесс гидролиза нитрата карбамида при атмосферном давлении, температурах 70–105 °С, концентрациях исходного раствора 100–500 г/л и с добавлением различных реагентов – азотной кислоты и нитрата аммония. Установлено, что повышение температуры способствует интенсификации процесса гидролиза; добавка азотной кислоты при концентрации 100 г/л замедляет процесс, а добавка нитрата аммония практически не влияет на процесс гидролиза нитрата карбамида. ИК-спектроскопические исследования позволяют сделать вывод о том, что нагревание растворов с исходными концентрациями 100 и 200 г/л при 90 °С в течение 20 часов с отведением выделяющихся газов приводит к полному гидролизу нитрата карбамида. Степень гидролиза нитрата карбамида и степень его конверсии в нитрат аммония совпадают при pH ≤ 7. ИК-спектры, совокупно с данными химического анализа, подтверждают наличие в продуктах гидролиза нитрата карбамида гидрокарбоната и нитрата аммония. Промежуточных продуктов гидролиза не обнаружено.

### Ключевые слова:

Нитрат карбамида, гидролиз, энергии активации, ИК-спектры, азотная кислота, гидрокарбонат аммония, нитрат аммония.

### Введение

В процессе экстракционного азотнокислого аффинажа урана образуются рафинаты, в которых содержание азотной кислоты может достигать 240 г/л [1]. Перед сбросом в хвостохранилище рафинаты нейтрализуют суспензией гидроксида кальция. Нитрат кальция является хорошо растворимым соединением и, поступая в хвостохранилище, способствует миграции нитрат-ионов в глинистых структурах [2], негативно влияя на состояние гидрографической сети вокруг предприятия.

Одним из методов снижения концентрации азотной кислоты, содержащейся в рафинате, является карбамидная денитрация, при которой азотная кислота взаимодействует с карбамидом и образует мало-растворимое соединение – нитрат карбамида [3], по уравнению (1):



При реализации данного процесса происходит накопление осадка нитрата карбамида, который можно использовать, например, в технологии аффинажа урана или утилизировать с целью получения нитрата аммония, используемого в гидрometаллургии урана.

В работах НПЦ «ЭЙДОС» [3, 4] представлена малоотходная схема экстракционного аффинажа кон-

центратов урана, включающая использование осадка нитрата карбамида как «донора» азотной кислоты, что позволяет сократить на 50–70 % расход азотной кислоты за счет ее рецикла в экстракционном процессе и, как следствие, снизить сброс нитрат-ионов со сточными водами.

В работах [5, 6] нитрат карбамида использован в качестве высаливателя при переработке высокообогащённого урана на Сибирском химическом комбинате (г. Северск, Томской обл.).

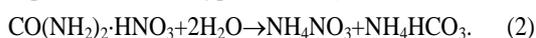
Альтернативным способом обращения с нитратом карбамида является его термическая деструкция. Однако термическая деструкция характеризуется образованием не только газообразных продуктов (оксиды азота), но и высокомолекулярных соединений (биурет  $t=150-170$  °С, меламина при  $t>160$  °С и мелем при  $t>354$  °С) [7], что создаёт определённые трудности в реализации этого способа.

В работах [1, 3] для разложения нитрата карбамида предлагается использовать аппарат «кипящего» слоя с инертной зернистой насадкой из оксида алюминия при температуре 750–800 °С. Недостатками этого метода является высокая температура и низкая производительность процесса.

Разработан электрохимический метод обращения с нитратом карбамида. В работе [8] для разложения карбамида использовали бездиафрагменный проточный электролизер с нерастворимым анодом из благородного металла. Использование сложного электрохимического оборудования и сравнительно низкая производительность процесса являются основными его недостатками.

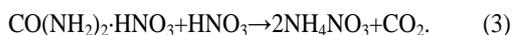
В работе [9] для разложения карбамида предложено использовать муравьиную кислоту и катализатор Pt/SiO<sub>2</sub>. При этом в отходящих газах были обнаружены: CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> и N<sub>2</sub>O. Недостатком метода является использование дорогостоящих реагентов.

Авторами работы [10] был предложен способ гидролиза раствора нитрата карбамида в автоклаве при повышенном давлении и температуре. В основу положена реакция [11] по уравнению (2):



Образующийся раствор нитрата аммония может быть использован как десорбирующий агент в процессе сорбционного аффинажа урана – 0,9 М NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>+0,1 М HNO<sub>3</sub> [12, 13] на предприятиях подземного выщелачивания урана.

Поскольку бикарбонат аммония разлагается на H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> и NH<sub>3</sub>, то для полного связывания аммиака в раствор целесообразно добавлять эквимолярное количество азотной кислоты, отчего суммарная реакция по уравнению (3) приобретает следующий вид:



Данный способ позволяет конвертировать нитрат карбамида в нитрат аммония с высокой скоростью. К недостаткам способа можно отнести использование автоклавного оборудования, подконтрольного Ростехнадзору.

Гидролиз нитрата карбамида можно реализовать и при атмосферном давлении в обычном аппаратурном оформлении. В настоящей работе приведены результаты гидролиза концентрированных растворов нитрата карбамида со свободным отведением выделяющихся реакционных газов.

#### Методика экспериментов

Синтезировали нитрат карбамида по методике, изложенной в работе [1]. Для этого в концентрированную азотную кислоту (х.ч.) добавляли эквимолярное количество сухого карбамида (ч.д.а), перемешивали, выдерживали в течение 15–20 часов при температуре ~4°C. Образующийся осадок отфильтровали, промыли дистиллированной водой, сушили в эксикаторе в течение 15–20 часов.

В экспериментах по гидролизу нитрата карбамида в концентрированных растворах использовали колбы с пробками и газоотводными трубками. Сбор газообразных продуктов проводили в мерный цилиндр. Для поддержания температуры с точностью ± 0,5 °C использовали термостат модели U-2 (Польша).

Аналитический контроль производили по стандартным методикам. Анализ растворов на содержание ионов аммония проводили по методике [14], исполь-

зуя спектрометр DRIL-2010 фирмы «НАСН», анализ газообразных продуктов реакции на CO<sub>2</sub> выполняли на лабораторном хроматографе ЛХМ-8МД с детектором по теплопроводности.

ИК-спектры карбамида и нитрата карбамида, сухих остатков и водных растворов записывали в области 4000–400 см<sup>-1</sup> на Фурье-спектрометре DFS-85 (Bruker) в таблетках KBr, а ИК-спектры растворов в области 4000–800 см<sup>-1</sup> – в каплях растворов между стеклами из флюорита [15].

Степень гидролиза нитрата карбамида (α) рассчитывали по накоплению ионов аммония в растворе по уравнению (4):

$$\alpha = \frac{C_T}{C_0} * 100 \%, \quad (4)$$

где C<sub>T</sub> – текущая концентрация ионов аммония в растворе, г/л; C<sub>0</sub> – концентрации ионов аммония из расчета полного гидролиза карбамида, г/л.

#### Результаты и их обсуждения

Химический анализ синтезированного осадка нитрата карбамида подтвердил, что осадок не содержит примесей других веществ. ИК-спектры полученного нитрата карбамида совпадают с литературными данными [16] и подтверждают вывод о чистоте применяемого в экспериментах нитрата карбамида.

В водном растворе нитрат карбамида ведет себя как электролит, диссоциирующий на молекулу карбамида и ионы H<sup>+</sup> и NO<sub>3</sub><sup>-</sup> [17]. В этой связи процесс гидролиза нитрата карбамида можно рассматривать как гидролиз карбамида в растворе азотной кислоты.

Степень гидролиза нитрата карбамида – это функция температуры и исходной концентрации. В данной работе были исследованы показатели процесса гидролиза при атмосферном давлении в диапазоне температур и концентраций, представляющих практический интерес.

Известно, что гидролиз карбамида начинается при температуре t>65 °C [17], поэтому исследования проводили в диапазоне температур 70–105 °C. Концентрацию нитрата карбамида варьировали в диапазоне 100–500 г/л.

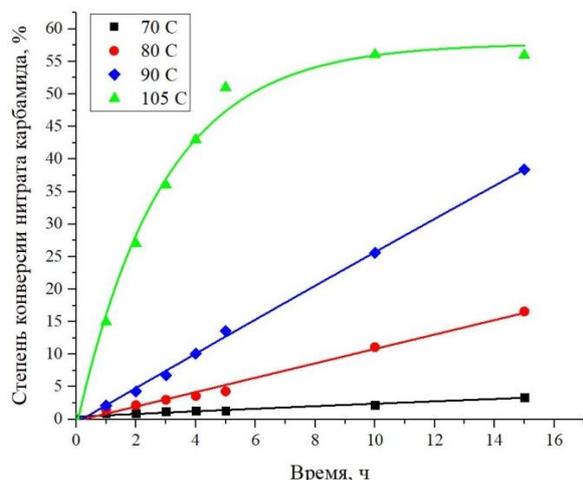
Концентрационный интервал выбран исходя из практической целесообразности последующего разбавления водой концентрированных растворов нитрата аммония до кондиций десорбирующего раствора, используемого на предприятиях подземного выщелачивания урана (АО «ДАЛУР», Курганская обл.) [18].

Установлено (рис. 1), что температура оказывает заметное влияние на процесс гидролиза нитрата карбамида: через 15 часов степень конверсии нитрата карбамида (α) в растворе с C<sub>0</sub>=200 г/л при t=70 °C – 3,4 %; при t=90 °C – 38,4 %; при t=105 °C – 56 % (рис. 1).

Повышение температуры способствует интенсификации процесса гидролиза нитрата карбамида. Из данных рис. 1 видно, что при температуре t=105 °C после 10 часов степень конверсии нитрата карбамида выходит на плато, несмотря на то, что процесс гидролиза протекает далее.

Известно, что нейтрализация нитрата карбамида аммиаком, выделяющимся в процессе его гидролиза, описывается S-образной кривой [10], при этом pH раствора меняется от сильнокислотного до слабоосновного.

На первом этапе (при pH < 7) синтезируется нитрат аммония, а при инверсии pH в щелочную область образуется бикарбонат аммония (уравнение 2).



**Рис. 1.** Влияние температуры на степень конверсии нитрата карбамида ( $C_0=200$  г/л). 1) 70; 2) 80; 3) 90; 4) 105 °C

**Fig. 1.** Effect of temperature on urea nitrate conversion degree ( $C_0=200$  g/l). 1) 70; 2) 80; 3) 90; 4) 105 °C

Высокая температура гидролиза и слабощелочная среда способствуют разложению термически нестойкого соединения аммиака, при этом образующиеся  $\text{NH}_3$  и  $\text{CO}_2$  эвакуируются из реакционной среды.

Степень гидролиза нитрата карбамида и степень его конверсии в нитрат аммония совпадают при pH ≤ 7.

Процесс гидролиза нитрата карбамида в диапазоне  $C_0=100\text{--}500$  г/л существенно зависит от исходной концентрации нитрата карбамида: через 20 часов (при  $t=90$  °C) степень конверсии нитрата карбамида при  $C_0=100$  г/л составляет 51,16 %, а при  $C_0=500$  г/л – 23,87 % (рис. 2).

Рассчитать энергию активации ( $E_a$ ) процесса гидролиза нитрата карбамида можно, используя метод трансформации кинетических кривых, по общеизвестному уравнению (5)

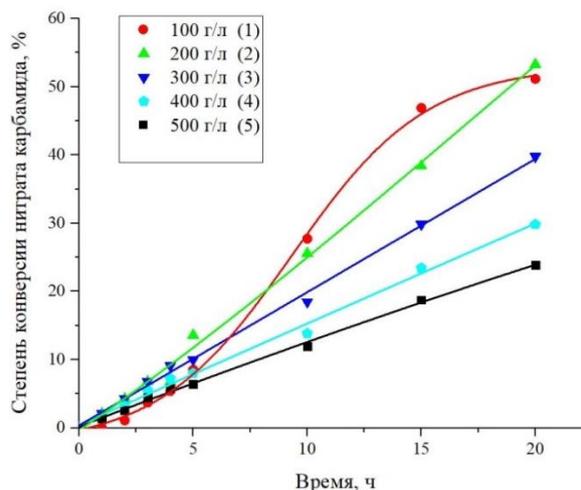
$$E_a = R \cdot [T_1 \cdot T_2 / (T_2 - T_1)] \cdot \ln(\tau_1 / \tau_2), \quad (5)$$

где  $T_1$  и  $T_2$  – температуры гидролиза, К;  $\tau_1$  и  $\tau_2$  – время гидролиза, час;  $R$  – универсальная газовая постоянная ( $R=8,314$  Дж/(моль·К)).

Принимая по данным рис. 3, что при  $t_1=80$  °C,  $t_2=90$  °C и степени гидролиза 10 % отношение  $t_1/t_2=2,3$  и подставляя эти значения в уравнение (5), получаем энергию активации гидролиза нитрата карбамида  $E_a=88,7$  кДж/моль.

В работах по гидролизу карбамида во влажной почве [19, 20] приводятся значения энергии активации  $E_a$  в диапазоне 44,0–96,2 кДж/моль. При температурах  $t=15\text{--}35$  °C средняя энергия активации  $E_a$  гид-

ролиза карбамида в работах [21, 22] составила 34,5 кДж/моль. Расхождения в значениях энергии активации авторы объясняют различными методиками анализа содержания карбамида в почве [21, 23, 24].



**Рис. 2.** Влияние концентрации нитрата карбамида на степень конверсии при  $t=90$  °C. 1) 100; 2) 200; 3) 300; 4) 400; 5) 500 г/л

**Fig. 2.** Effect of carbamide nitrate concentration on the conversion degree at  $t=90$  °C. 1) 100; 2) 200; 3) 300; 4) 400; 5) 500 g/l

В работе [10] при гидролизе нитрата карбамида в автоклаве при повышенном давлении в диапазоне температур 120–130 °C и концентрации нитрата карбамида 200 г/л нами было установлено, что энергия активации составляет  $E_a=28,9$  кДж/моль. Это значение примерно в три раза ниже, чем полученное в настоящем исследовании.

Вероятно, различие энергии активации гидролиза  $E_a$  обусловлено тем, что гидролиз нитрата карбамида при температурах 120–130 °C и повышенном давлении в работе [10] проводили в реакторе из стали 12X18H10T, а при температурах до 105 °C – в стеклянном реакторе. Низкое значение энергии активации гидролиза карбамида может быть связано с каталитическим действием компонентов конструкционного материала реактора.

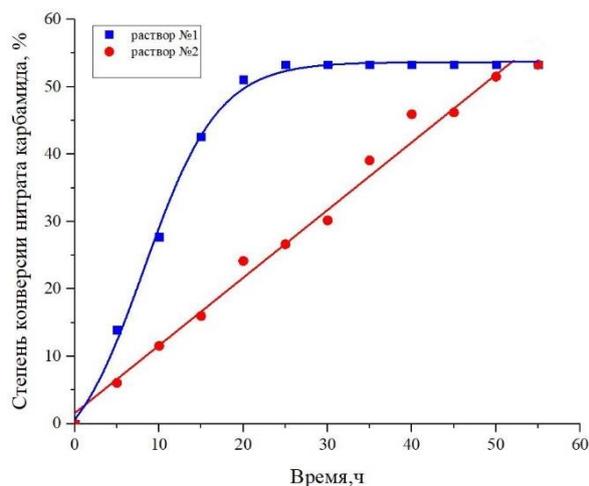
Согласно данным работы [25], присутствие азотной кислоты ускоряет процесс гидролиза карбамида за счет связывания выделяющегося аммиака.

На рис. 3 представлены результаты сравнения гидролиза нитрата карбамида (1) и его смеси с азотной кислотой (2) при температуре  $t=90$  °C.

Добавка азотной кислоты при концентрации 100 г/л существенно замедляет процесс гидролиза нитрата карбамида, что, вероятно, связано со снижением его степени диссоциации. Изменение степени конверсии во времени, описываемое в этих условиях прямой линией, свидетельствует о протекании реакции нулевого порядка по нитрату карбамида.

Было исследовано влияние образующегося нитрата аммония (как продукта реакции) на процесс гидролиза  $(\text{NH}_2)_2\text{CO} \cdot \text{HNO}_3$ . В экспериментах использован рас-

твор нитрата карбамида  $C_0=200$  г/л при  $t=90$  °С, содержащий нитрат аммония в количестве 8, 16, 24 и 31 г/л.



**Рис. 3.** Влияния азотной кислоты на степень гидролиза нитрата карбамида: 1 – раствор нитрата карбамида 200 г/л, 2 – раствор нитрата карбамида 200 г/л и азотной кислоты 100 г/л

**Fig. 3.** Effects of nitric acid on carbamide nitrate hydrolysis degree: 1 – carbamide nitrate solution 200 g/l, 2 – mixture of carbamide nitrate solution 200 g/l and nitric acid 100 g/l

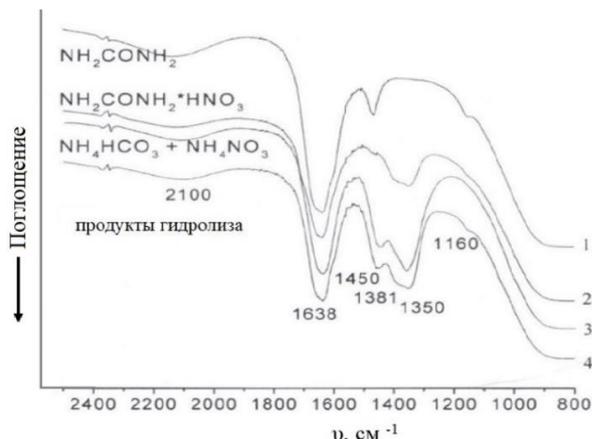
Следует отметить, что добавка нитрата аммония в исследуемом интервале концентраций практически не влияет на показатели гидролиза нитрата карбамида.

В процессе гидролиза нитрата карбамида из реакционной системы эвакуируются газообразные продукты реакции –  $\text{CO}_2$  и  $\text{NH}_3$ . Для исключения непроизводительных потерь аммиака и повышения выхода нитрата аммония необходимо на газоотводной линии реактора устанавливать абсорбционную колонну, орошаемую раствором азотной кислоты.

#### ИК-спектроскопические исследования

Нами был проведен гидролиз растворов нитрата карбамида с исходными концентрациями 100 и 200 г/л при  $t=90$  °С в течении 20 часов с отведением отходящих газов. После этого, в целях уточнения качественного состава полученных растворов, были записаны ИК-спектры в области  $4000\text{--}800$   $\text{cm}^{-1}$ . Кроме того, в тех же условиях были получены ИК-спектры растворов карбамида (200 г/л), нитрата карбамида (200 г/л) и смешанного раствора нитрата аммония и гидрокарбоната аммония с концентрациями каждого компонента 200 г/л. Полученные спектры представлены на рис. 4. Наиболее информативной является область  $2000\text{--}1100$   $\text{cm}^{-1}$ .

Во всех спектрах наблюдается широкая полоса средней интенсивности с максимумом поглощения  $2100\text{--}2130$   $\text{cm}^{-1}$ , соответствующая деформационным колебаниям молекулы воды, а также интенсивная широкая полоса поглощения с несколькими плечами и максимумом при  $1640$   $\text{cm}^{-1}$ , которая отвечает за валентные колебания  $\text{C}=\text{O}$  и деформационные  $\text{NH}_2$ -группы.



**Рис. 4.** ИК-спектры растворов карбамида (1), нитрата карбамида (2), нитрата аммония и бикарбоната аммония (3) и продуктов гидролиза нитрата карбамида с начальной концентрацией 200 г/л (4)

**Fig. 4.** IR spectra of solutions of carbamide (1), carbamide nitrate (2), ammonium nitrate and ammonium bicarbonate (3) and products of carbamide nitrate hydrolysis from an initial concentration of 200 g/l (4)

В спектре чистого карбамида еще две полосы поглощения: полоса средней интенсивности при  $1466$   $\text{cm}^{-1}$  ( $\nu(\text{CN})$ ), что полностью согласуется с литературными данными, и слабая полоса при  $1156$   $\text{cm}^{-1}$ , что соответствует вращению  $\text{NH}_2$ -групп. Такая же слабая полоса поглощения есть и в спектрах продукта гидролиза нитрата карбамида.

Спектр раствора нитрата карбамида сходен со спектром раствора карбамида. В интервале  $1500\text{--}1300$   $\text{cm}^{-1}$  наблюдается очень широкая полоса поглощения с несколькими плечами. Это накладывающиеся друг на друга валентные колебания  $\text{CN}^-$  и  $\text{NO}_3^-$ -групп, а также деформационные колебания протонированных  $\text{NH}_3^+$ -групп. Такая же полоса наблюдается и в спектрах продукта гидролиза.

В спектре модельного раствора смеси нитрата аммония и бикарбоната аммония, помимо вышеназванных полос  $\nu(\text{N-H})$ ,  $\nu(\text{O-H})$ ,  $\nu(\text{C=O})$ ,  $\delta(\text{NH}_2 \text{ и } \text{H}_2\text{O})$ , наблюдается полоса средней интенсивности при  $1445$   $\text{cm}^{-1}$ , соответствующая валентным колебаниям одинарной связи  $\text{C-O}$  карбонат-иона (согласуется с литературными данными), и сильная полоса поглощения при  $1360$   $\text{cm}^{-1}$ , отвечающая за  $\nu(\text{NO}_3^-)$ .

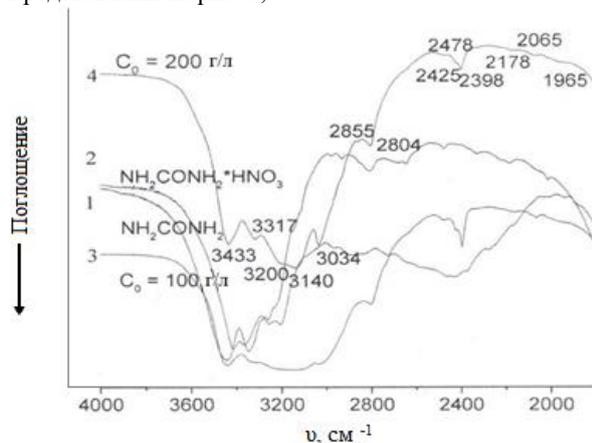
В спектре продуктов гидролиза нитрата карбамида есть средняя полоса при  $1450$   $\text{cm}^{-1}$ . Некоторое смещение максимума поглощения и расширение полосы по сравнению со спектром модельного раствора говорит о наложении в этом месте характеристичных полос валентных колебаний  $\text{C-O}$  карбонат иона и  $\nu(\text{CN})$ .

Проведенное спектроскопическое исследование позволяет сделать вывод о том, что гидролиз нитрата карбамида при концентрациях 100, 200 г/л и  $90$  °С протекает полностью без образования полупродуктов.

Были сняты ИК-спектры сухих остатков, полученных упариванием растворов после гидролиза. Мы провели гидролиз растворов нитрата карбамида с исходными концентрациями 100 и 200 г/л в течение 20 часов с отведением отходящих газов. Затем ото-

брали по 5 мл полученных растворов и упарили сначала на плите ( $t=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), а затем на воздухе. После этого записали ИК-спектры в области  $4000\text{--}400\text{ см}^{-1}$  на Фурье-спектрометре DFS-85 (Bruker) в таблетках KBr.

Полученные спектры сравнили со спектрами карбамида и нитрата карбамида. Результаты сравнения представлены на рис. 5, 6.



**Рис. 5.** ИК-спектры карбамида (1), нитрата карбамида (2) и сухих остатков после гидролиза нитрата карбамида с исходными концентрациями 100 (3) и 200 г/л (4) в области поглощения  $4000\text{--}1800\text{ см}^{-1}$

**Fig. 5.** IR spectra of carbamide (1), carbamide nitrate (2) and dry residues after hydrolysis of carbamide nitrate with initial concentrations of 100 (3) and 200 g/l (4) in the absorption region of  $4000\text{--}1800\text{ cm}^{-1}$

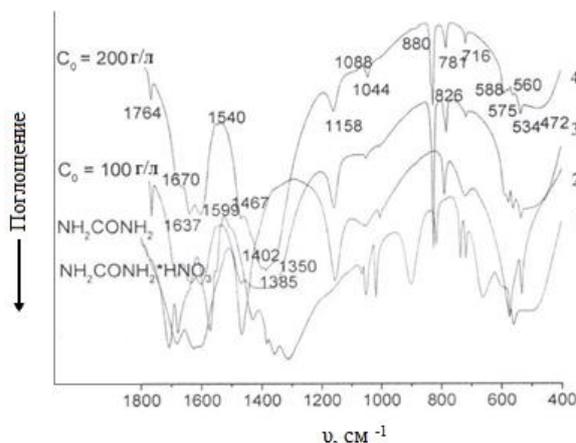
Спектры сухих остатков растворов после гидролиза нитрата карбамида с исходными концентрациями 100 и 200 г/л идентичны друг другу и представляют собой суперпозицию ИК-спектров нитрата и гидрокарбоната аммония. Нитрат карбамида в сухих остатках не присутствует, что подтверждается тем, что pH растворов после гидролиза нейтрален.

#### Заключение

Процесс гидролиза концентрированных растворов нитрата карбамида  $100\text{--}500\text{ г/л}$  при атмосферном давлении и температурах  $70\text{--}105\text{ }^{\circ}\text{C}$  завершается в течение 20 часов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карбамидная денитрация азотнокислых экстракционных рафинатов / Ю.В. Островский, Г.М. Заборцев, А.А. Шпак, С.П. Якобчук, А.Б. Александров, А.Л. Хлытин, А.А. Гусев // Радиохимия. – 2004. – Т. 46. – № 3. – С. 232–235.
2. СанПин 2.1.4.1175–02. Гигиенические требования к качеству воды нецентрализованного водоснабжения. Санитарная охрана источников. – М.: Минздрав, 2002. – 14 с.
3. Способ извлечения азотной кислоты из раствора и обезвреживания осадка нитрата карбамида. пат. 2253161 Российская Федерация, МПК7 C02F1/58; G21F9/04. № 2003113489/06; заявл. 07.05.03; опубл. 27.05.05., Бюл. № 15. – 6 с.
4. Экстракционный аффинаж концентратов урана с использованием нитрата мочевины / Ю.В. Островский, Г.М. Заборцев, И.Г. Чапаев, А.Б. Александров, С.Ю. Сайфутдинов, А.Л. Хлытин // Радиохимия. – 2009. – Т. 51. – № 1. – С. 30–32.
5. Короткевич В.М., Дорда Ф.А., Загуменнов В.С. Экстракционная переработка урансодержащих растворов // Тезисы докла-



**Рис. 6.** ИК-спектры карбамида (1), нитрата карбамида (2) и сухих остатков после гидролиза нитрата карбамида с исходными концентрациями 100 (3) и 200 г/л (4) в области поглощения  $1800\text{--}400\text{ см}^{-1}$

**Fig. 6.** IR spectra of carbamide (1), carbamide nitrate (2) and dry residues after hydrolysis of carbamide nitrate with initial concentrations of 100 (3) and 200 g/l (4) in the absorption region of  $1800\text{--}400\text{ cm}^{-1}$

Степень гидролиза и степень конверсии нитрата карбамида в нитрат аммония численно совпадают для кислых и нейтральных значений pH раствора. При  $\text{pH} \leq 7$  газообразные  $\text{NH}_3$  и  $\text{CO}_2$ , образующиеся при разложении гидрокарбоната аммония, эвакуируются из нагретого гидролизата. Присутствие в исходном растворе нитрата аммония до  $31\text{ г/л}$  не ухудшает показателей гидролиза нитрата карбамида.

Для исключения непроизводительных потерь аммиака целесообразно его улавливать раствором азотной кислоты и объединять с гидролизатом для приготовления кондиционного десорбирующего раствора в технологии урана.

Анализ ИК спектров совокупно с данными химического анализа показал, что в растворе после гидролиза находится нитрат и гидрокарбонат аммония. Других промежуточных продуктов термической деструкции или поликонденсации карбамида в гидролизате не обнаружено.

Полученные результаты говорят о возможности проведения количественного гидролиза нитрата карбамида в нитрат аммония при атмосферном давлении и реализации его в промышленных условиях по месту использования нитрата аммония.

6. Дов Второй Российской конференции по радиохимии. – Д. митровград, 22–26 сентября 1997. – С. 212–213.
7. Способ экстракционной переработки урансодержащих растворов: пат. 2114469 Российская Федерация, МПК7 G21F9/06; G21C19/46. № 97100868/25; заявл. 22.01.97; опубл. 27.06.98, Бюл. № 18. – 7 с.
8. Балахонов В.Г. Влияние содержания карбамида в азотнокислых растворах урана на аммиачное осаждение полиуратов аммония // Радиохимия. – 2004. – Т. 46. – № 5. – С. 440–443.
9. Электрохимическая регенерация диализирующего раствора в аппаратах «искусственная почка» / Ю.Б. Васильев, В.Л. Эвентов, В.А., Громько В.Б. Гайдадымов // Итоги науки и техники ВИНТИ. Серия Электрохимия. – 1990. – Т. 31. – С. 55–99.
10. Ananiev A.V., Broudic J.C., Brossard Ph. The urea decomposition in the process of the heterogeneous catalytic denitration of nitric acid solutions. P. 1. Kinetics of the reaction // Applied Catalysis B: Environmental. – 2003. – V. 45. – № 3. – P. 189–196.

10. Гидролиз продуктов карбамидной денитрации азотокислых рафинатов экстракционного аффинажа урана / Ю.В. Островский, Г.М. Заборцев, И.И. Жерин, Д.Ю. Островский, Н.Б. Егоров // Альтернативная энергетика и экология. – 2017. – № 13–15. – С. 225–227.
11. Narayanan Kutty T.R., Vasudeva Murthy A.R. Physico-chemical properties of urea nitrate: P. III. Hydrogen bonding and proton mobility // Indian Journal of Chemistry. – 1973. – V. 11. – № 3. – P. 253–256.
12. Емельянов В.С. Металлургия ядерного горючего. – М.: Изд-во «Атомиздат», 1968. – 482 с.
13. Зеликман А.Н. Металлургия редких металлов. – М.: Изд-во «Металлургия», 1991. – 432 с.
14. Лурье Ю.Ю. Аналитическая химия промышленных сточных вод. – М.: Химия, 1984. – 448 с.
15. Юинг Г.В. Инструментальные методы химического анализа. – М.: Мир, 1989. – 608 с.
16. Narayanan Kutty T.R., Vasudeva Murthy A.R. Physico-chemical properties of urea nitrate: P. I. Preparation and characterization // Indian Journal of Chemistry. – 1972. – V. 10. – № 8. – P. 305–308.
17. Method for converting urea to ammonia: Patent 5827490A USA. Fil. 02.07.1996; Publ. 10.27.1998.
18. Санников В.Н., Луценко Н.И. АО «Далур» – первое российское предприятие по добыче урана методом скважинного подземного выщелачивания // Горный журнал. – 2017. – № 8. – С. 23–27.
19. Rachinskii V., Peltser A. Effect of temperature on rate of decomposition of urea in soil // Agrokhimiya. – 1967. – № 10. – P. 75–77.
20. Gould W., Cook F., Webster G. Factors affecting urea hydrolysis in several Alberta soils // Plant and Soil. – 1973. – V. 38. – P. 393–401.
21. Urease activity and urea hydrolysis rate under coupling effects of moisture content, temperature, and nitrogen application rate / T. Lei, Q.Q. Gu, X.H. Guo, J.J. Ma, Y. Zhang, X.H. Sun // International Journal of Agriculture and Biological Engineering. – 2018. – № 11 (2). – P. 132–138.
22. Sigurdarson J.J., Svane S., Karring H. The molecular processes of urea hydrolysis in relation to ammonia emissions from agriculture // Reviews in Environmental Science Bio/Technology. – 2018. – V. 17. – P. 241–258.
23. Exogenous application of urea and a urease inhibitor improves drought stress tolerance in maize / W. Gou, P.F. Zheng, L. Tian, M. Gao, L.X. Zhang, N.A. Akram // Journal of Plant Research. – 2017. – V. 130. – P. 599–609.
24. Sudkolai S.T., Nourbakhsh F. Urease activity as an index for assessing the maturity of cow manure and wheat residue vermicomposts // Waste Management. – 2017. – V. 64. – P. 63–66.
25. Некрасов В.В. Руководство к малому практикуму по органической химии. – М.: Химия, 1964. – 176 с.

Поступила 05.05.2020 г.

#### Информация об авторах

**Островский Д.Ю.**, инженер, ООО НПЦ «ЭЙДОС».

**Заборцев Г.М.**, кандидат химических наук, ООО НПЦ «ЭЙДОС».

**Островский Ю.В.**, доктор технических наук, профессор, Новосибирский государственный технический университет.

UDC 661.717.5

## HYDROLYSIS OF UREA NITRATE CONCENTRATED SOLUTIONS

Dmitry Yu. Ostrovsky<sup>1</sup>,  
dyostrovsky@sibmail.com

Grigory M. Zabortsev<sup>1</sup>,  
zaborcev56@list.com

Yury V. Ostrovsky<sup>2</sup>,  
ostrovsky@sibmail.com

<sup>1</sup> LLC «RPC "EIDOS"»,  
2, B. Khmelnitsky avenue, Novosibirsk, 630075, Russia.

<sup>2</sup> Novosibirsk State Technical University,  
20, Karl Marcs avenue, Novosibirsk, 630073, Russia.

**The relevance** of the research is the rationale for utilization of urea nitrate formed in the previously developed process of urea denitration of uranium nitrate refined raffines for nuclear fuel fabrication enterprises. In this paper, we consider the results of the quantitative hydrolysis of urea nitrate into ammonium nitrate used in the hydrometallurgy of uranium.

**Objects:** model solutions of carbamide nitrate with a concentration of 100–500 g/l with the addition of various reagents: nitric acid, ammonium nitrate.

**Methods:** IR spectroscopy, pH meter, spectrophotometry, gas chromatography.

**Results.** IR spectroscopy, pH metry, spectrophotography. The authors have studied urea nitrate hydrolysis at atmospheric pressure, at temperatures of 70–105 °C, concentrations of the initial solution of 100–500 g/l and with the addition of various reagents – nitric acid and ammonium nitrate. It was found that increasing temperature contributes to hydrolysis intensification; the addition of nitric acid at a concentration of 100 g/l slows down the process, and the addition of ammonium nitrate practically does not affect the hydrolysis of urea nitrate. IR spectroscopic studies suggest that heating solutions with initial concentrations of 100 and 200 g/l at 90 °C for 20 hours with the discharge of evolved gases leads to the complete hydrolysis of urea nitrate. The degree of hydrolysis of urea nitrate and the degree of its conversion to ammonium nitrate coincide at acidic and neutral pH values. A spectroscopic study together with chemical analysis data confirmed the presence of urea nitrate bicarbonate and ammonium nitrate in the hydrolysis products. No intermediate hydrolysis products were detected.

**Key words:**

Urea nitrate, hydrolysis, activation energy, IR spectra, nitric acid, ammonium bicarbonate, ammonium nitrate.

## REFERENCES

- Ostrovskiy Yu.V., Zabortsev G.M., Shpak A.A., Yakobchuk S.P., Aleksandrov A.B., Khlytin A.L., Gusev A.A. Carbamide denitration of nitric acid extraction raffinates. *Radiokhimiya*, 2004, vol. 46, no. 3, pp. 232–235. In Rus.
- SanPin 2.1.4.1175–02. *Gigienicheskie trebovaniya k kachestvu vody nentsentralizovannogo vodosnabzheniya. Sanitarnaya okhrana istochnikov* [Hygienic requirements for water quality of non-centralized water supply. Sanitary protection of sources]. Moscow, Minzdrav Publ., 2002. 14 p.
- Ostrovskiy Yu.V., Zabortsev G.M., Shpak A.A., Aleksandrov A.B., Sayfutdinov S.Yu., Drobyaz A.I., Khlytin A.L. *Sposob izvlecheniya azotnoy kisloty iz rastvora i obezvezhivaniya osadka nitrata karbamida* [The method of extraction of nitric acid from a solution and the neutralization of the precipitate of urea nitrate]. Patent RF no. 2003113489/06, 2005.
- Ostrovskiy Yu.V., Zabortsev G.M., Chapaev I.G., Aleksandrov A.B., Sayfutdinov S.Yu., Khlytin A.L. Extraction refining of uranium concentrates using urea nitrate. *Radiokhimiya*, 2009, vol. 51, no. 1, pp. 30–32. In Rus.
- Korotkevich V.M., Dorda F.A., Zagumennov V.S. Ekstraktsionnaya pererabotka uransoderzhashchikh rastvorov [Extraction processing of uranium-containing solutions]. *Tezisy dokladov Vtoroy Rossiyskoy konferentsii po radiokhimii* [Proc. of the second Russian conference on radiochemistry]. Dimitrograd, 22–26 September 1997. pp. 212–213.
- Khandorin G.P., Korotkevich V.M., Dorda F.A., Dedov N.V., Demenko A.A., Belov V.A., Goloshchapov R.G., Zagumennov V.S. *Sposob ekstraktsionnoy pererabotki uransoderzhashchikh rastvorov* [The method of extraction processing of uranium-containing solutions]. Patent RF no. 971100868/25, 1998.
- Balakhonov V.G. Effect of the content of urea in nitric acid solutions of uranium on the ammonia deposition of ammonium polyuranates. *Radiokhimiya*, 2004, vol. 46, no. 5, pp. 440–443. In Rus.
- Vasilyev Yu.B., Eventov V.L., Gromyko V.A., Gaidadymov V.B. Elektrokhimicheskaya regeneratsiya dializiruyushchego rastvora v apparatakh «iskusstvennaya pochka» [Electrochemical regeneration of the dialysis solution in artificial kidney devices]. *Itogi nauki i tekhniki. Elektrokhimiya*, 1990, vol. 31, pp. 55–99.
- Ananiev A. V., Broudic J.C., Brossard Ph. The urea decomposition in the process of the heterogeneous catalytic denitration of nitric acid solutions: part 1. Kinetics of the reaction. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2003, vol. 45, no. 3, pp. 189–196.
- Ostrovskiy Yu.V., Zabortsev G.M., Zherin I.I., Ostrovskiy D.Yu., Egorov N.B. Hydrolysis products of urea nitration of nitric acid raffinate of extraction uranium refining. *Alternativnaya energetika i ekologiya*, 2017, no. 13–15, pp. 225–227. In Rus.
- Narayanan Kutty T.R., Vasudeva Murthy A.R. Physico-chemical properties of urea nitrate: Part III. Hydrogen bonding and proton mobility. *Indian Journal of Chemistry*, 1973, vol. 11, no. 3, pp. 253–256.
- Yemelyanov V.S. *Metallurgiya yadernogo goryuchego* [Metallurgy of nuclear fuel]. Moscow, Atomizdat Publ., 1968. 482 p.
- Zelikman A.N. *Metallurgiya redkikh metallov* [Metallurgy of rare metals]. Moscow, Metallurgiya Publ, 1991. 432 p.
- Lurye Yu.Yu. *Analiticheskaya khimiya promyshlennykh stochnykh vod* [Analytical chemistry of industrial wastewater]. Moscow, Khimiya Publ., 1984. 448 p.
- Yuing G.V. *Instrumentalnye metody khimicheskogo analiza* [Industrial methods of chemical analysis]. Moscow, Mir Publ., 1989. 608 p.
- Narayanan Kutty T.R., Vasudeva Murthy A.R. Physico-chemical properties of urea nitrate. P. I. Preparation and characterization. *Indian Journal of Chemistry*, 1972, vol. 10, no. 8, pp. 305–308.

17. Jones D.G. *Method for converting urea to ammonia*. Patent 5827490A USA, 1998.
18. Sannikov V.N., Lutsenko N.I. JSC Dalur – the first Russian enterprise for the extraction of uranium by the method of borehole underground leaching. *Gorny zhurnal*, 2017, no. 8, pp. 23–27. In Rus.
19. Rachinskii V., Peltser A. Effect of temperature on rate of decomposition of urea in soil. *Agrokimiya*, 1967, no. 10, pp. 75–77.
20. Gould W., Cook F., Webster G. Factors affecting urea hydrolysis in several Alberta soils. *Plant and Soil*, 1973, vol. 38, pp. 393–401.
21. Lei T., Gu Q.Q., Guo X.H., Ma J.J., Zhang Y., Sun X.H. Urease activity and urea hydrolysis rate under coupling effects of moisture content, temperature, and nitrogen application rate. *International Journal of Agriculture and Bioical Engineering*, 2018, no. 11 (2), pp. 132–138.
22. Sigurdarson J.J., Svane S., Karring H. The molecular processes of urea hydrolysis in relation to ammonia emissions from agriculture. *Reviews in Environmental Science Bio/Technology*, 2018, vol. 17, pp. 241–258.
23. Gou W., Zheng P.F., Tian L., Gao M., Zhang L.X., Akram N.A. Exogenous application of urea and a urease inhibitor improves drought stress tolerance in maize. *Journal of Plant Research*, 2017, vol. 130, pp. 599–609.
24. Sudkolai S.T., Nourbakhsh F. Urease activity as an index for assessing the maturity of cow manure and wheat residue vermicomposts. *Waste Management*, 2017, vol. 64, pp. 63–66.
25. Nekrasov V.V. *Rukovodstvo k malomu praktikumu po organicheskoy khimii* [Guide to a small workshop on organic chemistry]. Moscow, Khimiya Publ., 1964. 176 p.

Received: 5 May 2020.

#### Information about the authors

**Dmitry Yu. Ostrovsky**, engineer, LLC «RPC "EIDOS"».

**Grigory M. Zabortsev**, Cand. Sc., LLC «RPC "EIDOS"».

**Yuriy V. Ostrovsky**, Dr. Sc., professor, Novosibirsk State Technical University.

УДК 556.5.072

## ВЛИЯНИЕ ПРОТИВОПАВОДКОВЫХ ДАМБ В ПОЙМЕ НА ФОРМУ ЗОНЫ ЗАТОПЛЕНИЯ, ПОЛЕ СКОРОСТЕЙ И ГЛУБИН ПОТОКА НА ПРИМЕРЕ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ УЧАСТКА РЕКИ КОНДОМА

Романовский Роман Владимирович,  
keny146@gmail.com

ООО «Сибирьгидротехпроект»,  
Россия, 635510, г. Томск, ул. Старо-Тракторная, 7.

**Актуальность** численного моделирования зон затопления, характеристик скоростного поля потока и отметок уровней воды рек исходит из потребностей практики инженерной разработки месторождений полезных ископаемых, которые зачастую располагаются в чрезвычайно сложных с гидрографической точки зрения условиях. В таких условиях стандартные методики расчетов указанных характеристик не позволяют достичь желаемого результата или не учитывают всего многообразия процессов, происходящих в открытых потоках, способных существенно повлиять на безопасный и безаварийный режим работы проектируемых сооружений.

**Цель:** на примере участка реки Кондома и расположенных в ее пойме существующих и проектируемых гидротехнических сооружений (противопаводковых дамб) и объектов строительства показать, каким образом данные объекты влияют на изменение формы расчетной зоны затопления, скоростного поля потока и уровней воды в условиях стесняющего воздействия на живое сечение потока при паводке редкой вероятности превышения (1 % обеспеченности).

**Методы.** Численное моделирование характеристик потока (расчетная зона затопления, распределение скоростей и направлений течения, расчетные уровни воды) на участке р. Кондома выполнялось при помощи моделирующей системы HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System) версии 5.0.5. Модель строилась для трех различных сценариев: когда пойма реки относительно не нарушена и в ней отсутствуют противопаводковые дамбы и отвал вскрышной породы (сценарий № 1), при наличии в пойме существующей в настоящее время одной противопаводковой дамбы и породного отвала (сценарий № 2), при наличии в пойме всех существующих в сценарии № 2 объектов и проектируемой противопаводковой дамбы (сценарий № 3). Было произведено сравнение исследуемых характеристик р. Кондома на рассматриваемом участке при реализации всех трех сценариев.

**Результаты.** Для участка р. Кондома настроена имитационная модель прохождения половодья с вероятностью превышения максимального уровня 1 % по трем сценариям, один из которых (сценарий № 1) принят в качестве контрольного. Произведена калибровка модели, подобраны адекватные реальным условиям коэффициенты шероховатости поймы и русла. Получены численные характеристики потока (форма расчетной зоны затопления, распределение скоростей и направлений течения, уровни воды и глубины) по трем рассматриваемым сценариям, и сделаны выводы о степени влияния существующих в настоящее время в левобережной пойме р. Кондома сооружений на форму свободной поверхности, а также произведен прогноз такого влияния в результате строительства новой противопаводковой дамбы на левой пойме реки.

### Ключевые слова:

Противопаводковые дамбы, численное моделирование, зоны затопления, двумерные гидравлические модели, имитационные модели, моделирующая система HEC-RAS.

### Введение

Издrevле поймы рек у всех народов планеты считались наиболее привлекательными с точки зрения размещения поселений. Близость к источнику воды, богатым и плодородным пойменным почвам во многом являлась и является по сей день определяющим фактором в экономическом и социальном развитии человеческих сообществ. Мало что изменилось и в настоящее время, разве что более усилилась человеческая экспансия по отношению к водным ресурсам, которые в настоящее время, как никогда ранее, стали приобретать свою истинную ценность.

С развитием промышленности и технологий ежегодно возникает все более сильная потребность в ресурсах, а именно в полезных ископаемых, которые, как известно, являются невозобновляемым ресурсом. В то же время новых, «удобных» для разработки месторождений, мест с каждым поколением становится все меньше. В этих условиях часто прибегают к добыче полезных ископаемых в труднодоступных местах. Что касается разработки угольных месторождений вблизи

водных объектов (малых, средних и больших рек), то основная сложность заключается не в физической возможности добыть сырье, а в способности организовать добычу и производство таким образом, чтобы оно учитывало интересы различных слоев общества, соответствовало требованиям к безопасности и в то же время имело наименьшее негативное воздействие на водный объект либо не имело его вовсе [1]. В данном контексте особое значение приобретает разработка различных мероприятий по инженерной защите территории от затопления в период половодий и паводков на реках, в частности, строительство ограждающих противопаводковых дамб [2].

Однако у любой технологии всегда имеется обратная сторона, и, применительно к рекам, это гидравлическое влияние строительства дамб на уровень и скоростной режим рек. В последние годы интерес к необходимости определения границ зон затопления рек в нашей стране увеличился в связи с Постановлением Правительства РФ от 18.04.2014 г. № 360 [3]. Довольно слабо освещенным при этом

остается вопрос по учету воздействий различных гидротехнических сооружений в поймах рек на водный поток и форму зоны затопления [4].

С развитием технологий, улучшением ситуации с доступностью вычислительных мощностей для рядовых исследователей, совершенствованием алгоритмов вычисления [5–7], приходом на помощь гидрологам различного рода геоинформационных систем и методов с ними связанных [8] данная задача все чаще решается методами имитационного моделирования речной гидравлики [9–11] при помощи моделирующих систем [12] и так называемого геоинформационного моделирования наводнений (ГИС-моделирование наводнений) [13, 14]. Ранее автором был выполнен обзор некоторых существующих подходов по моделированию зон затоплений [15].

В ряде зарубежных и отечественных работ, посвященных тематике влияния противопаводковых защитных дамб на гидравлические параметры речных потоков [16–20] во многом освещается данная проблематика.

Целью данной работы, в практическом смысле, является демонстрация влияния строительства инженерных гидротехнических сооружений (защитных противопаводковых дамб) на изменение характеристик водного потока, выполненная на примере реально существующих проектных решений в пойме р. Кондома в условиях прохождения паводка редкой вероятности превышения (в данной работе рассмотрена вероятность 1 %). Технически данная цель достигается методом численного 2D моделирования гидравлики открытых потоков на базе моделирующей системы HEC-RAS 5.0.5.

#### Исследуемая территория и постановка задачи

*Постановка задачи.* В 2018 г. силами ООО «СибирьГидроТехПроект» (г. Томск) в интересах ООО «Шахта Тайлепская» был произведен комплекс инженерно-изыскательских работ, а также небольшое исследование, с помощью которого необходимо было ответить на вопрос, как повлияет разработка месторождения с размещением объектов строительства и сооружений по инженерной защите территории от затопления, расположенных непосредственно в левой пойме р. Кондома, на изменение максимальных уровней воды и скоростного поля потока на данном участке.

Объект исследования расположен в Новокузнецком районе Кемеровской области, в 2 км восточнее п. Тайлеп. Рассматриваемый участок р. Кондома расположен между пос. Малиновка и г. Калтан.

Предприятие выступило инициатором проведения данной работы по причине того, что жители окрестных населенных пунктов были обеспокоены тем, как может повлиять предполагаемое строительство объектов в пойме и еще одной, в дополнение к уже имеющейся, защитной дамбы на левом берегу р. Кондома. Беспокойство населения подкреплялось тем фактом, что в 2004 г. на данном участке имело место катастрофическое наводнение в результате прохождения волны половодья, осложненной высокой дружностью этого половодья, дождевыми паводками и иными факторами. Тогда пострадало большое количество частных домовладений, были и человеческие жертвы.

Поэтому была поставлена задача смоделировать процесс прохождения максимального расхода воды низкой вероятности превышения при различных условиях (сценариях). Расчетная вероятность превышения максимального расхода воды весеннего половодья в связи с уровнем ответственности и классом гидротехнического сооружения была выбрана равной 1 % (один случай за 100 лет). В качестве модельных приняты три сценария: когда пойма реки относительно не нарушена и в ней отсутствуют противопаводковые дамбы и отвал вскрышной породы (сценарий № 1), при наличии в пойме существующей в настоящее время одной противопаводковой дамбы и породного отвала (сценарий № 2), при наличии в пойме всех существующих в сценарии № 2 объектов и проектируемой противопаводковой дамбы (сценарий № 3).

Далее, сценарий 1 будем называть контрольным, сценарий 2 – фактическим, а сценарий 3 – проектным сценарием.

#### Материалы и методы исследования

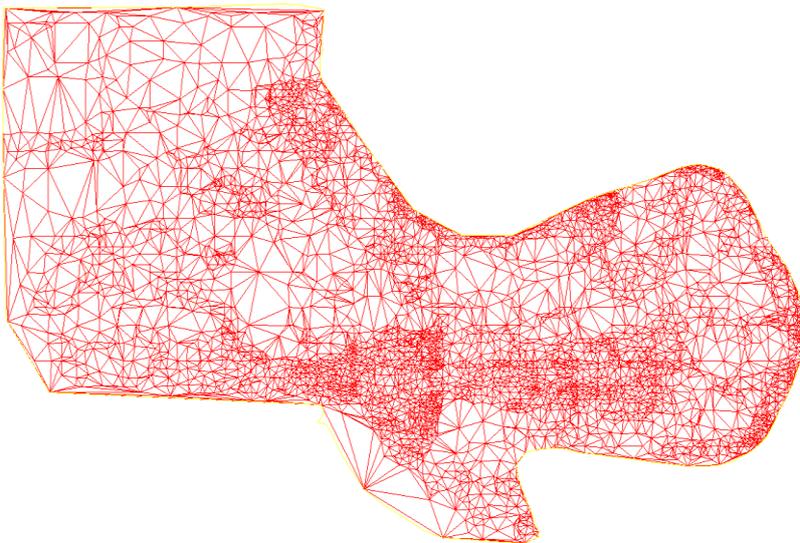
*Создание модели.* На первом этапе исходная топографическая съемка подверглась предварительной обработке и подготовке в системе автоматизированного проектирования (САПР) Autodesk Civil 3D с тем, чтобы удалить со съемки лишние данные и артефакты (различные ошибки в построении горизонталей и т. п.) и создать поверхность триангуляции для ее экспорта и дальнейшей обработки. На рис. 1 изображена подготовленная к экспорту поверхность.

На втором этапе подготовленная поверхность на основе нерегулярной сетки была экспортирована из САПР Civil 3D в формате geotiff для последующей обработки в ГИС-системе SAGA GIS.

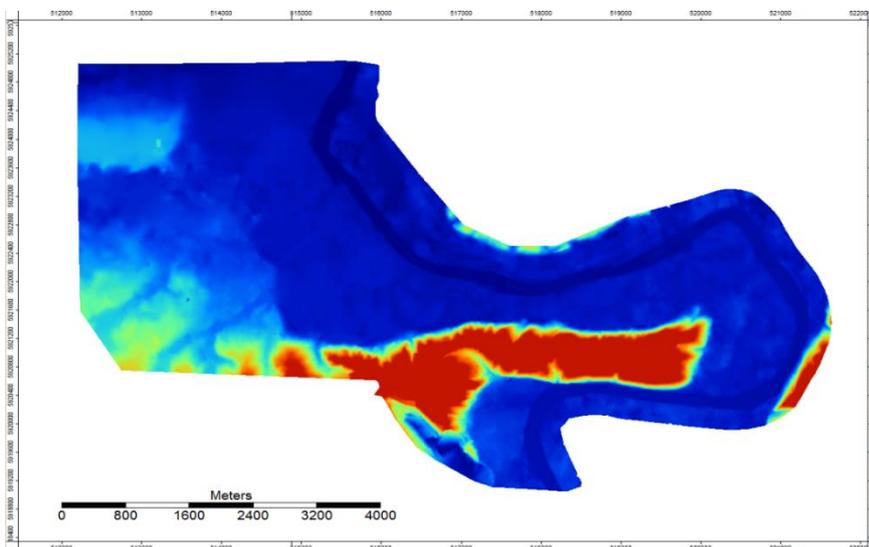
С помощью системы SAGA GIS поверхность подвергалась дополнительной постобработке с целью удаления лишних шумов и ячеек с отсутствующими данными (no data), а также осуществлялся ее перевод из исходной системы координат в систему WGS84 в проекции UTM (универсальная проекция Меркатора). Поверхность, обработанная в системе SAGA GIS, изображена на рис. 2.

На третьем этапе подготовленная цифровая модель рельефа (ЦМР) была импортирована в моделирующую систему HEC-RAS, где с помощью инструментария RAS-Mapper в нее были внесены результаты промеров по поперечникам в русле р. Кондома, а затем поверхность была пересчитана с учетом внедрения этих данных. Итоговая рабочая ЦМР без нанесения существующих и проектируемых объектов для сценария 1 изображена на рис. 3.

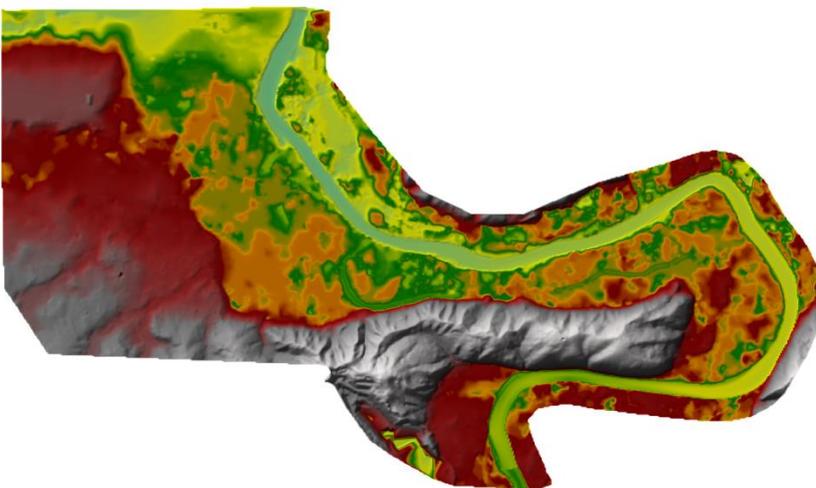
На четвертом этапе были разработаны и внедрены в готовую ЦМР необходимые объекты поверхности: существующий отвал с существующей защитной дамбой и проектируемая защитная дамба. Процесс разработки дополнительных поверхностей рассматриваемых объектов аналогичен описанным выше трем этапам. Измененные с учетом существующих в пойме и проектируемых объектов для сценариев 2 и 3, поверхности представлены на рис. 4, 5.



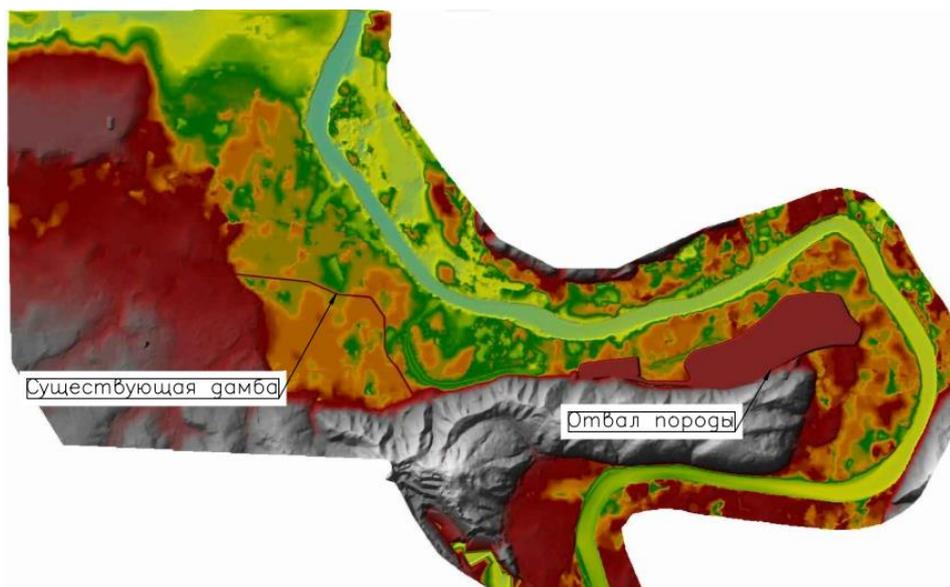
**Рис. 1.** Подготовленная в САПР Civil 3D поверхность триангуляции  
**Fig. 1.** Triangulation surface made in CAD Civil 3D



**Рис. 2.** Обработанная в SAGA GIS цифровая модель рельефа  
**Fig. 2.** Digital elevation model processed in SAGA GIS

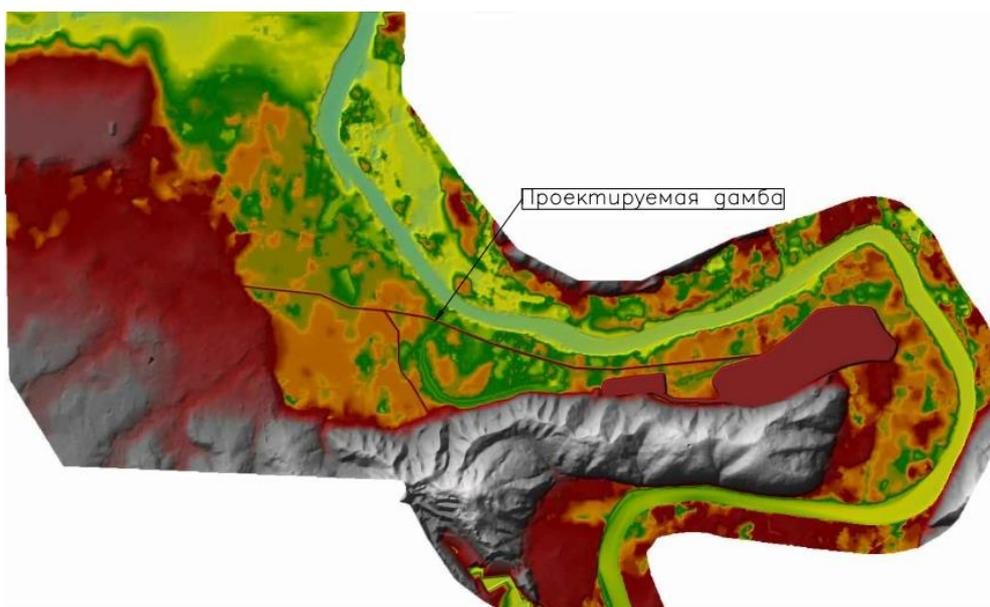


**Рис. 3.** Рабочая ЦМР в системе HEC-RAS без нанесения объектов в пойме для сценария 1  
**Fig. 3.** Operating DEM (digital elevation model) in the HEC-RAS system without the objects in the floodplain for Scenario 1



**Рис. 4.** Рабочая ЦМР с нанесением существующих объектов в пойме реки (защитная дамба и породный отвал) для сценария № 2 в системе HEC-RAS

**Fig. 4.** Operating DEM with already existing objects in the floodplain (a flood control dam and overburden dump) for Scenario 2 in the HEC-RAS system



**Рис. 5.** Рабочая ЦМР с нанесением существующих объектов в пойме реки (защитная дамба и породный отвал) и проектируемой защитной дамбы для сценария № 3 в системе HEC-RAS

**Fig. 5.** Operating DEM with already existing objects in the floodplain (a flood control dam and overburden dump) and designed flood control dam for Scenario 3 in the HEC-RAS system

#### Калибровка модели

Калибровка модели выполнялась путем принятия на начальном этапе стандартных для поймы и русла коэффициентов шероховатости [21, 22] и последующей их корректировки с целью добиться максимального соответствия выходных данных модели с данными инструментальных измерений.

*Калибровка на межженных условиях.* Для решения данной задачи 18.07.2018 г. было произведено нивелирование уреза свободной поверхности р. Кондома вдоль участка моделирования и получены отметки уровня на входном створе модели – 222,50 м БС (Бал-

тийская система высот), в замыкающем створе модели – 217,31 м БС. Измеренный расход воды на момент проведения работ составил 21,50 м<sup>3</sup>/с.

Измеренный расход воды при заданных начальных условиях пропускался через модель, а затем, путем множественных итераций с корректировкой коэффициентов шероховатости, временного шага, изменением размера расчетной ячейки и других параметров, достигалось наилучшее согласование смоделированных и измеренных уровней воды. Результаты калибровки модели приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Результаты калибровки модели в меженных условиях

**Table 1.** Results of model calibration in land survey conditions

Створ Cross-section	Калибровочный расход, м <sup>3</sup> /с Calibration flow rate, m <sup>3</sup> /s	Измеренный уровень, м БС Measured level mark, m a.s.l. (above sea level)	Смоделированный уровень, м БС Simulated level mark, m a.s.l. (above sea level)	Ошибка расчета, м Error, m
Входной створ/Entrance	21,50	222,50	222,36	0,14
Замыкающий створ/Exit	21,50	217,31	217,15	0,16

Калибровка в условиях прохождения половодья. Для решения этой задачи были получены данные о максимальных наблюдаемых уровнях воды по гидропосту Кузедеево во время прохождения пика половодья в 2004 г. Отметка уровня воды составила 233,34 м БС. Расстояние по руслу реки до входного и замыкающего створа модели составило 11,3 и 25,4 км соответственно. Расчетная отметка максимального уровня воды 2004 г. была передана вниз по течению реки по среднему уклону водной поверхности (получен на основе нивелировки в период обследования в меженный период) на участке от гидропоста до участка моделирования, включая входной и замыкающий створы. В результате на входном створе модели переданная отметка уровня составила 229,93 м БС, а в замыкающем – 223,97 м БС. Калибровка осуществлялась

при двух допущениях: (1) калибровочный наблюдаемый расход, равный 3560 м<sup>3</sup>/с, введенный в модель, за неимением непосредственных наблюдений на входном створе, принят по данным гидропоста в п. Кузедеево с допущением, что приращение водосборной площади между гидропостом и участком моделирования не даст значимого увеличения данной цифры, (2) уклон свободной поверхности принят на основе его измерений в меженный период, так как работа производилась в летний период и другими данными автор не располагал. Результаты калибровки модели приведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Результаты калибровки модели в условиях прохождения половодья

**Table 2.** Results of model calibration in the conditions of flood

Створ/Cross-section	Калибровочный расход, м <sup>3</sup> /с Calibration flow rate, m <sup>3</sup> /s	Измеренный уровень, м БС Measured level mark, m a.s.l.	Смоделированный уровень, м БС Simulated level mark, m a.s.l.	Ошибка расчета, м Error, m
Входной створ/Entrance	3800	229,34	229,46	0,12
Замыкающий створ/Exit	3800	224,38	224,55	0,17

Смоделированная на калибровочный расход зона затопления и расчетное поле скоростей потока, в условии прохождения половодья 2004 г., приведены на рис. 6, 7.



**Рис. 6.** Смоделированная зона затопления р. Кондома в условиях половодья 2004 г.

**Fig. 6.** Simulated flood zone of the Kondoma River in flood conditions of 2004

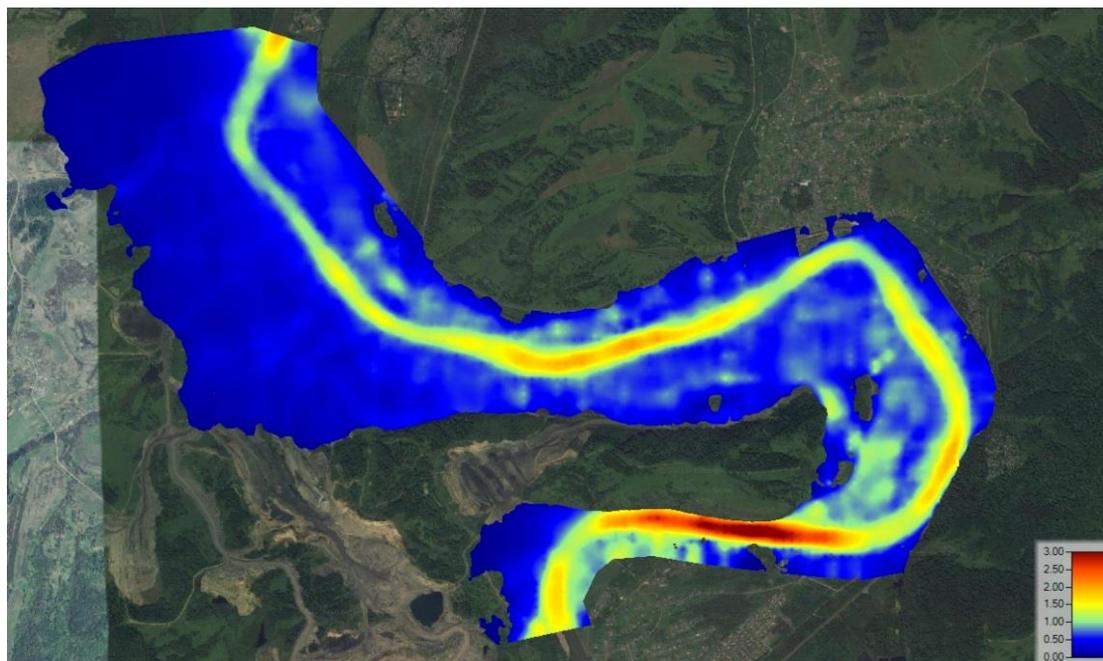


Рис. 7. Смоделированное поле скоростей потока р. Кондома в условиях половодья 2004 г.

Fig. 7. Simulated water velocity field in the Kondoma River in flood conditions of 2004

#### Настройка модели, граничные условия

Следующим, после калибровки, шагом является настройка и пуск модели на расчетный максимальный расход воды. В качестве граничных условий в верхнем (входном) створе участка моделирования был задан гидрограф стока, смоделированный с учетом повышающего коэффициента так, чтобы в пиковой точке достигалось расчетное значение 1 % обеспеченности расхода воды, который принят, по результатам гидрологических расчетов, равным  $4191 \text{ м}^3/\text{с}$ . За основу модельного гидрографа принят наблюдаемый

гидрограф стока р. Кондома по данным гидропоста в п. Куздеево за 2004 г. (когда наблюдался близкий к 3 % обеспеченности расход воды).

Ординаты наблюдаемого гидрографа были умножены на повышающий коэффициент, который равен отношению расчетного расхода 1 % обеспеченности к максимальному расходу, наблюдаемому в 2004 г. и равному  $3560 \text{ м}^3/\text{с}$ . Повышающий коэффициент модели гидрографа составляет 1,18. Смоделированный гидрограф половодья, заданный в качестве граничного условия, приведен на рис. 8.

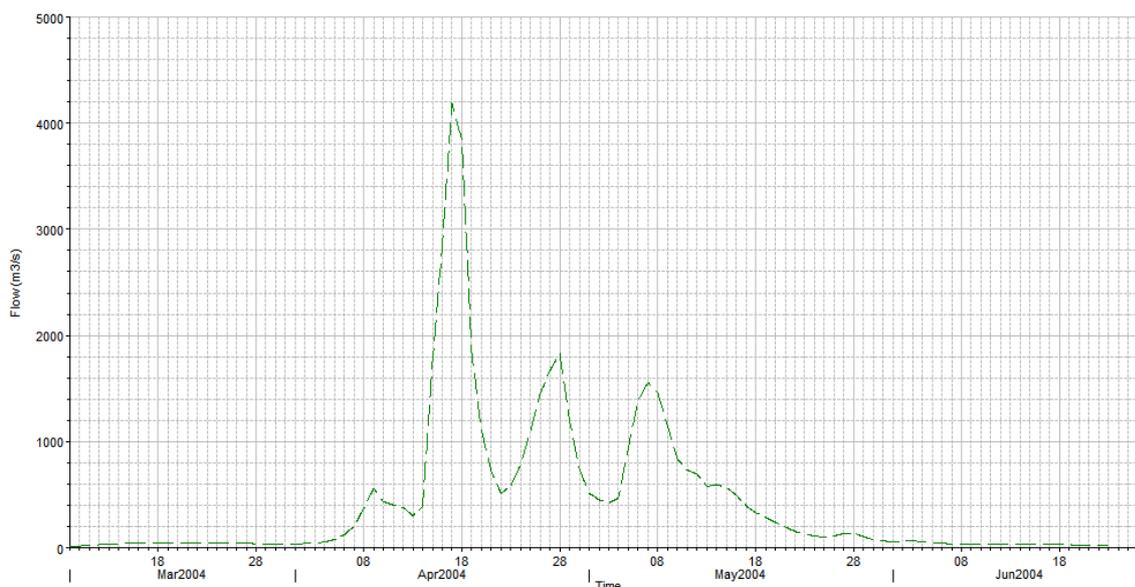


Рис. 8. Смоделированный гидрограф стока р. Кондома во входном створе при обеспеченности 1 %

Fig. 8. Simulated hydrograph of the runoff of the Kondoma River at the entrance cross-section corresponding to the 1 % occurrence

В нижнем (замыкающем) створе граничные условия задавались измеренным уклоном свободной поверхности, который на рассматриваемом участке составил 0,00040, или 0,40 ‰ и был получен в период рекогносцировочного обследования в июне 2017 г.

#### Анализ чувствительности модели к изменению уклона свободной поверхности

Одной из определяющих характеристик потока, которая может существенно влиять на результат моделирования, является уклон водной поверхности. В рассматриваемой симуляции одним из недостатков является отсутствие исходных данных по реальному уклону водной поверхности р. Кондома на моделируемом участке в многоводный период. Так как модель настраивалась на основе измеренного уклона водной поверхности в меженный период, то необходимо изучить ее чувствительность к изменению уклона в большую и меньшую сторону.

Для этих целей на основе каждого из рассматриваемых сценариев модель была испытана при мини-

мальном и максимальном уклоне. В условиях отсутствия прямых измерений за минимальный принят уклон водной поверхности, соответствующий среднему уклону на моделируемом участке р. Кондома, снятом с топографических карт масштаба 1:25000 и составляющем 0,00030, или 0,30 ‰. В качестве максимального уклона водной поверхности был использован уклон, полученный путем восстановления отметок максимального уровня воды на двух гидрологических постах – в п. Кузедеево, где он составил 231,38 м БС, и в г. Калтан, где за данную дату зафиксирован уровень воды, соответствующий отметке 218,42 м БС. В г. Калтан располагается водомерный пост ПАО «ЮК ГРЭС», расстояние между постами составляет 30,68 км. Таким образом, максимальный уклон водной поверхности на рассматриваемом участке составляет 0,00042, или 0,42 ‰, что практически идентично уклону, измеренному в июне 2017 г. и принятому для модели в качестве расчетного.

Результаты анализа чувствительности приведены в табл. 3.

**Таблица 3.** Результаты анализа чувствительности модели  
**Table 3.** Results of model sensitivity analysis

Створ/Cross-section	Уровень воды по сценарию, м БС Water level according to Scenario, m a.s.l.		
	1	2	3
Уклон водной поверхности (мин./измеренный/макс.), ‰ Channel slope min./measured/max.), ‰	0,30/0,40/042	0,30/0,40/042	0,30/0,40/042
Входной створ/Entrance	229,72/229,68/229,65	229,77/229,74/229,72	229,78/229,77/229,76
Верхний створ проектируемой дамбы Upper range of the designed dam	226,37/226,15/226,13	226,91/226,21/226,20	226,44/226,39/226,37
Нижний створ проектируемой дамбы Lower range of the designed dam	225,66/225,22/225,17	225,70/225,25/225,21	225,66/225,22/225,15
Замыкающий створ/Exit	225,46/224,93/224,85	225,47/224,94/224,85	225,47/224,94/224,86

Проведенный анализ чувствительности модели к изменению уклона водной поверхности показал, что отклик модели на изменение уклона существует и, в рамках принятого «коридора изменения» данной величины, в диапазоне от 0,00030 до 0,00042, смоделированная отметка уреза водной поверхности может отклоняться максимально на 0,62 м. Причем характер влияния таков, что наибольшая разница отметок урезом, рассчитанная при различных значениях уклонов, достигается в замыкающем створе. Это связано с тем, что величина уклона является одним из граничных условий модели. В рассматриваемом случае диапазон изменения уклонов водной поверхности довольно узкий, а уклон реки в многоводный период незначительно отличается от измеренного в меженный период, поэтому данное отклонение практически никак не повлияет на точность результатов моделирования. Однако из проведенной проверки чувствительности следует важный вывод о том, что при таком способе настройки модели, когда уклон водной поверхности является одним из граничных условий, исследуемый участок рекомендуется помещать как можно ближе ко входному створу, чтобы таким образом достигнуть минимальной погрешности в расчетах.

#### Результаты моделирования

Моделирование производилось по трем расчетным сценариям: квази-естественное состояние русла и

поймы р. Кондома до начала строительства – *сценарий 1 (контрольный)*, фактическое состояние русла и поймы с учетом существующей дамбы и породного отвала – *сценарий 2 (фактический)*, состояние русла и поймы с учетом существующих объектов и проектируемой дамбы – *сценарий 3 (проектный)*.

*Сценарий 1.* В результате численного моделирования в ненарушенных условиях поймы при отсутствии существующих на тот момент сооружений были получены расчетные зона затопления (рис. 9), поле скоростей и направлений течения (рис. 10), поле глубин потока (рис. 11).

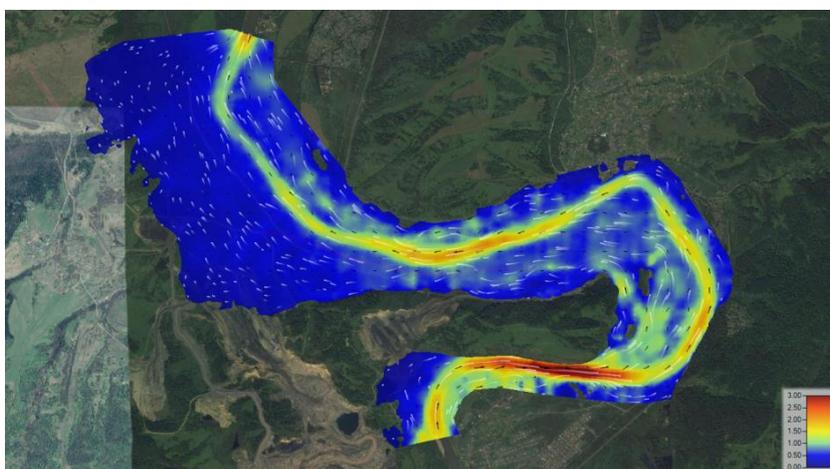
В результате численного моделирования по сценарию 1 на участке проектируемой дамбы были получены отметки уровня воды, равные для начала дамбы – 226,15 м БС, для точки ее примыкания к существующей дамбе 225,22 м БС.

*Сценарий 2.* В результате численного моделирования рассматриваемого участка в современных условиях, при наличии в пойме существующего породного отвала и защитной дамбы, были получены: расчетная зона затопления (рис. 12), поле распределения скоростей и направлений течения (рис. 13), расчетное поле глубин потока (рис. 14). Существующие объекты в пойме показаны красным цветом.



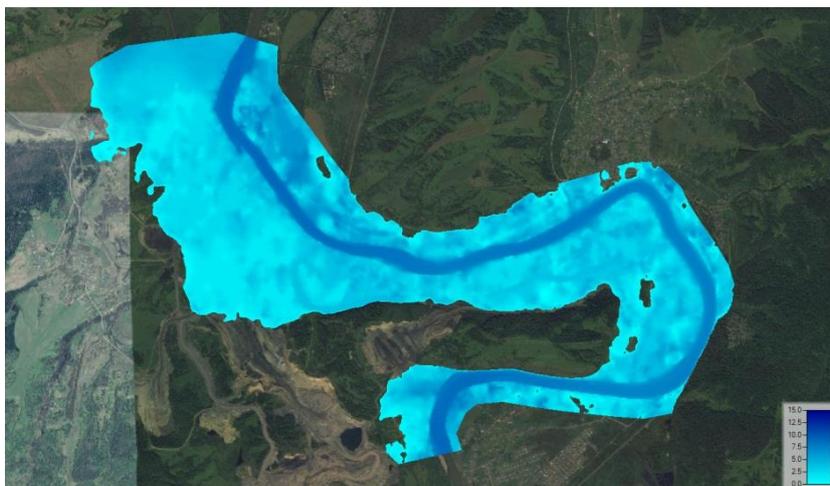
**Рис. 9.** Расчетная зона затопления при прохождении расхода воды 1 % обеспеченности в ненарушенных условиях левой поймы (сценарий 1)

**Fig. 9.** Estimated flood zone at water discharge of 1 % occurrence in undisturbed conditions in the left floodplain (Scenario 1)



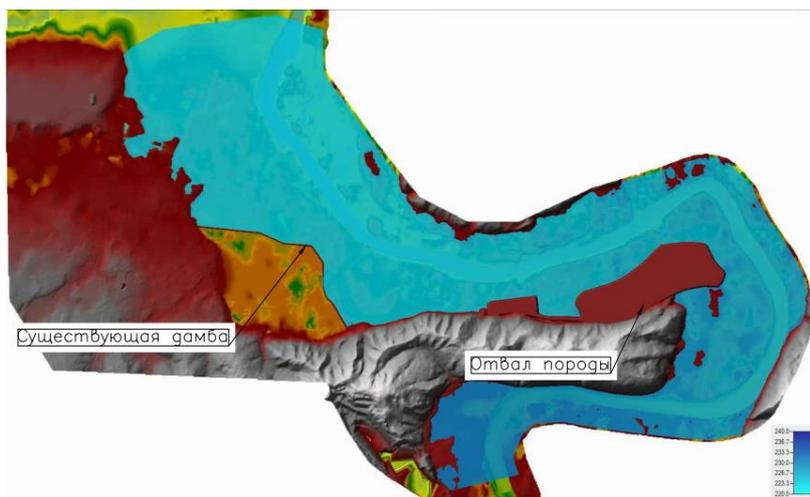
**Рис. 10.** Расчетное поле скоростей и направлений течения потока при прохождении расхода воды 1 % обеспеченности в ненарушенных условиях левой поймы (сценарий 1)

**Fig. 10.** Estimated flow velocity and stream directions field at water discharge of 1 % occurrence in undisturbed conditions in the left floodplain (Scenario 1)



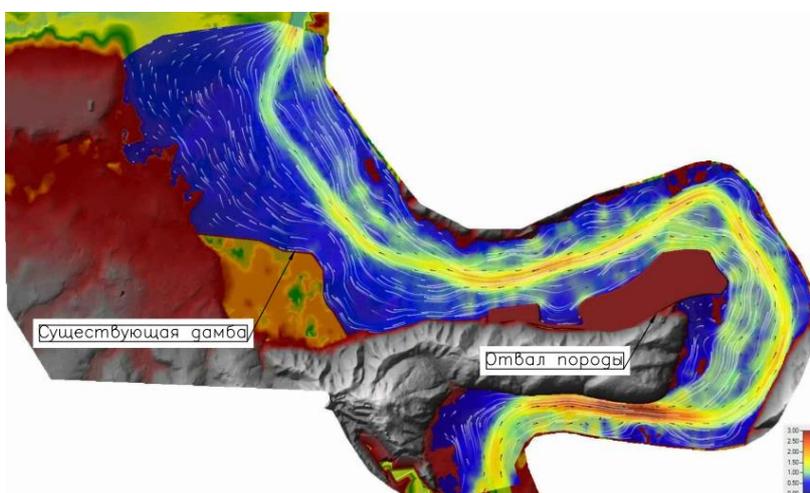
**Рис. 11.** Расчетное поле глубин потока при прохождении расхода воды 1 % обеспеченности в ненарушенных условиях левой поймы (сценарий 1)

**Fig. 11.** Estimated flow depth field at water discharge of 1 % occurrence in undisturbed conditions in the left floodplain (Scenario 1)



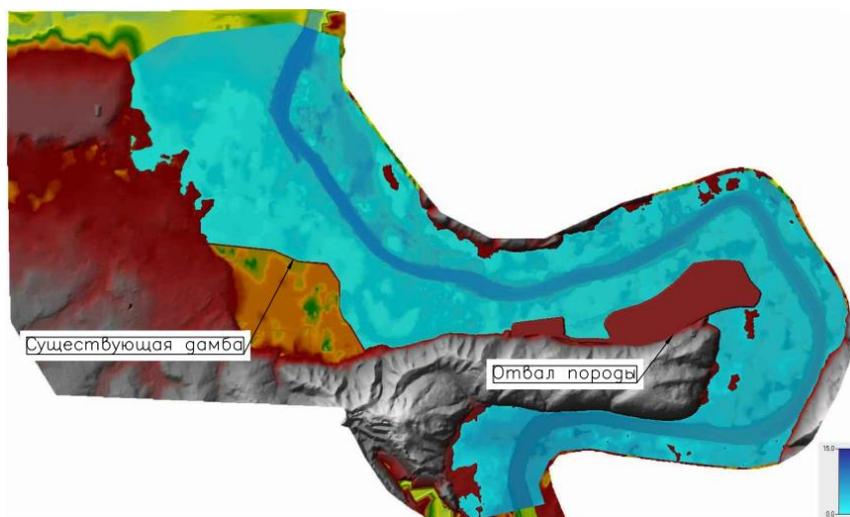
**Рис. 12.** Расчетная зона затопления при прохождении расхода воды 1 % обеспеченности в современных условиях (сценарий 2)

**Fig. 12.** Estimated flooded area at water discharge of 1 % occurrence in current conditions (Scenario 2)



**Рис. 13.** Расчетное поле скоростей потока при прохождении расхода воды 1 % обеспеченности в современных условиях (сценарий 2)

**Fig. 13.** Estimated flow velocity and stream directions field at water discharge of 1 % occurrence in current conditions (Scenario 2)



**Рис. 14.** Расчетное поле глубин потока при прохождении расхода воды 1 % обеспеченности в современных условиях (сценарий 2)

**Fig. 14.** Estimated flow depth field at water discharge of 1 % occurrence in current conditions (Scenario 2)

В результате численного моделирования по сценарию 2 на участке проектируемой дамбы были получены отметки уровня воды, равные для начала дамбы – 226,21 м БС, для точки ее примыкания к существующей дамбе – 225,25 м БС.

Результаты моделирования, по сравнению с контрольным сценарием, показывают незначительное увеличение уровня воды в районе начала проектируемой дамбы – до 6 см, в нижнем створе, а в точке примыкания проектируемой дамбы к существующей – до 3 см. Данное увеличение уровня воды, очевидно, вызвано подпорным влиянием построенных в пойме

объектов (дамбы и отвала), которые создают сужающий эффект для потока и увеличивают шероховатость поймы в целом, оказывая влияние на общую пропускную способность русла – поймы.

*Сценарий 3.* В результате моделирования рассматриваемого участка в условиях существования проектируемой защитной дамбы вместе с существующим породным отвалом и защитной дамбой были получены: расчетная зона затопления (рис. 15), поле распределения скоростей и направлений течения (рис. 16), расчетное поле глубин потока (рис. 17). Существующие и проектируемые объекты отмечены выносками.

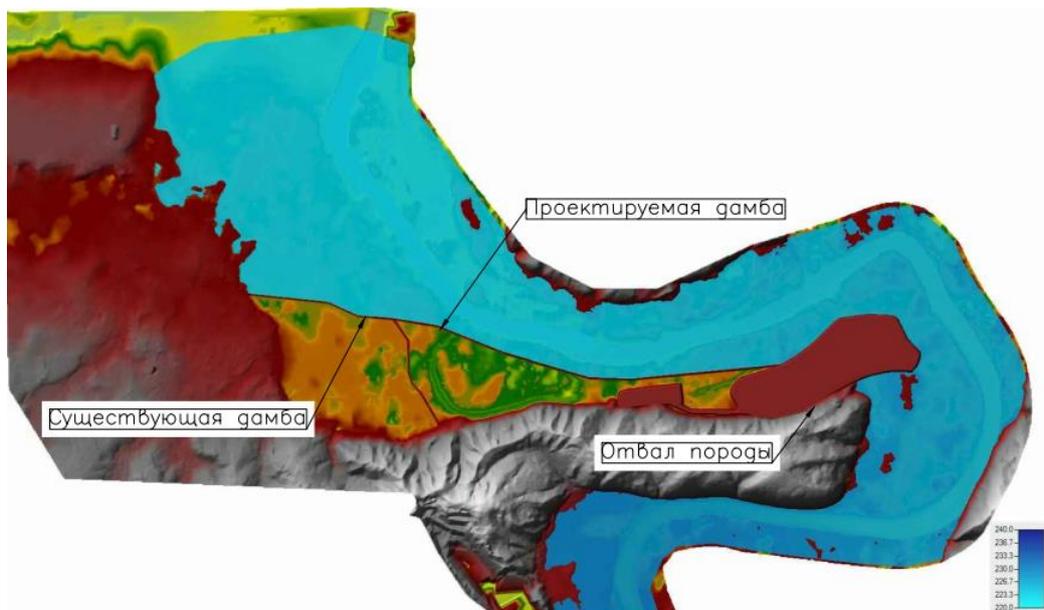


Рис. 15. Расчетная зона затопления при прохождении расхода воды 1 % обеспеченности при проектных условиях (сценарий 3)

Fig. 15. Estimated flooded area at water discharge of 1 % occurrence in design conditions (Scenario 3)

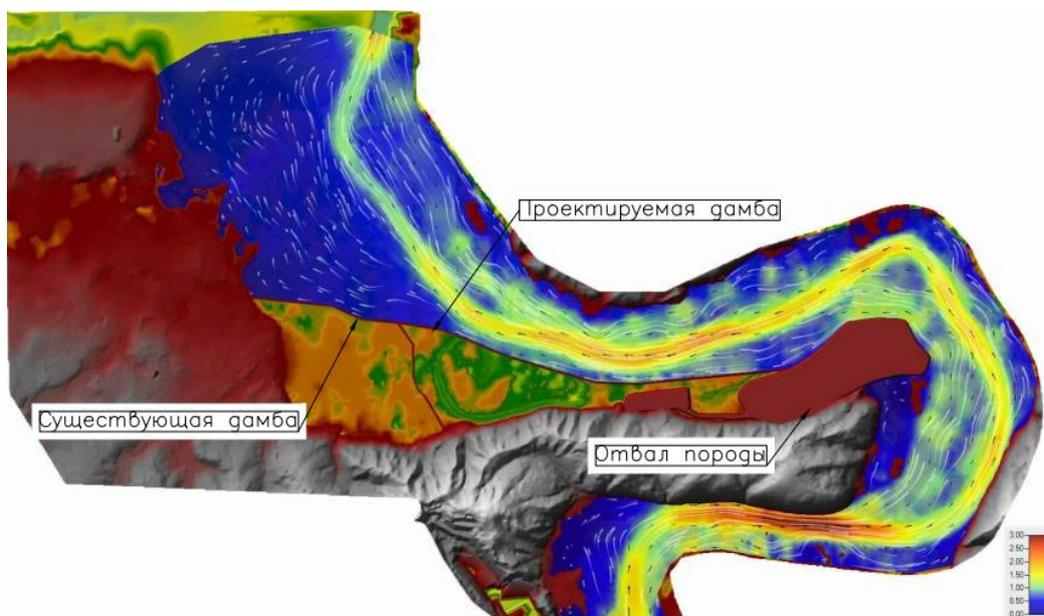
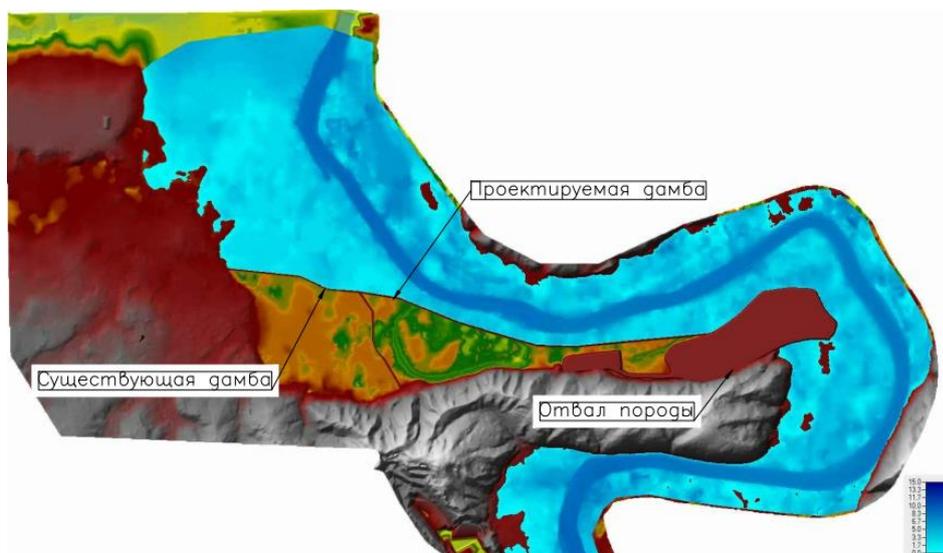


Рис. 16. Расчетное поле скоростей и направлений течения потока при прохождении расхода воды 1 % обеспеченности в проектных условиях

Fig. 16. Estimated flow velocity and stream directions field at water discharge of 1 % occurrence in design conditions



**Рис. 17.** Расчетное поле глубин потока при прохождении расхода воды 1 % обеспеченности в проектных условиях  
**Fig. 17.** Estimated flow depth field at water discharge of 1 % occurrence in design conditions

В результате численного моделирования по сценарию 3 на участке проектируемой дамбы были получены отметки уровня воды, равные для начала дамбы – 226,39 м БС, для точки ее примыкания к существующей дамбе – 225,21 м БС.

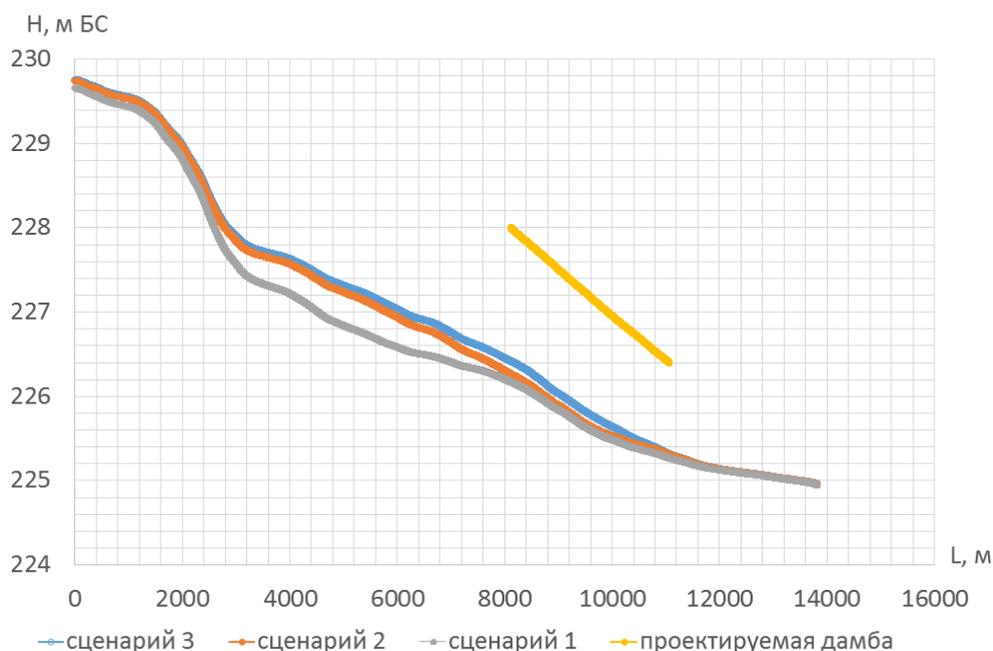
Результаты численного моделирования, в сравнении с контрольным сценарием 1 и фактическим сценарием 2, приведены в табл. 4.

Эффект влияния строительства в левой пойме р. Кондома при прохождении максимального расхода воды 1 % обеспеченности по сравнению с естественным состоянием русла–поймы (при отсутствии существующих и проектируемых сооружений) можно оценить по форме смоделированных кривых свободной поверхности, представленных на рис. 18.

**Таблица 4.** Результаты калибровки модели в условиях прохождения половодья

**Table 4.** Results of model calibration in the conditions of flood

Створ/Cross-section	Уровень воды по сценарию, м БС Water level according to Scenario, m a.s.l.		
	1	2	3
Верхний створ проектируемой дамбы Upper range of the designed dam	226,15	226,21	226,39
Нижний створ проектируемой дамбы Lower range of the designed dam	225,22	225,25	225,22



**Рис. 18.** Кривые свободной поверхности р. Кондома по трем сценариям при обеспеченности 1 %  
**Fig. 18.** Curves of free surface of the Kondoma river according to three scenarios at 1 % occurrence

### Обсуждение

Анализ результатов моделирования по рассмотренным сценариям показывает, что подъем уровня воды в верхнем створе проектируемой дамбы в сравнении с естественным состоянием составит до 22 см, а по сравнению с фактическим состоянием – до 18 см, в нижнем же створе по сравнению с естественным состоянием повышение уровня не ожидается либо ожидается крайне незначительным – около 1–2 см, а в сравнении с фактическим состоянием даже меньше 3 см. Некоторое снижение уровня воды в нижнем створе проектируемой дамбы по сравнению со вторым сценарием, вероятно, вызвано тем, что при наличии этой дамбы снизятся боковые сопротивления потоку со стороны отвала и существующей дамбы, которые в настоящее время, благодаря своей форме, могут образовывать значительные «мертвые» пространства в пойме, меняя таким образом величину скоростей и направления течений.

В целом результаты численного моделирования показывают наличие влияния строительства дамб в пойме р. Кондома на изменение уровня воды и скоростей потока, однако оно сравнительно небольшое. Схожие результаты были получены учеными из ИВЭП СО РАН А.Т. Зиновьев, К.Б. Кошелев, К.В. Марусин в работе [23], где на примере участка р. Лены ими было показано, что изменения поля глубин и скоростей потока при строительстве защитной дамбы окажутся незначительными, в особенности по сравнению с ущербом, который может причинить наводнение.

### Выводы

По результатам моделирования трех рассматриваемых сценариев можно сделать следующие выводы.

1. При реализации контрольного сценария 1 происходит полное затопление левосторонней поймы р. Кондома и ведение хозяйственной деятельности в таких условиях было бы затруднено или невозможно.
2. Строительство противопаводковых дамб значительно сокращает площадь зоны затопления пой-

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Socio-hydrology: conceptualising human-flood interactions / G. Di Baldassarre, A. Viglione, G. Carr, L. Kuil, J.L. Salinas, G. Bloschl // *Hydrology and Earth System Sciences*. – 2013. – V. 17. – P. 3295–3303.
2. Гидрология и гидротехнические сооружения / Г.Н. Смирнов, Е.В. Курлович, И.А. Витрешко, И.А. Мальгина. – М.: Изд-во «Высшая школа», 1988. – 472 с.
3. Постановление Правительства РФ от 18.04.2014 г. № 360. – М., 2014.
4. Варенцова Н.А., Никифоров Д.А., Гранич П.С. Нормативно-правовые основы проектов определения границ зон затопления и существующие проблемы // *Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации: Материалы докладов XIV Общероссийской научно-практической конференции и выставки*. – М., 2018. – С. 194–196.
5. Ковеня В.М., Чирков Д.В. Методы конечных разностей и конечных объемов для решения задач математической физики. – Новосибирск: Изд-во Новосибирского государственного университета, 2013. – 87 с.

мы и позволяет функционировать объектам угледобывающего комплекса.

3. В общем случае при реализации сценариев 1, 2 наблюдается тенденция повышения уровня воды на участке, где размещены существующие объекты, что, с большой вероятностью, связано с сужением живого сечения пойменной части потока и формированием подпорного эффекта, причем наибольший подпорный эффект наблюдается на участке расположения существующего отвала.
4. Уровень воды при реализации всех рассмотренных сценариев увеличивается в следующем порядке – сценарий 1 – сценарий 2 – сценарий 3, то есть с каждым новым объектом в пойме реки увеличиваются сопротивления потоку и подпорный эффект, а вследствие этого, и уровни воды. Однако данный вывод может являться лишь частным случаем, так как из общих основ гидравлики известно, что сужение потока не всегда приводит к увеличению уровня, при определенных обстоятельствах возможен и обратный эффект.
5. При реализации проектных решений по строительству новой защитной дамбы максимальный кумулятивный эффект влияния всех учитываемых в модели объектов на уровень воды в сравнении с естественными условиями выражается в максимальном подъеме уровня воды, равном 45–50 см, на участке строительства новой дамбы, так как именно в этом месте происходит максимальный эффект сужения потока.
6. Повышение уровня воды в результате строительства проектируемой дамбы по сравнению с фактическим состоянием поймы (при наличии существующей дамбы и отвала) прогнозируется незначительным, максимальное его значение составило от 7 до 15 см.
7. При реализации проектных решений по строительству новой дамбы максимальные скорости потока в прилегающих к дамбе областях и в русле увеличатся в среднем на 0,1–0,3 м/с, что должно быть учтено при выборе материала дамбы и ее конструктивных особенностей.
6. Ле Меоте Б. Введение в гидродинамику и теорию волн на воде. – Л.: Изд-во «Гидрометеиздат», 1974. – 368 с.
7. Bates P.D., Lane S.N., Ferguson R.I. *Computational fluid dynamics: applications in environmental hydraulics*. – Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2005. – 531 p.
8. Пьянков С.В., Шихов А.Н. Геоинформационное обеспечение моделирования гидрологических процессов и явлений. – Пермь: Изд-во Перм. гос. нац. исслед. ун-та, 2017. – 148 с.
9. Hydraulic modeling of flow, water levels and inundations: Serein River case study / S.M. Saleh, A. Ducharme, L. Oudin, N. Flipo, E. Ledoux // *PIREN-Seine*. – Paris, 2009. – P. 1–48.
10. Flood modeling using a synthesis of multi-platform LiDAR data / J.D. Colby, A.B. Turner, R.M. Csontos, M. Batten // *Water*. – 2013. – V. 5. – P. 1533–1560.
11. Земцов В.А., Вершинин Д.А., Инишев Н.Г. Имитационное моделирование заторов (на примере р. Томь, Западная Сибирь) // *Лёд и Снег*. – 2014. – № 3. – В. 127. – С. 59–68.
12. Dyhouse G., Hatchett J., Benn J. *Floodplain modeling using HEC-RAS*. – Waterbury: Haestad press, 2003. – 744 p.
13. Кошель С.М., Энтин А.Л. Современные методы расчета распределения поверхностного стока по цифровым моделям рельефа // *Геоморфологи: Современные методы и технологии*

- цифрового моделирования рельефа в науках о Земле. – 2016. – В. 6. – С. 24–34.
14. Геоинформационное моделирование наводнений по материалам космической съемки (на примере г. Бийск, Алтайский край) / Б.А. Новаковский, О.Н. Колесникова, А.И. Прасолова, Р.В. Пермяков // Геоинформатика. – 2015. – В. 1. – С. 15–20.
  15. Романовский Р.В. Применение методов компьютерного моделирования зон затопления при максимальных расчетных уровнях воды для решения проектных задач при рекультивации нарушенных земель, а также проектировании зданий и сооружений вблизи водных объектов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 2. – С. 186–201.
  16. Heine R.A. Levee effects upon flood levels: an empirical assessment // Hydrological Processes. – 2012. – V. 26. – P. 3225–3240.
  17. Di Baldassarre G., Castellarin A., Brath A. Analysis of the effects of levee heightening on flood propagation: example of the River Po, Italy // Hydrological Sciences Journal. – 2009. – V. 54 (6). – P. 1007–1017.
  18. Yen B.C. Hydraulics and effectiveness of levees for flood control // Hydrometeorology, Impacts, and Management of Extreme Floods. – 1995. – V. 1. – P. 1–12.
  19. Оценка чувствительности характеристик затопления к изменениям природных и антропогенных факторов на основе двумерной гидродинамической модели / И.Н. Крыленко, П.П. Головлев, Е.Д. Корнилова, А.А. Сазонов, Е.А. Фингерг // Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии: Сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского гидролога Юрия Борисовича Виноградова под редакцией О.М. Макарьевой. – СПб, 2018. – С. 898–902.
  20. Сазонов А.А., Крыленко И.Н., Головлев П.П. Оценка эффективности противопаводковых дамб с помощью методов математического моделирования (на примере реки Томь у города Междуреченска) // Природообустройство. – 2015. – № 4. – С. 73–76.
  21. Arcement G., Schneider V. Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains. U.S. Geological survey water supply paper 2339. – U.S.: Government printing office, 1989. – 38 p.
  22. Сазонов А.А., Крыленко И.Н. Анализ чувствительности двумерной гидродинамической модели к изменению коэффициента шероховатости // Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии: Сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского гидролога Юрия Борисовича Виноградова под редакцией О.М. Макарьевой. – СПб, 2018. – С. 933–938.
  23. Зиновьев А.Т., Кошелев К.Б., Марусин К.В. Использование компьютерного моделирования и ГИС-технологий для научного обоснования инженерных решений по предотвращению затопления пойм рек // Водные ресурсы России: современное состояние и управление: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. – Сочи, 8–14 октября 2018. – Новочеркасск: Лик, 2018. – Т. 2. – С. 98–105.

Поступила 05.05.2020 г.

#### Информация об авторах

**Романовский Р.В.**, главный гидролог ООО «Сибирьгидротехпроект».

UDC 556.5.072

## EFFECT OF FLOOD PROTECTION DAMS IN THE RIVER FLOODPLAIN ON FLOOD ZONE SHAPE, FLOW VELOCITY FIELDS AND WATER LEVELS ON THE EXAMPLE OF A NUMERICAL MODEL OF THE KONDOMA RIVER

Roman V. Romanovskiy,  
keny146@gmail.com

LLC Sibirgidrotekhproekt,  
7, Staro-Traktovaya street, Tomsk, 634510, Russia.

**The relevance** of numerical modeling of flood zones, characteristics of flow velocity field and marks of the river water levels is caused by the necessities of engineering practical work in development of mineral deposits, which are often situated in extremely difficult hydrographic conditions. In such conditions, the standard methods for calculating the mentioned characteristics do not allow us to achieve the desired result or do not take into account the whole variety of processes occurring in open flows, which are able to significantly affect the safe and trouble-free operation of the designed constructions.

**The aim** of the work is to show how the objects affect the change in the shape of the estimated flood zone, the flow velocity field, and water levels in conditions of constraining impact on the living cross-section of the flow during the passage of water rate of rare exceedance probability (1 % occurrence) on the example of the Kondoma river site and both existing and planned hydraulic constructions (flood control dams) and construction sites located in its floodplain.

**Methods.** Numerical modeling of flow characteristics (estimated flood zone, distribution of speeds and directions of flow, estimated water levels) on the site of the Kondoma river was conducted using the HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System) modeling system ver. 5.0.5. The model comprised three different scenarios. Scenario 1, the floodplain is relatively unbroken and there are no flood control dams and overburden dump; Scenario 2, there is a current flood control dam and overburden dump in the floodplain; Scenario 3, there are all the current objects mentioned in Scenario 2 and a designed flood control dam in the floodplain. The studied characteristics of the Kondoma river on the site under investigation were compared within all three implemented scenarios.

**Results.** A simulation model for the passage of flood (1 % of the exceedance probability) according to three scenarios was developed for the site of the Kondoma river, with Scenario 1 taken as the control. The model was calibrated, and the roughness coefficients of the floodplain and channel were chosen as adequate to actual conditions. Numerical flow characteristics were obtained (the shape of the estimated flood zone, the distribution of speeds and directions of flow, and water levels and depths) according to the three mentioned scenarios and the conclusions were drawn concerning the extent of influence of the current structures in the left floodplain of the Kondoma river on the shape of free surface, and also the influence under condition of a new flood control dam appearing in the left floodplain was forecasted.

### Key words:

Flood protection dams, numerical modeling, flooded zones, 2D hydraulic models, simulation models, HEC-RAS modeling system.

### REFERENCES

- Di Baldassarre G., Viglione A., Carr G., Kuil L., Salinas J.L., Bloschl G. Socio-hydrology: conceptualising human-flood interactions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, vol.17, pp. 3295–3303.
- Smirnov G.N., Kurlovich E.V., Vitreshko I.A., Malgina I.A. *Gidrologiya i gidrotekhnicheskie sooruzheniya* [Hydrology and hydraulic structures]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988. 472 p.
- Postanovlenie Pravitelstva RF ot 18.04.2014 g.* [Resolution of the Government of the Russian Federation as of 04.18.2014]. No. 360. Moscow, 2014.
- Varentsova N.A., Nikiforov D.A., Granich P.S. Normativno-pravovye osnovy proektov opredeleniya granits zon zatopeniya i sushchestvuyushchie problemy [Regulatory bases of projects for determining the boundaries of flood zones and existing problems]. *Materialy dokladov XIV Obshcherossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii i vystavki. Perspektivy razvitiya inzhenernykh izyskaniy v stroitelstve v Rossiyskoy Federatsii* [Materials of reports of the 14<sup>th</sup> All-Russian Scientific and Practical Conference and Exhibition. Prospects for the development of engineering surveys in construction in the Russian Federation]. Moscow, 2018. pp. 194–196.
- Kovenya V.M., Chirkov D.V. *Metody konechnykh raznostey i konechnykh obyomov dlya resheniya zadach matematicheskoy fiziki* [Finite difference and finite volume methods for solving problems of mathematical physics]. Novosibirsk, Novosibirsk State University Publ., 2013. 87 p.
- Le Meote B. *Vvedenie v gidrodinamiku i teoriyu voln na vode* [Introduction to hydrodynamics and the theory of waves on water]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1974. 368 p.
- Bates P.D., Lane S.N., Ferguson R.I. *Computational fluid dynamics: applications in environmental hydraulics*. Chichester, John Wiley & Sons Ltd, 2005. 531 p.
- Pyankov S.V., Shikhov A.N. *Geoinformatsionnoe obespechenie modelirovaniya gidrologicheskikh protsessov i yavleniy* [Geoinformational support for modeling hydrological processes and phenomena]. Perm, Perm State Research University Publ., 2017. 148 p.
- Saleh S.M., Ducharne A., Oudin L., Flipo N., Ledoux E. Hydraulic modeling of flow, water levels and inundations: Serein River case study. *PIREN-Seine*. Paris, 2009, pp. 1–48.
- Colby J.D., Turner A.B., Csontos R.M., Batten M. Flood modeling using a synthesis of multi-platform LiDAR data. *Water*, 2013, vol. 5, pp. 1533–1560.
- Zemtsov V.A., D Vershinin.A., Inishev N.G. Imitatsionnoe modelirovanie zatorov (na primere r. Tom, Zapadnaya Sibir) [Imitation modeling of ice dams (case study of Tom River, Western Siberia)]. *Lyod i Sneg*, 2014, vol. 127, no. 3, pp. 59–68.
- Dyhouse G., Hatchett J., Benn J. *Floodplain modeling using HEC-RAS*. Waterbury, Haestad press, 2003. 744 p.
- Koshel S.M., Entin A.L. Sovremennyye metody rascheta raspredeleniya poverkhnostnogo stoka po tsifrovym modelyam relyefa [Modern methods for calculating the distribution of surface runoff from digital elevation models]. *Geomorfologiya: Sovremennyye metody i tekhnologii tsifrovogo modelirovaniya relyefa v naukach o Zemle*, 2016, Iss. 6, pp. 24–34.
- Novakovskiy B.A., Kolesnikova O.N., Prasolova A.I., Permyakov R.V. Geoinformatsionnoe modelirovanie navodneniy po materialam kosmicheskoy syemki (na primere g. Biysk, Altayskiy kray) [Geoinformational modeling of floods based on materials from space imagery (using the example of the city of Biisk, Altai Krai)]. *Geoinformatika*, 2015, Iss. 1, pp. 15–20.

15. Romanovskiy R.V. Application of computer modeling methods of flood zones at maximum design water levels for solving project tasks in the disturbed lands recultivation and design of buildings and facilities near water bodies. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 2, pp. 186–201. In Rus.
16. Heine R.A. Levee effects upon flood levels: an empirical assessment. *Hydrological Processes*, 2012, vol. 26, pp. 3225–3240.
17. Di Baldassarre G., Castellarin A., Brath A. Analysis of the effects of levee heightening on flood propagation: example of the River Po, Italy. *Hydrological Sciences Journal*, 2009, vol. 54 (6), pp. 1007–1017.
18. Yen B.C. Hydraulics and effectiveness of levees for flood control. *Hydrometeorology, Impacts, and Management of Extreme Floods*, 1995, vol. 1, pp. 1–12.
19. Krylenko I.N., Golovlev P.P., Kornilova E.D., Sazonov A.A., Fingert E.A. Otsenka chuvstvitelnosti kharakteristik zatopeniya k izmeneniyam prirodnykh i antropogennykh faktorov na osnove dvumernoy gidrodinamicheskoy modeli [Assessment of sensitivity of flooding characteristics to changes in natural and anthropogenic factors based on a two-dimensional hydrodynamic model]. *Treti Vinogradovskie chteniya. Grani gidrologii. Sbornik dokladov mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii pamyati vydayushchegosya russkogo gidrologa Yuriya Borisovicha Vinogradova* [Edges of hydrology. Proc. of the International scientific conference devoted to the outstanding Russian hydrologist Yury B. Vinogradov]. Ed. By O.M. Makareva. St-Petersburg, 2018. pp. 898–902.
20. Sazonov A.A., Krylenko I.N., Golovlev P.P. Evaluation of the efficiency of flood-control dams using the methods of mathematical modeling (on the example of the river Tom near the city of Mezhdurechensk). *Prirodoobustroystvo*, 2015, no. 4, pp. 73–76. In Rus.
21. Arcement G., Schneider V. *Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains*. U.S. Geological survey water supply paper 2339. U.S., Government printing office, 1989. 38 p.
22. Sazonov A.A., Krylenko I.N. *Analiz chuvstvitelnosti dvumernoy gidrodinamicheskoy modeli k izmeneniyu koeffitsiyenta shero-khovatosti* [Sensitivity analysis of a two-dimensional hydrodynamic model to a change in the roughness coefficient]. *Treti Vinogradovskie chteniya. Grani gidrologii. Sbornik dokladov mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii pamyati vydayushchegosya russkogo gidrologa Yuriya Borisovicha Vinogradova* [Edges of hydrology. Proc. of the International scientific conference devoted to the outstanding Russian hydrologist Yury B. Vinogradov]. Ed. By O.M. Makareva. St-Petersburg, 2018, pp. 933–938.
23. Zinovyev A.T., Koshelev K.B., Marusin K.V. Ispolzovaniye kompyuternogo modelirovaniya i gis-tekhnologiy dlya nauchnogo obosnovaniya inzhenernykh resheniy po predotvrashcheniyu zatopeniya poym rek [Use of computer modeling and GIS technologies for scientific justification of engineering solutions aimed to prevent flooding of floodplain areas]. *Sbornik materialov Vserossyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Collection of materials of All-Russian scientific-practical conference]. Sochi, 8–14 October 2018. Novocherkassk, Lik Publ., 2018. Vol. 2, pp. 98–105.

Received: 5 May 2020.

#### Information about the authors

**Roman V. Romanovskiy**, chief hydrologist, LLC Sibirgidrotekhproekt.

УДК 622.279:681.5

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СКВАЖИНЫ С ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНЫМ НАСОСОМ ПО ДАННЫМ КОНТРОЛЯ ВОЗМУЩЁННЫХ РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Соловьев Илья Георгиевич<sup>1,2</sup>,  
solovyev@ikz.ru

Говорков Денис Александрович<sup>1,2</sup>,  
dagovorkov@mail.ru

Цибульский Владимир Романович<sup>1</sup>,  
v-tsib@yandex.ru

<sup>1</sup> Федеральный исследовательский центр Тюменский научный центр СО РАН,  
Россия, 625026, г. Тюмень, ул. Малыгина, 86.

<sup>2</sup> Тюменский индустриальный университет,  
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

**Актуальность** исследования связана с проблемами создания и сопровождения динамических моделей скважин с электроцентробежным насосом в контурах оперативного контроля и управления состоянием систем, в условиях дрейфа параметров подъёмника и притока. Оценка первопричин нарушения предписанного технологического режима работы скважины и прогноз ближайших негативных последствий имеют важное значение для принятия взвешенных (оптимальных) решений по коррекции режимных состояний и обеспечению стабильных условий эксплуатации.

**Цель:** разработка алгоритма оценивания дрейфующих параметров подъёмника, включая электроцентробежный насос, по методу наименьших квадратов и притока динамической модели скважины и приёмов стабилизации оценок в условиях реальной эксплуатации по данным зашумлённых измерений.

**Методы:** численное интегрирование нелинейных дифференциальных уравнений, методы регрессионного анализа по схеме наименьших квадратов, статистических вычислительных испытаний, пробных возмущений, приёмов регуляризации алгоритмов оценивания.

**Результаты.** Разработан двухэтапный алгоритм оценивания дрейфующих параметров подъёмника (износы, засорения) и притока (параметры продуктивности и подпора пласта) для упрощённого представления комплексной динамической модели скважины класса: «приток–подъёмник– электроцентробежный насос–устье» по данным двухтемповой шкалы контроля режимных состояний системы с реализуемым наблюдателем динамики притока в условиях пробных частотных возмущений.

**Выводы.** Предложенные правила стабилизации оценок параметров модели на основе генерации пробных возмущений, снижения размерности за счёт декомпозиции комплексной модели на составные блоки, фильтрации зашумлённых сигналов измерений посредством аппроксимации целыми функциями, реализации динамического наблюдателя притока формируют основу конструкции алгоритма идентификации с надёжным оцениванием основной группы параметров деформации напорной характеристики насоса и притока. Несмотря на низкие показатели точности идентификации гидросопротивления подъёмника, ошибка воспроизведения динамики переменных состояний системы возмущённых режимов эксплуатации с выходов наблюдателя не превышает 2 %, что говорит о низкой чувствительности штатных режимов эксплуатации подъёмника в рамках используемых модельных решений к искомой настройке параметра. Требуемая точность идентификации гидросопротивления трубы должна соотноситься с условиями регламента периодической очистки подъёмника от сорбентов.

### Ключевые слова:

Скважина, электроцентробежный насос, осложняющие факторы, декомпозиция, регуляризация, оценки, идентификация, метод наименьших квадратов, наблюдатели, фильтры состояния, пробные возмущения.

В работе рассматривается развитие задач по построению и моделированию динамики переходных процессов в скважине с регулируемым электроцентробежным насосом (ЭЦН) [1–5]. Речь пойдет о конструировании алгоритма идентификации модели, приведенной ранее в статье [6], по обновляемым данным контроля ее режимных состояний. Заметим, что даже в условиях регламентированных испытаний по оценке параметров притока [7] проблема надёжности и качества оценивания [8, 9] всегда остаётся первостепенной. В рассматриваемом случае проблема корректности ещё более усугубляется, т. к. размерность вектора оценок удваивается и помимо притока одно-

временно идентифицируются параметры подъёмника, которые в процессе эксплуатации могут дрейфовать. Заметим сразу, что проблема идентификации нестационарных систем в работе не исследуется, так как скорости дрейфов параметров модели много меньше гидродинамики переходных процессов скважины. По сути, нижеизложенное есть обоснование регламента оценивания [10, 11] параметров модели скважины по данным непрерывного контроля «слабо» возмущённых режимов нормальной эксплуатации. Как и в классическом анализе, качество оценок напрямую зависит от точности первичного контроля её состояний [12, 13].

Отметим ряд важных моментов.

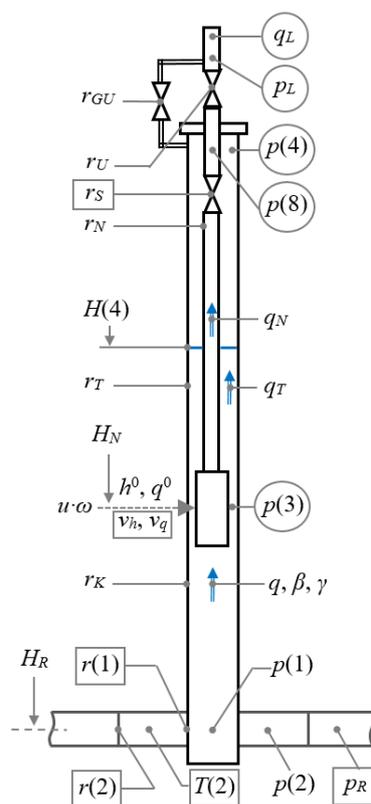
1. Исходная гидродинамическая модель, ориентированная на задачи оперативного контроля и управления режимами эксплуатации скважин, учитывая взаимодействие главных компонент и действия осложняющих факторов [14–16], по математической конструкции связей (корреляций) между ключевыми точками изначально распределенного подъемника остается упрощенной.
2. Редуцированный (упрощенный) характер описания с минимальным количеством настраиваемых параметров позволяет рассчитывать на создание корректных процедур параметрического оценивания, реализуемых по месту организации служб диспетчерского контроля и сбора первичных данных.
3. Идентификация в классе упрощенных моделей, в нашем случае – это, прежде всего, допущение о постоянстве удельного веса газо-жидкостной смеси (ГЖС) среднего по стволу подъемника, по сути, означает аппроксимацию реальных наблюдаемых процессов классом заданных уравнений. Возможное снижение точности моделирования, сужающее горизонты прогноза и планирования, может компенсироваться регламентом регулярной подстройки параметров в обязательном порядке при смене режимных состояний системы.
4. Программе производственных испытаний предшествует этап анализа проблемных задач оценивания на модельных экспериментах с «зашумлёнными измерениями». Результаты данного этапа обсуждаются в заключительной части работы. Проверка работоспособности алгоритма по данным глубинного контроля осуществляется в части идентификации параметров притока по незавершенным [17] пуско-остановочным режимам работы скважины.

Функциональная схема скважины, приведенная к вертикали, изображенная на рис. 1, иллюстрирует принятые обозначения переменных состояний ( $k$  – координата дискретного времени) и параметров:

- $p_R, p(2,k), p(1,k), p(3,k), p(4,k), p(8,k), p_L(k)$  – распределение давлений [МПа] вдоль линии тока от пласта, призабойной зоны (ПЗ), забоя на уровне  $H_R$ , подвески насоса на уровне  $H_N$ , затрубья до перепускного клапана, выход насосно-компрессорной трубы (НКТ), до линейного нефтесборника;
- $q(k), q_N(k), q_T(k), q_L(k)$  – объемные расходы [ $\text{м}^3/\text{сут}$ ] ГЖС с обводненностью  $\beta$  и средним удельным весом  $\gamma$  по стволу скважины [ $\text{МПа}/\text{м}$ ] от забоя  $q(k)=q_N(k)+q_T(k)$  по каналам НКТ, затрубья (ЗТ) и на устье;
- $r_U, r_{GU}, r_T, r_N, r_K$  – известные по данным конструкции гидросопротивления, линеаризованной модели потерь напора на трение на устьевом штуцере, перепускном клапане и в сегментах подъемника: затрубье, НКТ, низ обсадной колонны [ $\text{сут}/\text{м}^2$ ];
- кусочно-линейная нормированная напорная характеристика насоса задается таблицей своих коэффициентов  $\langle \lambda_0(i), \lambda_1(i) \rangle$  (рис. 2 в [6]), в общем

случае настраиваемых по каталогам изделий [18, 19], и параметрами типоразмера силовой установки  $\langle h^0, q^0 \rangle$  по номинальным значениям напора [м] и расхода [ $\text{м}^3/\text{сут}$ ];

- переменные состояния по входу:  $u(k)=\{1,0\}$  – идентификатор режима работы по типу {ВКЛ, ВЫКЛ},  $\omega(k)$  – относительная частота вращения вала двигателя, в случае частотно-регулируемого привода пропорциональная частоте питающего напряжения (в номинале  $\omega(k)=1$ ).



**Рис. 1.** Функциональная схема скважины с погружным электронасосом (отдельно выделены измеряемые переменные состояния и идентифицируемые параметры)

**Fig. 1.** Functional diagram of a well with a submersible electric pump (measured state variables and identified parameters are separately highlighted)

Параметры модели, подлежащие оцениванию, делятся на две части.

**Первая часть** (дрейфующие характеристики подъемника):

- $r_S$  – дополнительное гидросопротивление НКТ, обусловленное сорбированием парафинов, солей и прочих поллютантов (изначально  $r_S=0$ );
- $v_h, v_q$  – коэффициенты деформации (снижения) напорной характеристики насоса по напору (износ) и расходу (засорение) (изначальное  $v_h=v_q=1$ ).

**Вторая часть** (дрейфующие параметры притока):

- $p_R$  – давление подпора пласта на контуре питания ПЗ;
- $r(2)$  – гидросопротивление перехода «пласт–ПЗ»;

- $r(1)$  – гидросопротивление перехода «ПЗ–забой» или их обратные величины  $w(2)=1/r(2)$ ,  $w(1)=1/r(1)$ , именуемые гидропроводностями переходов, которые в совокупности дают оценку коэффициенту продуктивности линейной модели притока скважины  $w_R = \frac{w(1)w(2)}{w(1) + w(2)}$ ;
- $T(2)$  – постоянная времени ПЗ, связанная с параметром ее объемной гидроупругости:  $T(2)=r(2)\tau(2)$  [20], в первом приближении оценивается по длительности периода окончания переходного процесса на забое скважины –  $T_{КВД}$ , например по кривой восстановления давления (КВД) [7, 14]

$$T(2) = T_{КВД} / 3. \quad (1)$$

Обратим внимание на ряд особенностей организации работы процедур параметрического оценивания.

1. Выделенные на рис. 1 контролируемые переменные состояния имеют разномасштабные периоды измерений:

- состояния по давлениям, равно как и по регулируемой частоте

$$I_p = \langle p_L(k), p(4, k), p(8, k), p(3, k), \omega(k) \quad k \in K \rangle, \quad (2)$$

считываемые в моменты времени  $t_k$ , имеют сравнительно высокую частоту опроса  $t_{k+1}=t_k+\Delta t_p$ ,  $\Delta t_p \sim 30$  с,  $k \in K = \{0, 1, 2, \dots\}$  – идентификатор дискретного времени по шкале «плотных» измерений;

- замеры расходов на устье

$$I_q = \langle q_L(k), \quad k \in K_q \subset K \rangle \quad (3)$$

осуществляются намного реже  $\Delta t_q \sim 30$  мин и более,  $K_q$  – шкала «редких» измерений, синхронизированная по времени со шкалой  $K$ .

2. Контроль давления у приема насоса –  $p(3, k)$  – позволяет разбить описание модели и, как следствие, алгоритм оценивания на два блока в соответствии с указанным ранее разделением идентифицируемых параметров. Реализуемая таким образом декомпозиция задачи идентификации шестимерного вектора на две задачи меньшей размерности с векторами

$$\mathbf{c}_N = [r_1 \quad \delta v \quad v_h]^T, \quad \mathbf{c}_R = [p_R \quad r(1) \quad r(2)]^T, \quad (4)$$

где  $r_1=r_N+r_S$ ,  $\delta v=v_h/v_q$  повышает уровень обусловленности оценок по методу наименьших квадратов (МНК).

3. Условия идентифицируемости параметров (4) модели скважины напрямую зависят от уровня информативности (вариабельности) данных контроля (2), (3), что чаще не обеспечивается стационарными режимами нормальной эксплуатации системы. Типовые методики анализа притока по КВД [7, 20] не экономичны в технологиях реального времени, не информативны по состоянию подъемника и могут быть не корректными по нелинейным проявлениям, связанным с наличием свободного газа на забое. Должный уровень информативности данных первичного контроля

обеспечивается в нашем случае режимом пробных частотных возмущений  $\omega(k)$ ,  $k \in K$  работы ЭЦН (без останова скважины).

В отличие от классических методов анализа целых решений, например по КВД, где метод пробных возмущений для произвольных  $\omega(k)$  не применим, в рассматриваемой схеме анализа переходных процессов метод пробных возмущений [21] оказывается не только возможным, но и необходимым инструментом повышения корректности решения обратной задачи.

Отмеченное выше разделение модели от состояния  $p(3, k)$  на составные блоки сверху и снизу включает:

Канал «насос–НКТ», описываемый в условиях  $q_L(k) > 0$  [6, 16] равенством

$$p(3, k) + \gamma \begin{bmatrix} u(k)\omega(k)^2 v_h h^0 \lambda_0(i) - \\ -u(k)\omega(k) \frac{v_h h^0}{v_q q^0} \lambda_1(i) q_N(k) \end{bmatrix} = \\ = p(8, k) + \gamma (H_N + r_1 q_N(k)), \quad (5)$$

где  $i$  – номер участка напорной характеристики (рис. 2 в [6]), определяемый условием

$$i = \arg \left\{ \frac{q_N(k)}{\omega(k) \cdot q^0} \in v_q \right\} [q_N(i+1), q_N(i)]$$

Возможный режим противотока в НКТ ( $q_N(k) < 0$ ,  $H(8, k) > 0$ ,  $1_q(k) = 1$ ) [6] в данном описании игнорируется.

Канал «затрубье», описываемый равенством

$$p(3, k) = p(4, k) + \\ + \gamma (H_N - H(4, k) - (1 - 1_4(k)) r_T (q(k) - q_N(k))), \quad (6)$$

где динамический уровень раздела фаз  $H(4, k)$  с идентификатором отсутствия подачи через перепускной клапан из затрубья ( $1_4(k) = 1$ ), с площадью кольцевого сечения –  $S_T$  описывается уравнением

$$S_T \frac{d}{dt} H(4, t) = 1_4(t) (q_N(t) - q(t)).$$

Канал «низ колоны»

$$p(1, k) = p(3, k) + \gamma (H_R - H_N + r_K q(k)). \quad (7)$$

Блок притока

$$(T(2)D + 1) p(2, k) = p_R - r(2)q(k), \\ D = d/dt, \\ q(k) = w(1) \frac{p(1, k)(p(2, k) - p(1, k))}{p(1, k) + \mu_R (p_{GO} - p(1, k))_+}, \\ \mu_R = \frac{(1 - \beta)G \cdot p_0}{p_{GO} - p_0}, \quad (8)$$

где  $G$  – газовый фактор нефти [22],  $p_{GO}$  – давление насыщения, ниже которого инициируются процессы разгазирования нефти,  $p_0 \approx 0,1$  МПа – давление атмосферное.

Техника параметрического оценивания по МНК [23, 24], связанная с приведением модели объекта идентификации к регрессионному виду

$$y(k) = \mathbf{c}^T \mathbf{v}(k), \quad (9)$$

основана на построении и последующем решении системы линейных алгебраических уравнений

$$F \cdot \hat{\mathbf{c}} = \mathbf{b}, F = \sum_{k \in K_0} \mu(k) \mathbf{v}(k) \mathbf{v}(k)^T, \\ \mathbf{b} = \sum_{k \in K_0} \mu(k) \mathbf{v}(k) y(k) \quad (10)$$

относительно вектора оценок искомых параметров. Здесь  $\mu(k) \geq 0$  – весовые коэффициенты  $\sum_{k \in K} \mu(k) = 1$ , ранжирующие значимость данных первичного контроля (2), (3) с использованием которых формируются вторичные данные  $I_U = \langle y(k), \mathbf{v}(k) \mid k \in K_0 \subset K \rangle$ , предназначенные для реализации алгоритма (10). В примерах  $\mu(k) = 1/N_0$ , где  $N_0$  – мощность множества  $K_0$  (число слагаемых в сумме, охватывающих значимую часть возмущённого режима работы системы).

Преобразование модели (5) к регрессионному виду (9)

$$y_N(k) = \mathbf{c}_N^T \mathbf{v}_N(k)$$

устанавливает правило формирования пары

$$y_N(k) = \frac{1}{\gamma} (p(3, k) - p(8, k)) - H_N \\ \mathbf{v}_N(k) = \left[ q_N(k) \quad u(k) \omega(k) q_N(k) \frac{h^0}{q^0} \lambda_1(i) \quad -u(k) \omega(k)^2 h^0 \lambda_0(i) \right]^T \quad (11)$$

и, согласно (10), алгоритма оценивания неизвестных (дрейфующих) параметров подъемника

$$F_N \cdot \hat{\mathbf{c}}_N = \mathbf{b}_N. \quad (12)$$

Реализация алгоритма возможна, если пара (11) доступна формированию по данным  $I_p$  и  $I_q$  первичного контроля (2), (3). Если выход регрессионной модели  $y_N(k)$  (11) формируется, согласно (5), по «плотной» шкале  $k \in K$  измерений  $I_p$ , то восстановление компонент вектора  $\mathbf{v}_N(k)$  связано с измерениями расходов  $q_N(k)$ . Заметим, что устьевые замеры расходов  $q_L(k)$  осуществляются по «редкой» временной шкале  $I_q$ ,  $k \in K_q$  (3), причем равенство  $q_L(k) = q_N(k)$  имеет место в условиях  $1_4(k) = 1$ , когда подача  $q_T(k)$  через перепускной клапан отсутствует (6).

Если одновременно с НКТ наблюдается подача через клапан  $1_4(k) = 0$ ,  $H(4, k) = 0$ , то выполнено  $q_L(k) = q(k)$  и на основании (6) можно записать

$$q_N(k) = q_L(k) - \frac{1}{r_T} (1 - 1_4(k)) \cdot y_T(k), \\ y_T(k) = \frac{1}{\gamma} (p(3, k) - p(4, k)) - H_N, \quad (13)$$

что свидетельствует о возможности формирования переменной  $q_N(k)$  по шкале «редких» замеров –  $K_q$ , следовательно, и о реализуемости алгоритма (12).

Построение регрессионной модели для неизвестных параметров (4) притока (8) в виде

$$y_R(k) = \mathbf{c}_R^T \mathbf{v}_R(k) \quad (14)$$

в условиях, что оценка  $T(2)$  (1) априорно известна, связано со следующими преобразованиями уравнений (8).

Используя алгебру линейных дифференциальных операторов [25, 26], перепишем модель динамики ПЗ (8) в виде:

$$p(2, k) = p_R - r(2) \tilde{q}(k), \quad (15)$$

где  $q(k)$  воспроизводится на выходе реализуемого динамического фильтра состояний [23]

$$(T(2)D + 1) \tilde{q}(k) = q(k). \quad (16)$$

Подставляя (15) в выражение для притока в забой скважины (8), после приведения к общему знаменателю и деления результата на  $w(1) \cdot p(1, k)$ , приходим к искомому представлению пары (14) в виде

$$y_R(k) = p(1, k),$$

$$\mathbf{v}_R(k) = \left[ 1 \quad -\delta_p(1, k) q(k) \quad -\tilde{q}(k) \right]^T, \quad (17)$$

где

$$\delta_p(1, k) = 1 + \mu_R \left( \frac{P_{G0}}{p(1, k)} - 1 \right)_+$$

и алгоритму оценивания по правилу (10)

$$F_R \cdot \hat{\mathbf{c}}_R = \mathbf{b}_R. \quad (18)$$

Как и в случае с (12), реализация алгоритма (18) возможна, если пара (17) доступна формированию по данным контроля (2), (3).

Согласно (17), формирование пары  $\langle y_R(k), \mathbf{v}_R(k) \rangle$  основывается на расчетах давления –  $p(1, k)$ , переменной  $q(k)$  и ее динамического аналога –  $\tilde{q}(k)$ , восстановленного с помощью фильтра (16). В отличие от схемы формирования данных (11) для идентификации параметров подъемника (12), которые, по сути, собираются по шкале «редких» измерений –  $K_q$ , корректное воспроизведение выхода фильтра на возмущенных режимах эксплуатации динамической системы требует построения пары (17) по более «плотной» временной шкале с периодами квантования  $\Delta t_0$  менее  $T_2/30 \sim 10 \dots 15$  мин, что в условиях формирования выборки  $I_q$  (3) может быть недостижимым.

Рассмотрим схему построения оценок  $\hat{q}(k)$ ,  $\hat{q}_N(k)$ ,  $k \in K$  процессов  $q(k)$ ,  $q_N(k)$  на основе реализации настраиваемого наблюдателя [27–30].

В условиях реализации первичной процедуры МНК оценивания параметров подъемника:  $\hat{\mathbf{c}}_N = [\hat{r}_1 \quad \delta \hat{v} \quad \hat{v}_h]^T$ , динамика расхода в НКТ –  $q_N(k)$ , согласно (5) и (12), может быть оценена расчетным путем на основе данных  $I_p$  с «плотной» временной шкалой по выражению

$$q_N(k) = \left[ \frac{u(k) \omega(k)^2 \hat{v}_h h^0 \lambda_0(i) + y_N(k)}{\hat{r}_1 + u(k) \omega(k) \delta v \frac{h^0}{q^0} \lambda_1(i)} \right]_+, \quad k \in K, \quad (19)$$

где учтена блокировка возможного противотока  $q_N(k) < 0$  герметичным обратным клапаном на выкиде

ЭЦН (знак «+» на позиции индекса) при выключении ( $u(k) \rightarrow 0$ ) насоса.

В режиме  $1_4(k)=0$ , согласно (13), искомая оценка притока  $q(k)$  рассчитывается с использованием  $\hat{q}_N(k)$  по правилу

$$q(k) = q_N(k) + \frac{1}{r_T} (1 - 1_4(k)) \cdot y_T(k).$$

Но в условиях  $1_4(k)=1$ , когда динамика движения уровня  $H(4,k)$ , равно как и расхода  $q_T(k)$ , остаётся скрытой, приведённое соотношение оказывается неполным для оценивания притока  $q(k)$ . Для решения возникшей задачи воспользуемся моделью «затрубья» (6), из которой, согласно (13), в условиях  $1_4(k)=1$ , следует

$$q(k) = q_N(k) - S_T \dot{H}(4,k),$$

$$H(4,k) = H_N - \frac{1}{\gamma} (p(3,k) - p(4,k)) = -y_T(k).$$

Отсюда, наблюдатель притока для любых состояний  $1_4(k)$  принимает вид

$$q(k) = q_N(k) + 1_4(k) S_T \dot{y}_T(k) + \frac{1}{r_T} (1 - 1_4(k)) \cdot y_T(k). \quad (20)$$

Построение оценки переменной  $\hat{p}(1,k)$  по «плотной» временной шкале  $k \in K$  осуществляется согласно (7) по выражению

$$\hat{p}(1,k) = p(3,k) + \gamma (H_R - H_N + r_R \hat{q}(k)), \quad (21)$$

где также используется ранее восстановленные (20) значения  $\hat{q}(k)$ .

Полученный ранее алгоритм идентификации параметров притока (17), (18) реконструируется с использованием оценок переменных  $\langle \hat{p}(1,k), \hat{q}(k), \bar{q}(k) \rangle$  (20), (21) к виду

$$\hat{F}_R \cdot \hat{c}_R = \hat{b}_R \quad (22)$$

где вместо (16) переменная  $\bar{q}(k)$  воспроизводится по правилу

$$(T(2)D + 1) \bar{q}(k) = \hat{q}(k) \quad (23)$$

с «плотной» временной шкалой  $k \in K_q$ .

Вышеизложенное является доказательством следующего результата.

#### Утверждение.

Пусть гидродинамическая модель скважины с частотно-регулируемым ЭЦН (рис. 1), заданная системой уравнений «верха» (5), (6) с неопределённым вектором дрейфующих параметров  $c_N$  и «низа» (7), (8) с неопределёнными параметрами притока  $c_R$  (4), представлена данными контроля  $I_p$  и  $I_q$  (2), (3), с разномасштабными интервалами («плотностью») синхронизированных измерений своих состояний.

Тогда двухэтапная процедура идентификации неизвестных параметров  $c_N, c_R$  модели по данным контроля состояний  $I_p$  и  $I_q$  а также режима  $1_4(k)$  подачи из затрубья на основе МНК с одновременным оцениванием динамики притока  $\langle p(1,k), q(k) \rangle$ , подачи  $q_N(k)$  и уровня  $H(4,k) = -y_T(k)$  посредством

реализации настраиваемого по оценкам  $\hat{c}_N$  наблюдателя (19)–(23) с применением режима пробных частотных возмущений  $\omega(k)$  ЭЦН задается нижеприведённой инструкцией:

#### НАЧАЛО

1. Ввод исходных данных о параметрах конструкции, ЭЦН и флюида.
2. Синхронизация данных выборки  $I_p$  и  $I_q$  с высокой (2)  $k \in K$  и низкой (3)  $k \in K_q$  частотами опроса.
3. Формирование данных входо-выходных состояний (11), (12) модели регрессии подъёмника по шкале  $k \in K_q$ .
4. Расчёт МНК оценки (12) параметров подъёмника  $\hat{c}_N$ .
5. Реализации настраиваемого по  $\hat{c}_N$  наблюдателя (19)–(21), (23), с последующей расчётной оценкой графиков динамики притока  $\langle p(1,k), q(k) \rangle$  и входо-выходных состояний его модели регрессии (17) по шкале  $k \in K$ .
6. Расчёт МНК оценки (22) параметров притока  $\hat{c}_R$ .

#### КОНЕЦ.

Тестирование представленного алгоритма идентификации осуществлялось по данным моделирования частотно  $\omega(k)$  возмущённых режимов работы системы с настройками из табл. 1. Данные измерений формировались на основе модельных состояний с добавлением искусственной помехи измерений.

Результаты тестирования свидетельствуют, что по показателю относительной ошибки оценивания:  $\delta c_i = (|c_i - \hat{c}_i| / c_i) \cdot 100\%$  реализуемый по модельным измерениям алгоритм идентификации доставляет практически точные оценки искомым параметрам. Наблюдаемая малая погрешность оценки притока обусловлена ошибкой разностного вычисления производной сигнала  $q_T(k)$  (20). Однако наложение помехи измерений (стандартная функция «rand» ПО MatLab [31]) с нулевым средним и амплитудами: 1 МПа для  $p(3,k)$ , 10 м<sup>3</sup>/сут для  $q_L(k)$  и 0,25 МПа для  $p(4,k)$  и  $p(4,k)$ , уже искажает результат оценивания, что свидетельствует о плохой обусловленности рассматриваемых задач ( $\text{cond}(F) \sim 10^6$ ) и указывает как минимум на два момента:

- 1) необходимость предварительной фильтрации измеряемых сигналов;
- 2) необходимость применения процедур регуляризации алгоритмов МНК с внесением дополнительной априорной информации об искомым моделях.

Учитывая необходимость расчёта производной (20), решение первой задачи осуществлялось посредством аппроксимации зашумлённых сигналов контроля [32–34] на интервалах постоянства частотных возмущений гладкими кривыми, предоставляемыми инструментальной средой MatLab, модуль Curve Fitting Toolbox [31]. Сравнительный анализ результатов фильтрации позволил выбрать вариант базиса в виде дробно рациональной функции.

**Таблица 1.** Параметры модели скважины

**Table 1.** Well model parameters

Наименование, [ед. изм.] Name, [units]	Значение Value	Обозначение Notation
Среднепластовое давление, [МПа] Average reservoir pressure, [MPa]	22	$p_R$
Глубина забоя по вертикали, [м] Well depth, [m]	3000	$H_R$
Коэффициент продуктивности скважины, [м <sup>3</sup> /(МПа·сут)] Well productivity, [m <sup>3</sup> /(MPa·day)]	8	$w_R$
Коэффициент гидропроводности притока из пласта в ПЗ скважины, [м <sup>3</sup> /(МПа·сут)] Reservoir productivity coefficient, [m <sup>3</sup> /(MPa·day)]	10	$w(1)$
Коэффициент гидропроводности притока из ПЗ в забой скважины, [м <sup>3</sup> /(МПа·сут)] Inflow productivity coefficient, [m <sup>3</sup> /(MPa·day)]	40	$w(2)$
Объёмная доля воды, [ед.] Water cut, [units]	0,3	$\beta$
Удельный вес, [МПа/м] Specific gravity, [MPa/m]		
•нефти/oil	$0,68 \cdot 10^{-2}$	$\gamma_o$
•воды/water	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$\gamma_w$
•жидкости/liquid	$0,8 \cdot 10^{-2}$	$\gamma$
•газа/gas	$0,8 \cdot 10^{-5}$	$\gamma_{G0}$
Весовая характеристика газа, [МПа/м] Gas weight characteristic, [MPa/m]	$5,6 \cdot 10^{-4}$	$Y_G$
Газовый фактор, [ед.] Gas factor, [units]	100	$G$
Давление в линии нефтесбора, [МПа] Oil collector line pressure, [MPa]	1,5	$p_L$
Давление насыщения, [МПа] Saturation pressure, [MPa]	18	$p_{G0}$
Гидросопротивления, [сут/м <sup>2</sup> ] Hydroresistances, [day/m <sup>2</sup> ]		
•обсадной колонны/casing	1	$r_K$
•НКТ/tubing	1,6	$r_N$
•устьевого штуцера/wellhead choke	1	$r_U$
•затрубного пространства/annulus	0,8	$r_{ZI}$
•перепускного клапана из ЗТ wellhead annulus choke	2	$r_{GU}$
•потерь на засорение в НКТ pressure loss due to clogging	1	$r_S$
Параметры насоса Pump parameters		
•уровень подвески, [м]/pump depth, [m]	2200	$H_N$
•номинальный напор, [м] nominal head, [m]	1900	$h^0$
•номинальный дебит, [м <sup>3</sup> /сут] nominal rate, [m <sup>3</sup> /day]	60	$q^0$
Площади сечений, [м <sup>2</sup> ] cross-sectional areas, [m <sup>2</sup> ]		
•НКТ/tubing	0,002	$S_N$
•ЗТ/annulus	0,01	$S_T$
Постоянная времени ПЗ, [сут] Inflow zone response time, [day]	0,4	$T(2)$

По аналогии с типовыми подходами ГДИС [7, 14] реконструкция (регуляризация) процедур оценивания (12), (22), сформированных по данным частотно возмущенных режимов работы, осуществлялась введением дополнительного уравнения связи, восстановленного для осреднённых состояний стационарных режимов эксплуатации до периода пробных возмущений. Правило реконструкции с понижением размерности матрицы МНК в следующем. Пусть исход-

ная регрессионная модель объекта идентификации (9) имеет вид

$$y(k) = c_1 v_1(k) + c_2 v_2(k) + c_3 v_3(k), \quad k \in K_1 \cup K_2, \quad (24)$$

где  $K_1 = \{1, 2, \dots, N_1\}$  – дискретные моменты времени стационарного режима работы, а  $K_2 = \{N_1+1, N_1+2, \dots, N_2\}$  – последующий период возмущений. В условиях зашумлённости данных измерений равновесное состояние системы на периоде  $k \in K_1$  может быть представлено моделью

$$\bar{y} = c_1 \bar{v}_1 + c_2 \bar{v}_2 + c_3 \bar{v}_3$$

с вычисляемыми осреднёнными состояниями

$$\bar{y} = \sum_{k \in K_1} y(k) / N_1, \quad \bar{v}_i = \sum_{k \in K_1} v_i(k) / N_1, \quad i \in \{1, 2, 3\}.$$

В условиях  $v_1(k) > 0$ ,  $k \in K_1 \cup K_2$  справедливо преобразование с переходом от (24) к модели и алгоритму меньшей размерности вида

$$y_Z(k) = \mathbf{c}_Z^T \mathbf{z}(k), \quad F_Z \cdot \hat{\mathbf{c}}_Z = \mathbf{b}_Z,$$

$$\hat{\mathbf{c}}_1 = (\bar{y} - \hat{c}_2 \bar{v}_2 + \hat{c}_3 \bar{v}_3) / \bar{v}_1, \quad \hat{\mathbf{c}}_Z = [\hat{c}_2 \hat{c}_3]^T,$$

где

$$F_Z = \sum_{k \in K_2} \mu(k) \mathbf{z}(k) \mathbf{z}(k)^T,$$

$$\mathbf{b}_Z = \sum_{k \in K_2} \mu(k) \mathbf{z}(k) y_Z(k), \quad \mu(k) = 1 / N_2 - N_1,$$

а выход и регрессоры укороченной модели удовлетворяют условиям

$$y_Z(k) = \frac{y(k)}{v_1(k)} - \frac{\bar{y}}{\bar{v}_1}, \quad \mathbf{z}(k) = \begin{bmatrix} v_2(k) - \bar{v}_2 & v_3(k) - \bar{v}_3 \\ v_1(k) - \bar{v}_1 & v_1(k) - \bar{v}_1 \end{bmatrix}^T.$$

Именно данная схема редукции была использована для реконструкции процедур оценивания подъёмника (12) и притока (22).

На рис. 2 вынесены типовые графики стационарного и последующих частотно возмущенных режимов работы системы с наложенной помехой измерений для ключевых состояний  $p(3,k)$  – давления у приёма и  $q_L(k)$  – объёмного расхода на устье. Отдельно на рис. 2 вынесены укрупнённые фрагменты исходных графиков, дополненные для сравнения кривыми результатов выходов наблюдателя, настроенного по результатам идентификации.

В серии из двадцати статистических реализаций наложенных помех измерений отдельно для трёх вариантов реализаций гидродинамики фильтра (23) с параметрами  $T(2) = \{0,3; 0,4; 0,5\}$  (истинное значение  $T(2) = 0,4$ ) сигнальная ошибка наблюдения на возмущённых режимах работы модели в среднем по всем экспериментам и сигналам не превышала 2 %. Осреднённые данные результатов работы алгоритмов оценивания параметров подъёмника и притока сведены в табл. 2 и иллюстрируются диаграммами на рис. 3.

Сравнительный анализ результатов параметрического оценивания свидетельствует, что относительная ошибка идентификации параметров деформации напорной характеристики насоса  $\delta v_i$  и  $v_h$  в среднем не превышает 4 и 6 %, в то время как ошибка идентифи-

кации суммарного гидросопротивления подъёмника  $r_1$  может доходить до 100 %. При этом точность воспроизведения сигнальных процессов (рис. 2) на выходе наблюдателя не выходит за уровень в 2 %. Подобная неравномерность ошибки оценивания имеет место и для параметров притока. Так, для давления

пласта –  $p_R$  и гидросопротивления –  $r(1)$  ближней зоны притока ошибки идентификации во всех модельных экспериментах не превышают 2 и 5 %. В то время как ошибка по  $r(2)$  доходит до 30 %, что, опять-таки, не нарушает хорошую сходимость воспроизведения гидродинамики притока.

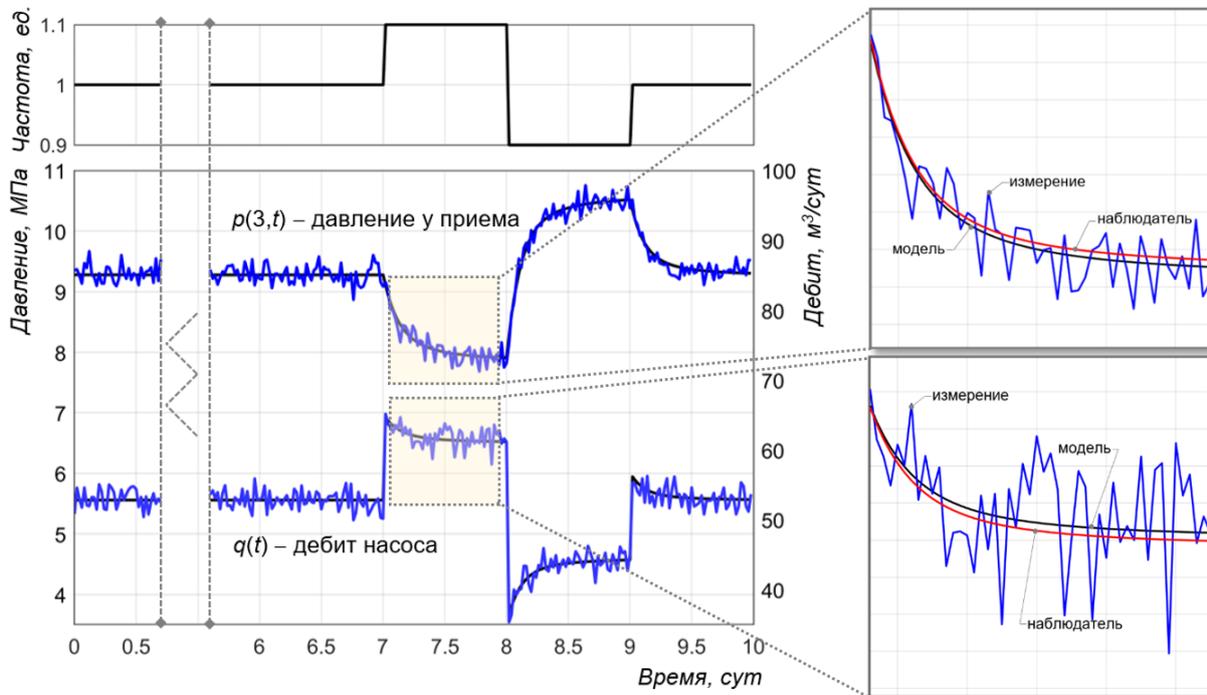


Рис. 2. Графики возмущённых переменных состояний моделирования скважины и тестовые «измерения» после наложения помехи максимальной амплитуды

Fig. 2. Well model perturbed variable states and test «measurements» with maximum amplitude noise

Таблица 2. Статистика результатов работы алгоритма идентификации параметров скважины по данным модельных экспериментов

Table 2. Statistics of the well parameters identification algorithm results on model experiments data

Описание эксперимента Experiment definition	Схема идентификации подъёмника Lift identification scheme						Схема идентификации притока Inflow identification scheme					
	Параметр Parameter			Ошибка оценивания, % Estimation error			Параметр Parameter			Ошибка оценивания, % Estimation error		
	$r_1$	$\delta v$	$v_h$	$r_1$	$\delta v$	$v_h$	$p_r$	$r(1)$	$r(2)$	$p_r$	$r(1)$	$r(2)$
Исходные параметры Initial parameters	2,84	1,125	0,9	–	–	–	22	0,1	0,025	–	–	–
Идентификация без помехи и фильтра Identification without noise and filter	2,839	1,125	0,899	0,002	0,005	0,001	21,96	0,098	0,025	0,15	1,2	2,05
Идентификация без помехи с фильтром Identification without noise and with filter	2,45	1,121	0,892	13,7	0,4	0,82	22,96	0,107	0,023	0,17	1,3	5
Идентификация с помехой и фильтром (среднее значение при $T(2)=0,3$ ) Identification with noise and filter (average for $T(2)=0,3$ )	1,28	1,11	0,87	76,1	3,5	4,9	21,87	0,10	0,03	0,7	3,0	16,3
Идентификация с помехой и фильтром (среднее значение при $T(2)=0,4$ ) Identification with noise and filter (average for $T(2)=0,4$ )	0,93	1,10	0,86	80,3	2,8	4,4	21,99	0,10	0,03	0,8	2,4	17,7
Идентификация с помехой и фильтром (среднее значение при $T(2)=0,5$ ) Identification with noise and filter (average for $T(2)=0,5$ )	1,39	1,11	0,87	99,7	4,0	5,1	22,12	0,10	0,02	1,0	3,5	16,8

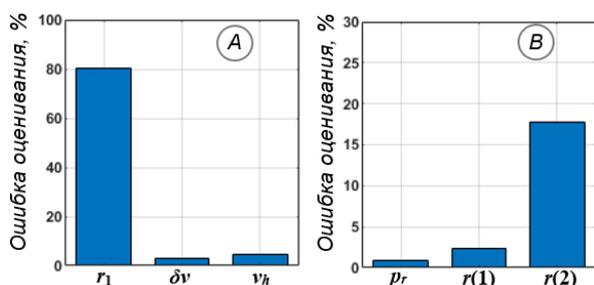


Рис. 3. Диаграммы средних ошибок оценивания параметров подъемника (А) и притока (В)

Fig. 3. Diagrams of average errors in estimating elevator (A) and inflow (B) model parameters

Для проверки работы системы по натурным измерениям использовалась выгрузка данных глубинного контроля давления у приёма со станции управления ЭЦН на незавершённом пуско-остановочном режиме работы скважины одного из месторождений Ноябрьского региона. Исходная информация по скважине и устьевым измерениям сведена в табл. 3 и представлена графиками на рис. 4. Нормированная напорная характеристика насоса, используемая при расчете наблюдателя в схеме идентификации притока, соответствует типовой из [6].

Таблица 3. Параметры модели, результаты ГДИС и идентификации

Table 3. Model parameters, test and identification results

Параметр/Parameter	Конструкция скважины/Well structure					Параметры флюида/Fluid parameters				
	$H_R$	$S_N$	$S_T$	$H_N$	$h^0$	$q^0$	$\gamma_o$	$\gamma_w$	$\beta$	$G$
Единицы измерения/Units	м m	$m^2$ $m^2$		м m		$m^3/сут$ $m^3/day$	МПа/м MPa/m		ед. units	
Значение/Value	2102	0,0042	0,056	1569	1670	200	$0,81 \cdot 10^{-2}$	$1,09 \cdot 10^{-2}$	0,07	13
Параметр/Parameter	Результаты ГДИС Inflow test results			Расчетные параметры Calculated parameters		Результаты идентификации Identification results				
	$p_R$	$w_R$		$T(2)$	$r_1$	$p_R$	$w(1)$	$w(2)$	$w_R$	
Единицы измерения/Units	МПа MPa	$m^3/(MPa \cdot сут)$ $m^3/(MPa \cdot day)$		сут day	$сут/m^2$ $day/m^2$	МПа MPa	$m^3/(MPa \cdot сут)$ $m^3/(MPa \cdot day)$			
Значение/Value	13,3	31		2	1	13,09	38,5	108	28,4	

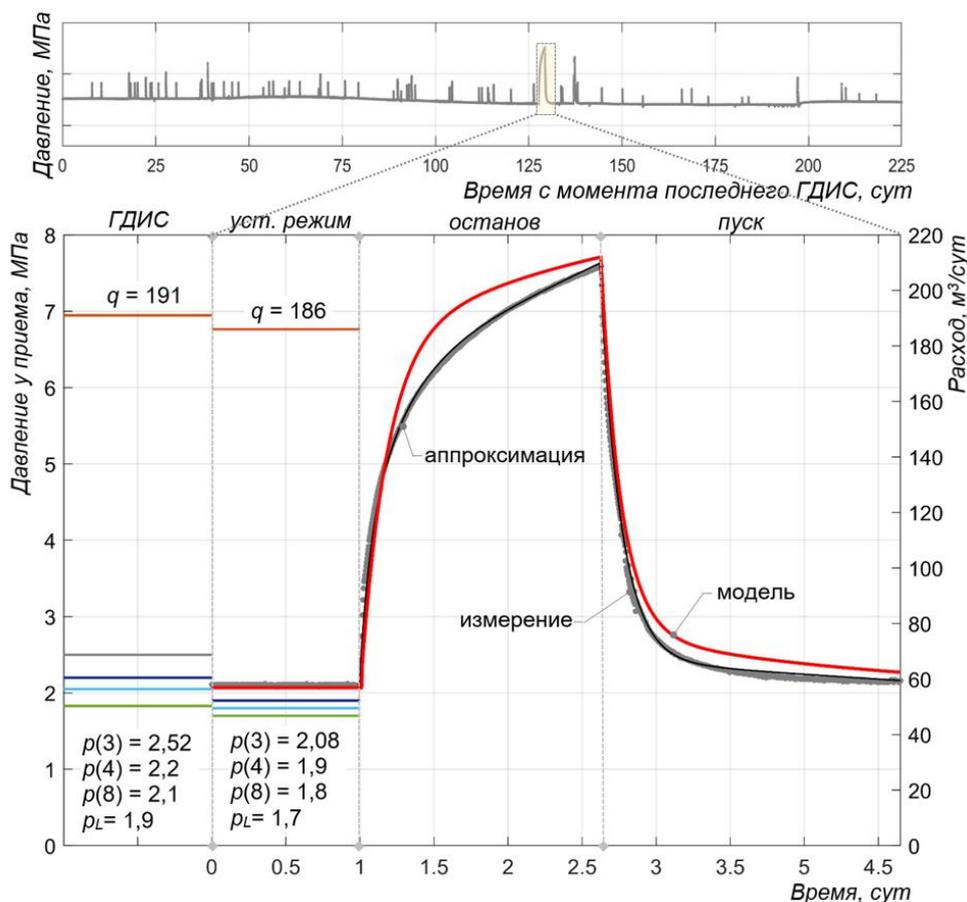


Рис. 4. Графики измерения давлений у приёма насоса при останове и повторном запуске, их аппроксимации и результаты моделирования, а также среднесуточные данные о равновесных устьевых давлениях и расходах перед ГДИС и анализируемым переходным процессом

Fig. 4. Pump intake pressure charts during stop and consecutive start, their approximations and model results and daily average data of steady intake pressures and rates before well test and analyzed transient process

Как видно из графика, шумы измерений незначительны, поэтому аппроксимация графика точечных измерений давления у приёма насоса непрерывной функцией использовалась для аналитического расчёта производной сигнала  $p(3,k)$  для оценки  $q(k)$  (20), с постоянным среднесуточным уровнем давления  $p(4)$ . Результат МНК идентификации по правилу (19)–(23) указывают, что ошибка параметрического оценивания относительно данных ГДИС (пластовое давление и коэффициент продуктивности) лежит в пределах 5 %, а сигнальная ошибка по графику  $p(3,k)$  не превышает 6 %, что приемлемо для задач диспетчерского контроля режимных условий эксплуатации системы.

#### Выводы

1. Рассмотренный регламент идентификации, ориентированный на задачи управления процессами эксплуатации скважин с ЭЦН, позволяет на регулярной основе отслеживать возможные дрейфы параметров подъёмника и притока, классифицируя тем самым первопричины нарушений режимных состояний работы оборудования и плановых показателей добычи.
2. Корректная работа алгоритма в условиях непрерывной эксплуатации скважины во многом обеспечивается следующими обстоятельствами:
  - наличием точки глубинного контроля давления  $p(3,k)$  у приёма насоса, позволяющей деконструировать комплексную задачу идентификации с плохо различимыми вариациями контролируемых устьевых состояний на две задачи меньшей размерности с информативным сигналом  $p(3,k)$  и более высокими факторами надёжности МНК оценок;
  - введением процедуры пробных частотных возмущений, обеспечивающих повышенный уровень информативности данных контроля состояний на переходных режимах, без останова ЭЦН. Точечный контроль на интервалах пробных возмущений позволяет отслеживать дрейфы параметров модели с заданной периодичностью или по запросу оператора, что более практично в задачах реального времени, чем в классических пуско-остановочных регламентах контроля [35];
  - предварительной фильтрацией зашумленных данных первичного контроля путём аппроксимации их гладкими кривыми, что позволяет корректно восстанавливать исходные сигналы и их производные, сокращая уровни относительных ошибок оценивания;

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Proactive utilization of ESP performance monitoring to enhance productivity / Hashim Al-Sadah, Mohammad Abo Khamseen, Abdullah Al-Ghamdi, Ali Fardan // SPE middle east oil and gas show and conference. – Bahrain, 2019. URL: <https://doi.org/10.2118/194925-MS>
2. Rapid and comprehensive artificial lift systems performance analysis through data analytics, diagnostics and solution evaluation / Lichi Deng, Ehsan Davani, Hamed Darabi, Vural Sander Suicmez, David Castineira // SPE middle east artificial conference and

- приемами регуляризации на основе осреднения данных стационарных состояний регрессоров, восстановленных по равновесному состоянию системы до периода пробных возмущений.
3. Проведенные исследования, выявленные проблемные точки конструирования и корректного оценивания свидетельствуют, что рассмотренный вариант решения задачи идентификации, наблюдаемая неравномерная точность оценивания параметров подъёмника и притока никак не закрывают проблему автоматического сопровождения модели скважин с ЭЦН в условиях реальной эксплуатации. Однако требование к точности идентификации параметра  $r_1$  подъёмника следует соотносить с условиями инициализации мероприятий по очистке НКТ от сорбентов, когда наблюдаемая производительность системы  $q_L(k)$  заметно снижается на десять и более процентов. Причины таких последствий система идентификации опознаёт более надёжно.

Типовые правила ГДИС оценивают два главных показателя: подпор пласта на контуре питания –  $p_R$  и суммарное гидросопротивление притока –  $r_R=r(1)+r(2)$ , связанное с коэффициентом продуктивности скважины условием  $w_R=1/r_R$ . Согласно статистике машинных испытаний (табл. 2), средняя относительная ошибка оценивания параметра  $r_R$  в нашем случае не превышает 4 %.

#### Выводы по результатам натуральных измерений

1. Динамика давлений для скважины с ЭЦН заметно отличается на пуске и останове, что связано с наличием в системе нелинейного звена – насоса с особым режимом импульсной откачки из затрубья в момент пуска.
2. Рассмотренная схема оценивания учитывает данную особенность и позволяет решать задачу идентификации притока в условиях пусков и остановов и при скачкообразных возмущениях частоты.
3. Предпринятая аппроксимация динамики призабойной зоны моделью первого порядка оказывается грубой для «хорошего» воспроизведения реальных переходных режимов притока, что на незавершённых процессах [17] может приводить к смещению оценок пары  $\langle p_R, w_R \rangle$ . Относительно данных ГДИС ошибка оценивания по указанным параметрам в приведённом анализе лежит в пределах 5 %, что приемлемо для задач оперативного контроля причин отклонений технологического режима от плана, но критично для задач с горизонтами длительного прогнозирования.

exhibition, – Bahrain, 2018. URL: <https://doi.org/10.2118/192460-MS> (дата обращения 10.12.2019).

3. Mriganga Das, Zaid Hayat Bin Naharuddin, Dhuha Al-Khalid. Optimizing production and operation through automated well and network modeling // SPE Kuwait oil and gas show and conference. – Kuwait, 2015. URL: <https://doi.org/10.2118/175205-MS> (дата обращения 10.12.2019).
4. Reda El Mahbes, Wilfried Manfoumbi, Benedicte Kadio-Morokro. Real-time remote monitoring to enhance electrical submersible

5. Gabor Takacs. Three inventions shaping the future of ESP technology // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2019. – V. 182. URL: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106330> (дата обращения 10.12.2019).
6. Модель переходных процессов в скважине с частотно-регулируемым электроцентробежным насосом / И.Г. Соловьев, Д.А. Говорков, С.С. Белашевский, Ю.А. Ведерникова // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 1. – С. 110–120. URL: <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/1/55> (дата обращения 10.12.2019).
7. A review paper on the application of deconvolution technique in well test analysis: Tal Block Pakistan case study / Muhammad Tauqeer, Safwan Arshad, Zaheer Ahmed, Jawad Ahmed // *SPE/PAPG Pakistan section annual technical conference and exhibition*. – Pakistan, 2017. <https://doi.org/10.2118/191279-MS>
8. Optimal control of field development in a closed loop / E.S. Zakirov, S.N. Zakirov, I.M. Indrupskiy, O.V. Lyubimova, D.P. Anikeev, I.M. Shiryaev, M.N. Baganova // *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. – Russia, 2015. URL: <https://doi.org/10.2118/176642-MS> (дата обращения 10.12.2019).
9. ESP-DST well testing in a complex reservoir in the Barents Sea: establishing new methodologies and lessons learned / De Leonardis D., Y. Shumakov, K.L. Morton, S. Sarac // *SPE Bergen one day seminar*. – Bergen, 2017. URL: <https://doi.org/10.2118/185892-MS> (дата обращения 10.12.2019).
10. Альберт А. Регрессия, псевдоинверсия и рекуррентное оценивание. – М.: Наука, 1977. – 224 с.
11. Robust identification and feedback design: an active noise control case study / R.S. Sánchez Peña, M.A., Cugueró, A. Masip, J. Quevedo, V. Puig // *Control Engineering Practice*. – 2008. – V. 16. – Iss. 11. – P. 1265–1274.
12. Valuable improvements of data preparation and controlling operational regime practices at mature field as a basic part of a smart field concept usage case study / D. Kyrmaev, V. Fomin, A. Maslanov, V. Karпов, A. Amirov, D. Sleptsov, I. Batilov, K. Ratanov, A. Kozhin, A. Klemba, A. Rybalko, M. Guletzkiy // *Offshore technology conference Asia*. – Kuala Lumpur, 2018. URL: <https://doi.org/10.4043/28293-MS> (дата обращения 10.12.2019).
13. Автоматизация сбора и подготовки данных (в)ТМС для проведения гидродинамических исследований скважин с использованием «виртуального расходомера» / А.А. Пашали, М.А. Александров, А.Г. Климентьев, И.Р. Ямалов, А.С. Топольников, А.В. Жонин, А.В. Колонских, В.Г. Михайлов // *Нефтяное хозяйство*. – 2016. – № 11. – С. 60–63.
14. Ипатов А.И., Кременецкий М.И. Геофизический и гидродинамический контроль разработки месторождений углеводородов. – М.: НИЦ «Регулярная и хаотичная динамика», 2006. – 780 с.
15. Соловьев И.Г. Структурно-функциональный анализ системы оптимального управления для осложнённого фонда скважин с ЭЦН // *НТЖ «Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности»*. – 2019. – № 8. – С. 14–19.
16. Вычислительный анализ режимов эксплуатации скважины с ЭЦН в условиях действия газового фактора / С.С. Белашевский, Д.А. Говорков, Д.В. Житов, И.Г. Соловьев // *Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности*. – 2018. – № 8. – С. 26–30.
17. Сергеев В.Л., Нгуен Т.Х.Ф. Модели и алгоритмы адаптивной интерпретации результатов комбинированных газогидродинамических исследований интеллектуальных скважин // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 10. – С. 67–75.
18. Каталог погружного оборудования УЭЦН TPS-Line (REDA). [https://www.slb.ru/upload/iblock/8c4/tps\\_line\\_esp-booklet\\_rus.pdf](https://www.slb.ru/upload/iblock/8c4/tps_line_esp-booklet_rus.pdf)
19. Технический каталог. Погружное оборудование для добычи нефти и комплексный сервис. URL: <https://www.rimera.com/upload/catalog/pdf/Alnas-rus.pdf> (дата обращения: 03.10.2019).
20. Подземная гидравлика / К.С. Басниев, А.М. Власов, И.Н. Кочина, В.М. Максимов. – М.: Недра, 1986. – 303 с.
21. Настрин Л.А. Системы экстремального управления. – М.: Наука. Физматлит, 1974. – 632 с.
22. Брилл Дж., Мукерджи Х. Многофазный поток в скважинах. – М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2006. – 384 с.
23. Пао С.Р. Линейные статистические методы и их применения. – М.: Наука. Физматлит, 1968. – 548 с.
24. Соловьев И.Г., Говорков Д.А. Факторы устойчивости МНК-оценок параметров модели притока вертикальной скважины // *НТЖ Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности*. – 2009. – № 9. – С. 31–36.
25. Андреев Ю.Н. Управление линейными конечномерными объектами. – М.: Наука. Физматлит, 1976. – 424 с.
26. Павлов Б.В., Соловьев И.Г. Системы прямого адаптивного управления. – М.: Наука, 1989. – 136 с.
27. Luenberger D.G. An introduction to observers // *IEEE Transactions on Automatic Control*. – 1971. – V. 16 – P. 596–602.
28. Коровин С.К., Фомичёв В.В. Наблюдатели состояния для линейных систем с неопределённостью. – М.: Наука. Физматлит, 2007. – 224 с.
29. Fomin V., Solovyev I. Adaptive observer design for hydrodynamic states of an oil-well // *Proceeding of CSCS*. – Bucharest, 2011. – P. 286–289.
30. Nikolov N.N., Lukov V.Y., Alexandrova M.I. Discrete adaptive real-time state observer development using least-squares method // *XXVI International Scientific Conference Electronics*. – Sozopol, 2017. – P. 1–4.
31. MATLAB – высокоуровневый язык технических расчетов. URL: <https://matlab.ru/products/matlab> (дата обращения: 03.10.2019)
32. Катковник В.Я. Непараметрическая идентификация и сглаживание данных. – М.: Наука. Физматлит, 1985. – 336 с.
33. Залоруйко Н.Г. Прикладные методы анализа данных и знаний. – Новосибирск: Изд-во Ин-та математики, 1999. – 270 с.
34. Schoukens J., Rolain Y., Pintelon R. On the use of parametric and non-parametric noise-models in time- and frequency domain system identification // *49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*. – Atlanta, 2010. – P. 316–321.
35. Сергеев В.Л., Донг Ван Хоанг, Фам Динь Ан. Адаптивная интерпретация результатов гидродинамических исследований горизонтальных скважин на прогнозирующих моделях // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 1. – С. 165–172.

Поступила 05.05.2020 г.

#### Информация об авторах

**Соловьев И.Г.**, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Тюменский научный центр СО РАН; доцент, Тюменский индустриальный университет.

**Говорков Д.А.**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Тюменский научный центр СО РАН; доцент, Тюменский индустриальный университет.

**Цибульский В.Р.**, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Тюменский научный центр СО РАН.

UDC 622.279:681.5

## IDENTIFICATION OF A WELL HYDRODYNAMIC MODEL WITH AN ELECTRIC SUBMERSIBLE PUMP USING THE PERTURBED OPERATION MODES CONTROL DATA

Ilya G. Solovyev<sup>1,2</sup>,  
solovyev@ikz.ru

Denis A. Govorkov<sup>1,2</sup>,  
dagovorkov@mail.ru

Vladimir R. Tsibulsky<sup>1</sup>,  
v-tsib@yandex.ru

<sup>1</sup> Tyumen Scientific Centre SB RAS,  
86, Malygin street, Tyumen, 625000, Russia.

<sup>2</sup> Tyumen Industrial University,  
38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russia.

**The relevance** of the research is associated with the problems of creating and maintaining dynamic models of electrical submerged pump-equipped well as a part of operational monitoring and control systems under conditions of the elevator and inflow parameters deviation. Assessment of the root causes of well desired operating mode violation and the forecast of the immediate negative consequences are important for balanced (optimal) decisions on operational modes correction and ensuring stable operating conditions.

**The main aim** of the research is to develop the least-squares algorithm – estimating the drift parameters of the elevator including the electrical submerged pump and the inflow of a dynamic well model and methods for stabilizing these estimates in real-time operations based on noisy measurements data.

**Methods:** numerical integration of nonlinear differential equations, regression least-squares analysis methods, statistical computational tests, test perturbations, methods of regularizing estimation algorithms.

**Results.** The authors have developed the two-stage algorithm for estimating the drift parameters of the elevator (wear, impurities) and inflow (productivity and reservoir parameters) to simplify the presentation of a complex dynamic model «inflow–elevator–electrical submerged pump–wellhead» according to two speed scales for monitoring the operating conditions of the system with inflow dynamics observer under conditions of test frequency disturbances.

**Summary.** The proposed rules for stabilizing the model parameters estimates based on the generation of test perturbations, reducing dimension by decomposing the complex model into composite blocks, filtering noisy measurement signals by approximation, implementing a dynamic inflow observer form the basis for identification algorithm design with reliable estimation of the main group of deformation parameters of pump pressure-head characteristics and inflow. Despite the low accuracy of the elevator hydraulic resistance identification, the error in reproducing the dynamics of the variable states of the system in disturbed operating modes from the observer outputs does not exceed 2 %, which indicates the low sensitivity of the standard operating modes of the elevator to the desired parameter setting within the framework of the model solutions used. The required accuracy of the pipe hydraulic resistance identification should be consistent with the conditions for the periodic cleaning of the lift from sorbents.

### Key words:

Well, electric centrifugal pump, complicating factors, decomposition, regularization, assessment, identification, least squares method, observers, state filters, test disturbances.

### REFERENCES

1. Hashim Al-Sadah, Mohannad Abo Khamseen, Abdullah Al-Ghamdi, Ali Fardan. Proactive utilization of ESP performance monitoring to enhance productivity. *SPE middle east oil and gas show and conference*. Bahrain, 2019. Available at: <https://doi.org/10.2118/194925-MS> (accessed 10 December 2019).
2. Lichi Deng, Ehsan Davani, Hamed Darabi, Vural Sander Suicmez, David Castineira. Rapid and comprehensive artificial lift systems performance analysis through data analytics, diagnostics and solution evaluation. *SPE middle east artificial conference and exhibition*. Bahrain, 2018. Available at: <https://doi.org/10.2118/192460-MS> (accessed 10 December 2019).
3. Mriganga Das, Zaid Hayat Bin Naharuddin, Dhuha Al-Khalid. Optimizing production and operation through automated well and network modeling. *SPE Kuwait oil and gas show and conference*. Kuwait, 2015. Available at: <https://doi.org/10.2118/175205-MS> (accessed 10 December 2019).
4. Reda El Mahbes, Wilfried Manfoumbi, Benedicte Kadio-Morokro. Real-time remote monitoring to enhance electrical submersible pump system run life and maximize production. *SPE middle east artificial lift conference and exhibition*. Bahrain, 2018. Available at: <https://doi.org/10.2118/192470-MS> (accessed 10 December 2019).
5. Gabor Takacs. Three inventions shaping the future of ESP technology. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 182. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106330> (accessed 10 December 2019).
6. Solovyev I.G., Govorkov D.A., Belashevsky S.S., Vedernikova U.A. Transient processes model of well with frequency-regulated ESP. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2019. vol. 330. No 1. pp. 110–120. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/1/55> (accessed 10 December 2019).
7. Muhammad Tauqeer, Safwan Arshad, Zaheer Ahmed, Jawad Ahmed. A review paper on the application of deconvolution technique in well test analysis: Tal Block Pakistan case study. *SPE/PAPG Pakistan section annual technical conference and exhibition*. Pakistan, 2017. Available at: <https://doi.org/10.2118/191279-MS> (accessed 10 December 2019).
8. Zakirov E.S., Zakirov S.N., Indrupskiy, I.M. Lyubimova O.V., Anikeev D.P., Shiryayev I.M., Baganova M.N. Optimal Control of Field Development in a Closed Loop. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Moscow, 2015. Available at: <https://doi.org/10.2118/176642-MS> (accessed 10 December 2019).
9. De Leonardis D., Shumakov Y., Morton K.L., Sarac S. ESP-DST well testing in a complex reservoir in the Barents Sea: establishing

- new methodologies and lessons learned. *SPE Bergen one day seminar*. Bergen, Norway, 5 April 2017. Available at: <https://doi.org/10.2118/185892-MS> (accessed 10 December 2019).
10. Albert A. *Regressiya, psevdoinversiya i rekurrentnoe otsenivanie* [Regression, pseudo-inversion and recurrence estimation]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 224 p.
  11. Sánchez Peña R.S., Cugueró M.A., Masip A., Quevedo J., Puig V. Robust identification and feedback design: An active noise control case study. *Control Engineering Practice*. 2008, vol. 16, Iss. 11, pp. 1265–1274.
  12. Kyrnaev D., Fomin V., Maslanov A., Karpov V., Amirov A., Sleptsov D., Batilov I., Ratanov K., Kozhin A., Klemba A., Rybalko A., Guletskiy M. Valuable improvements of data preparation and controlling operational regime practices at mature field as a basic part of a smart field concept usage case study. *Offshore technology conference Asia*. Kuala Lumpur, 2018. Available at: <https://doi.org/10.4043/28293-MS> (accessed 10 December 2019).
  13. Pashali A.A., Aleksandrov M.A., Klimentev A.G., Yamalov I.R., Topolnikov A.S., Zhonin A.V., Kolonskih A.V., Mikhaylov V.G. Automatization of collecting and preparation of telemetry data for well testing using «virtual flowmeter». *Oil industry*, 2016, no. 11, pp. 60–63. In Rus.
  14. Ipatov A.I., Kremenetskiy M.I. *Geofizicheskiy i gidrodinamicheskiy kontrol razrabotki mestorozhdeniy uglevodorodov* [Geophysical and hydrodynamic control of hydrocarbon field development]. Moscow, Regulynarnaya i khaotichnaya dinamika Publ., 2006. 780 p.
  15. Solovyev I.G. Structural-functional analysis of the optimal control system for complicated fund of wells with ESP. *Scientific-Technical Journal «Automation, telemechanization and communication in oil industry*, 2019, no. 8, pp. 14–19. In Rus.
  16. Belashevskiy S.S., Govorkov D.A., Solovyev I.G. Periodical service regulation of complicated wells. *Scientific-Technical Journal «Automation, telemechanization and communication in oil industry*, 2018, no. 1, pp. 21–26. In Rus.
  17. Sergeev V.L., Phuong T.H. Nguyen. Models and algorithms for adaptive interpretation of combined well test data of intelligent wells. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 10, pp. 67–75. In Rus.
  18. *Katalog pogruzhnogo oborudovaniya UECN TPS-Line (REDA)* [Catalog of submersible equipment of ESP]. Available at: [https://www.slb.ru/upload/iblock/8c4/tps\\_line\\_esp-booklet\\_rus.pdf](https://www.slb.ru/upload/iblock/8c4/tps_line_esp-booklet_rus.pdf) (accessed 10 December 2019).
  19. *Tekhnicheskiy katalog. Pogruzhnoe oborudovanie dlya dobychi nefiti i kompleksny servis* [Technical catalog. Submersible equipment for oil production and comprehensive service.] Available at: <https://www.rimera.com/upload/catalog/pdf/Alnas-rus.pdf> (accessed 3 October 2019).
  20. Basniev K.S., Vlasov A.M., Kochina I.N., Maksimov V.M. *Podzemnaya gidravlika* [Underground hydraulics]. Moscow, Nedra Publ., 1986. 303 p.
  21. Rastrigin L.A. *Sistemy ekstremalnogo upravleniya* [Extreme control systems]. Moscow, Nauka Fizmatlit Publ., 1974. 632 p.
  22. Brill Dzh., Mukerdzhi Kh. *Mnogofazny potok v skvazhinakh* [Multiphase flow in wells]. Moscow; Izhevsk, Computer research institute Publ., 2006. 384 p.
  23. Rao S.R. *Lineynye statisticheskie metody i ikh primeneniya* [Linear statistical methods and their applications]. Moscow, Nauka. Fizmatlit. Publ., 1968. 548 p.
  24. Solovyev I.G., Govorkov D.A. Least-square estimations of oil well inflow characteristics: factors of stability. *Scientific-Technical Journal «Automation, telemechanization and communication in oil industry*, 2009, no. 9, pp. 31–36. In Rus.
  25. Andreev Yu.N. *Upravlenie lineynymi konechnomernymi obyektami* [Management of linear finite-dimensional object]. Moscow, Nauka. Fizmatlit. Publ., 1976. 424 p.
  26. Pavlov B.V., Solovyov I.G. *Sistemy pryamogo adaptivnogo upravleniya* [Direct adaptive control systems]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 136 p.
  27. Luenberger D.G. An introduction to observers. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1971, Vol. 16, pp. 596–602.
  28. Korovin S.K., Fomichov V.V. *Nablyudateli sostoyaniya dlya lineynkh sistem s neopredelennostyu* [State observer for linear systems with uncertainty]. Moscow, Nauka. Fizmatlit. Publ., 2007. 224 p.
  29. Fomin V., Solovyev I. Adaptive observer design for hydrodynamic states of an oil-well. *Proceeding of CSCS -18*. Bucharest, 2011. pp. 286–289.
  30. Nikolov N.N., Lukov V.Y., Alexandrova M.I. Discrete adaptive real-time state observer development using least-squares method. *XXVI International Scientific Conference Electronics*. Sozopol, 2017. pp. 1–4.
  31. *MATLAB*. Available at: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (accessed 3 October 2019).
  32. Katkovnik V.Ya. *Neparametricheskaya identifikatsiya i sgla-zhivanie dannykh* [Nonparametric identification and data smoothing.]. Moscow, Nauka. Fizmatlit. Publ., 1985. 336 p.
  33. Zaloruyko N.G. *Prikladnye metody analiza dannykh i znaniy* [Applied methods of data and knowledge analysis.]. Novosibirsk, Mathematics Institute Publ., 1999. 270 p.
  34. Schoukens J., Rolain Y., Pintelon R. On the use of parametric and non-parametric noise-models in time- and frequency domain system identification. *49<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*. Atlanta, 2010. pp. 316–321.
  35. Sergeev V.L., Dong Van Hoang, Pham Dinh An. Adaptive interpretation of the results of horizontal well production testing using forecasting models. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 1, pp. 165–172.

Received: 5 May 2020.

#### Information about the authors

**Ilya G. Solovyev**, senior researcher, Tyumen Scientific Centre SB RAS; associate professor, Tyumen Industrial University.

**Denis A. Govorkov**, senior researcher, Tyumen Scientific Centre SB RAS; associate professor, Tyumen Industrial University.

**Vladimir R. Tsubulsky**, lead researcher Tyumen Scientific Centre SB RAS.

УДК 532.546:536.421

## ЭВОЛЮЦИЯ НЕФТЕГАЗОВОЙ СТРУИ, ИСТЕКАЮЩЕЙ ЧЕРЕЗ РАЗРЫВ МАГИСТРАЛЬНОГО НЕФТЕПРОВОДА (ГАЗОПРОВОДА), РАСПОЛОЖЕННОГО НА ДНЕ ВОДОЕМА

Кильдибаева Светлана Рустамовна<sup>1</sup>,  
freya.13@mail.ru

Гималтдинов Ильяс Кадинович<sup>2,3</sup>,  
iljas\_g@mail.ru

<sup>1</sup> Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета,  
Россия, 453103, г. Стерлитамак, пр. Ленина, 49.

<sup>2</sup> Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Россия, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

<sup>3</sup> Академия наук Республики Башкортостан,  
Россия, 450008, г. Уфа, ул. Кирова, 15.

**Актуальность** исследования связана с растущим интересом к добыче углеводородов на дне Мирового океана. При этом многократно увеличивается опасность аварийного разлива нефтепродуктов в воду. Разливы нефти на платформах Ixtoc-1 и Deepwater Horizon в Мексиканском заливе продемонстрировали неготовность современных методов к быстрой ликвидации аварийных утечек. В связи с этим существует необходимость в исследовании затопленных струй, состоящих из смеси углеводородов (нефти и газа). Кроме этого, при глубоководных разливах многофазной смеси нефти и попутных газов могут образовываться кристаллогидраты, которые могут влиять на динамику распространения этих выбросов. Поэтому изучение динамики распространения струи с учетом гидратообразования позволит сократить время ликвидации возможных утечек. В данной работе рассматривается математическая модель формирования затопленной многофазной струи с учетом гидратообразования при различных начальных условиях.

**Цель:** исследовать формирование затопленной струи в зависимости от начальных условий.

**Объекты:** многофазная струя углеводородов; компоненты струи: нефть, газ, вода; композитные пузырьки, покрытые гидратной оболочкой; характер распространения струйного течения, процесс гидратообразования.

**Методы.** Для описания процесса распространения затопленной струи используется интегральный Лагранжевый метод контрольного объема, согласно которому струя представляется в виде последовательности элементарных объемов, каждый из которых характеризуется линейными размерами и теплофизическими характеристиками. Распространение затопленной струи рассматривается для глубоководных разливов на дне океана, что соответствует случаю, когда на поверхности пузырьки начинают образовываться гидратные оболочки и газовый пузырек превращается в гидратный. Для описания процесса гидратообразования в работе принята предельная схема, согласно которой гидратообразование лимитируется диффузией газа через гидратную оболочку.

**Результаты.** Дополнена математическая модель течения многофазной затопленной струи с учетом образования гидрата на поверхности пузырьков. Получены зависимости теплофизических характеристик затопленной струи от вертикальной координаты, траектория распространения струи. Для пузырьков метана, которые покрываются гидратной оболочкой, применено уравнение состояния для реальных газов. В результате расчетов получены зависимости радиусов газовой и гидратной составляющих композитного пузырька и его плотности от вертикальной координаты. Установлено, что радиус гидратной составляющей пузырька убывает для случая, когда поведение газа описывается уравнением состояния для идеального газа, и растет для случая применения уравнения состояния для реального газа.

### Ключевые слова:

Затопленная струя, многофазная струя, гидрат, метан, нефть, разлив углеводородов, нефть, метод контрольного объема, уравнение состояния газа.

### Введение

В связи с уменьшением объемов добычи углеводородов, разработка которых может производиться традиционным образом, увеличивается интерес исследователей к новым способам добычи, разведки и оценки запасов природных ресурсов [1, 2]. Интенсивная разработка нефтяных и газовых месторождений на шельфе может приводить к экологическим катастрофам. Нефтяные разливы в Мексиканском заливе на нефтедобывающих платформах Ixtoc-1 и Deepwater Horizon относят к наиболее крупным разливам нефти за всю историю [3, 4]. Такого рода разливы представляют серьезную проблему в связи с увеличением объемов добычи нефти из недр Мирового океана,

а также отсутствием быстрого и качественного способа устранения утечки. Помимо разработки способа локализации разлива нефти также немаловажную роль играет исследование особенностей распространения углеводородов, течение которых происходит в виде затопленной струи [5–11]. При совместном течении нефти и газа из скважины будем говорить о многофазных затопленных струях, а в случае, когда из источника поступают только нефть или газ, – об однофазных затопленных струях.

Если затопленная струя, содержащая газ, распространяется при высоких давлениях и низких температурах, то на поверхности пузырьков газа могут образовываться гидратные оболочки. Таким образом,

вследствие процесса гидратообразования пузырек может быть газовым, композитным (газовое ядро и гидратная оболочка) или полностью гидратным. При получении исчерпывающих сведений относительно распространения затопленных струй можно сократить время и увеличить качество устранения разлива. Одним из наиболее перспективных способов устранения утечки является установка купола, предназначенного для сбора и накопления углеводородов с целью их дальнейшего промышленного использования [12, 13].

В работе рассмотрим струйные течения, распространение которых происходит в условиях стабильного существования гидрата. По всей глубине распространения струи термобарические условия окружающей среды соответствуют условиям гидратообразования, но не разложения уже образованного гидрата.

#### Постановка задачи

Для моделирования течения струи используем интегральный Лагранжевый метод контрольного объема. Согласно этому методу струя представляется в виде последовательности цилиндрически контрольных объемов (КО). На рис. 1 приведена схема затопленной многофазной струи. Каждый контрольный объем характеризуется следующими теплофизическими параметрами струи: температурой, плотностью, скоростью, координатами и т. д. Пусть на дне водоема существует некоторый источник радиуса  $r_0$ , из которого вытекает смесь нефти и газа. В качестве начальных условий известны: начальная температура истечения нефти и газа, а также их объемные расходы ( $Q_o^e$  и  $Q_g^e$ ). Также известны характеристики окружающей среды: температура  $T_w$  и скорость окружающей воды  $\vec{V}_w$ .

Полагая, что координаты центра КО являются геометрическим местом траектории центра струи, а осевая линия струи совпадает с траекторией движения КО, можно рассчитать параметры струи в целом.

Для описания процесса распространения затопленной струи используем уравнения сохранения масс, энергии и импульсов:

$$\frac{dM}{dt} = \rho_w Q_w - \rho_{gh} Q^f, \quad \rho = \sum_i \alpha_i \rho_i, \quad \sum_i \alpha_i = 1, \quad \alpha_i = V_{ki}/V_k, \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt}(cMT) = c_w T_w \rho_w Q_w + J_h L - J_w c_w T_{hs},$$

$$c = \sum_i \chi_i c_i, \quad \chi_i = M_i/M, \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt}(Mu) = u_w \rho_w Q_w - u \rho_{gh} Q^f,$$

$$\frac{d}{dt}(Mv) = v_w \rho_w Q_w - v \rho_{gh} Q^f,$$

$$\frac{d}{dt}[(M_w + M_o)w + (M_g + M_h) \cdot (w + w_b)] =$$

$$= w_w \rho_w Q_w - (w + w_b) \rho_{gh} Q^f +$$

$$+ (\rho_w - \rho_l) \pi b^2 h (\alpha_w + \alpha_o) g + (\rho_w - \rho_{gh}) \pi b^2 h (\alpha_g + \alpha_h) g, \quad (3)$$

где нижний индекс  $i$  относится к соответствующей компоненте в КО ( $o$  – нефть,  $g$  – газ,  $h$  – гидрат,  $w$  – вода);  $\alpha_i$  – объемные содержания;  $V_{ki}$  – объем,  $m^3$ ;  $c_i$  –

теплоемкость, Дж/(кг К);  $\rho_i$  – плотность,  $кг/м^3$ ,  $J_i$  – интенсивности расхода компоненты при образовании гидрата,  $кг/с$ ;  $Q_w$  – объемный расход воды, которая поступает в струю,  $м^3/с$ ;  $Q^f$  – объемный поток пузырьков, который «покидает» КО,  $м^3/с$ ;  $V_k, M, N$  – объем, масса и количество пузырьков в КО;  $r_{gh}$  – радиус композитного пузырька,  $м^3$ ;  $\rho_{gh}$  – плотность композитного пузырька,  $кг/м^3$ ;  $\rho_l$  – плотность жидкой составляющей в КО,  $кг/м^3$ ;  $L$  – теплота фазовых переходов, Дж/кг;  $g$  – ускорение силы тяжести,  $м^2/с$ ;  $u, v, w$  – компоненты скорости КО  $\vec{V}$ ;  $u_w, v_w, w_w$  – компоненты скорости течения воды, окружающей КО  $\vec{V}_w$ ,  $м/с$ .

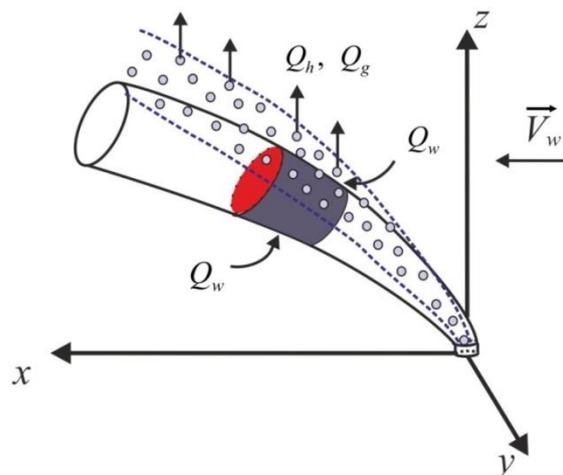


Рис. 1. Схема затопленной многофазной струи  
 Fig. 1. Diagram of the multiphase submerged jet

Дополним полученную систему следующими соотношениями:

$$\frac{dz}{dt} = w, \quad \frac{dx}{dt} = u, \quad \frac{dy}{dt} = v, \quad (4)$$

$$Q^f = I^f \frac{4}{3} \pi r_{gh}^3, \quad Q_w = 2\pi b h A \left| |\vec{V}| - V_w' \right|,$$

$$J_g = G \cdot J_h, \quad J_w = (1 - G) J_h, \quad J_h = N 4 \pi r_{gh}^2 j_h, \quad (5)$$

где  $I^f$  – поток пузырьков, покидающих КО,  $с^{-1}$ ;  $V_w'$  – проекция скорости течения воды  $\vec{V}_w$  на направление  $\vec{V}$ ,  $м/с$ ;  $A$  – коэффициент вовлечения окружающей воды;  $j_h$  – интенсивность образования гидрата, отнесенная к площади поверхности пузырька,  $кг/(м^2 \cdot с)$ .

Уравнения (1)–(5) используются для расчета теплофизических параметров КО.

#### Уравнения, описывающие миграцию пузырька

Приведем систему уравнений, описывающих поднятие газового пузырька, с учётом гидратообразования [14]. Скорость пузырька определим следующим образом:

$$\vec{V}_g = K_1 \vec{V} + K_2 \vec{V}_w + w_b \vec{k},$$

здесь  $K_1=1$  и  $K_2=0$  для случая, когда пузырек находится внутри КО, и значения  $K_1=0$  и  $K_2=1$ , когда пузырек находится вне КО. На рис. 2 схематично показан композитный пузырек. Вначале пузырек газовый, затем начинается образование гидратной оболочки

(внутри – газовое ядро), в завершении гидратообразования пузырьки полностью гидратный.

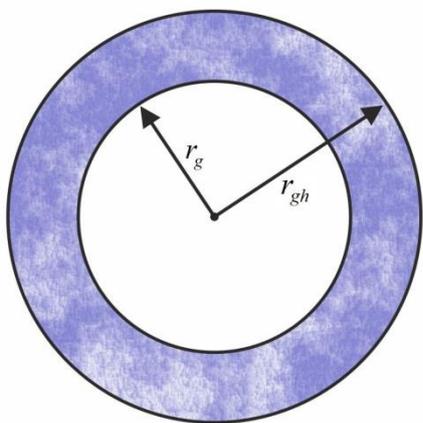
Запишем уравнения сохранения массы для композитного пузырька [14, 15]:

$$\frac{dm_{gh}}{dt} = 4\pi r_{gh}^2 j_w, \quad m_{gh} = m_g + m_h, \quad (6)$$

где  $m_g = \frac{4}{3}\pi r_g^3 \rho_g$  и  $m_h = \frac{4}{3}\pi(r_{gh}^3 - r_g^3)\rho_h$  – масса газа и гидрата в композитном пузырьке. Интенсивность потребления воды  $j_w$  определяется следующим образом, согласно [14]:

$$j_w = \frac{(1-G)D^* \rho_g}{G(1/r_g - 1/r_{gh})r_{gh}^2},$$

где  $D^* = D_g \rho_g / \rho_g$  – приведенный коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с. В работе [16] получено значение  $D^*$  с учетом экспериментальных данных из работы [17].



**Рис. 2.** Композитный пузырек:  $r_{gh}$  – радиус композитного пузырька,  $r_g$  – радиус его газовой составляющей

**Fig. 2.** Composite bubble:  $r_{gh}$  – radius of the composite bubble,  $r_g$  – radius of its gas component

Общая масса газа в композитном пузырьке:

$$m_g + m_h G = m_{g0}, \quad m_{g0} = \frac{4}{3}\pi r_{g0}^3 \rho_{g0}, \quad (7)$$

где  $m_{g0}$  – масса газа в композитном пузырьке в начальный момент времени;  $r_{g0}$  – начальный радиус газового пузырька;  $\rho_{g0}$  – начальная плотность газового пузырька.

Согласно (6) и (7) радиусы газового ядра и композитного пузырька:

$$r_g^3 = \frac{(r_{g0}^3 \rho_{g0} - r_{gh}^3 \rho_h G)}{(\rho_g - \rho_h G)}, \quad \frac{dr_{gh}}{dt} = \frac{j_w}{(1-G)} \left( \frac{1}{\rho_h} - \frac{G}{\rho_{g0}} \right).$$

Давление в толще воды определим следующим образом:

$$p = p_a + \rho_w g (h_u - z),$$

где  $h_u$  – начальная глубина истечения углеводородов;  $p_a$  – атмосферное давление;  $z$  – координата композитного пузырька.

Уравнение импульсов для композитного пузырька [14]:

$$\frac{d(w_b (m_{gh} + \mu_{gh}))}{dt} = f_A - f_T - f_C, \quad (8)$$

где  $m_{gh}$  и  $\mu_{gh}$  – масса пузырька и его присоединенная масса;  $f_A$ ,  $f_T$  и  $f_C$  – силы Архимеда, тяжести и сопротивления:

$$m_{gh} = \frac{4}{3}\pi(r_{gh}^3 - r_g^3)\rho_h + \frac{4}{3}\pi r_g^3 \rho_g, \quad \mu_{gh} = \frac{2}{3}\pi r_{gh}^3 \rho_w,$$

$$f_A = \frac{4}{3}\pi r_{gh}^3 \rho_w g, \quad f_T = \frac{4}{3}\pi((r_{gh}^3 - r_g^3)\rho_h + r_g^3 \rho_g)g,$$

$$f_C = \xi_b \pi r_{gh}^2 \frac{\rho_w w_b^2}{2}.$$

Параметры  $\xi$  и  $Re_{gh}$  определим следующим образом [18]:

$$\xi_b = \frac{12}{Re_b} (1 + 0.0811 Re_b^{0.879}), \quad Re_b = \frac{r_{gh} \rho_w w_b}{\mu_w}.$$

Скорость миграции композитного пузырька  $w_b$  определим из (8) с учетом (6). Температура композитного пузырька равна равновесной температуре [19]:

$$T_{hs} = T_{h0} + \theta \ln \left( \frac{p}{p_{h0}} \right),$$

где  $T_{h0}$  – равновесная температура фазовых переходов для гидрата, соответствующего давления  $p_{h0}$ .

Полагаем, что композитные пузырьки состоят из газового ядра с радиусом  $a_g$  и гидратной оболочки:

$$\frac{4}{3}\pi r_{gh}^3 \rho_{gh} = \frac{4}{3}\pi r_g^3 \rho_g + \frac{4}{3}\pi(r_{gh}^3 - r_g^3)\rho_h.$$

Тогда плотность композитного пузырька с гидратной оболочкой определится следующим образом:

$$\rho_{gh} = \frac{r_g^3 \rho_g + (r_{gh}^3 - r_g^3)\rho_h}{r_{gh}^3}.$$

В предыдущих работах, посвященных процессу течения затопленной струи [6], газ принимался идеальным:

$$p_g = \rho_g R T_g, \quad (9)$$

где  $p_g$  – давление;  $\rho_g$  – плотность;  $T_g$  – температура;  $R$  – удельная газовая постоянная.

Уравнение состояния реального газа, которое применимо для описания поведения газа на больших глубинах, имеет следующий вид [7, 20]:

$$p_g M_g = \rho_b Z_g R_g T_g, \quad (10)$$

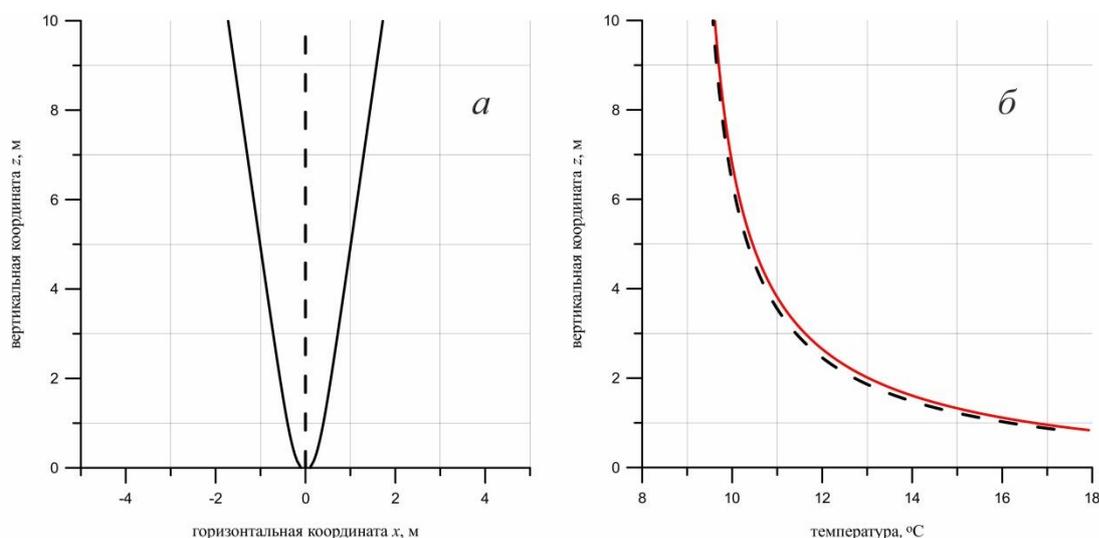
где  $Z_g$  – коэффициент сжимаемости. В работе [21] экспериментально определен коэффициент сжимаемости:  $Z_g=0,91$  для метана.

### Результаты расчетов

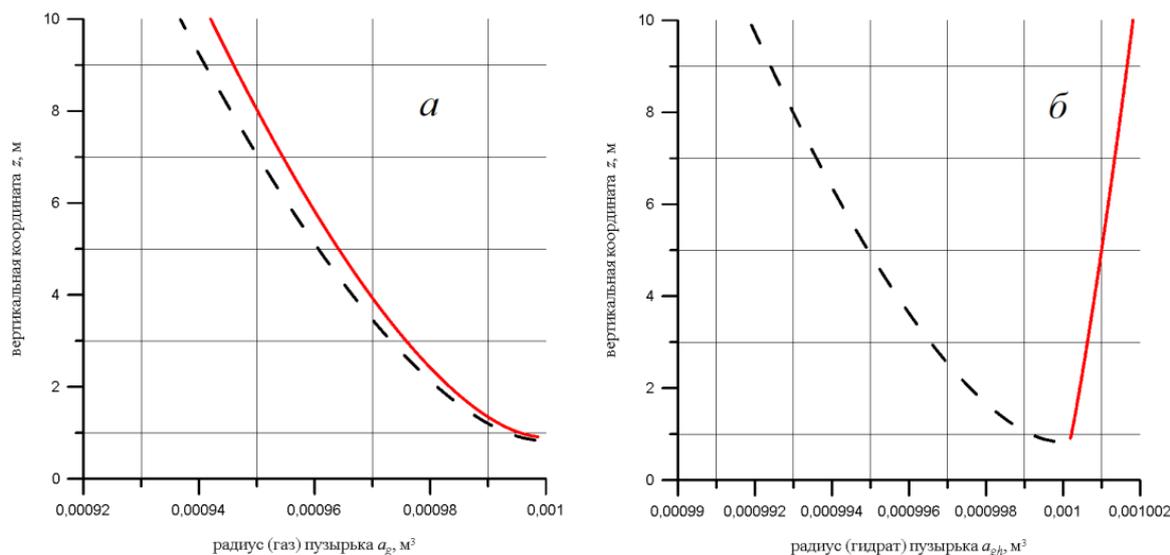
Начальные параметры системы, использованные для расчетов: радиус скважины  $r_0=0,1$  м, температура вытекающих углеводородов  $T^e=80$  °С и окружающей

воды  $T_w=4$  °С, плотности нефти  $\rho_o=650$  кг/м<sup>3</sup>, гидрата  $\rho_h=910$  кг/м<sup>3</sup> и воды  $\rho_w=1030$  кг/м<sup>3</sup>, компоненты скорости течения окружающей воды  $u_w=0$  м/с,  $w_w=0$  м/с,  $v_w=0$  м/с, давление  $p=15$  МПа, теплоемкости нефти  $c_o=2090$  Дж/(кг К), газа  $c_g=2365$  Дж/(кг К), гидрата  $c_h=2100$  Дж/(кг К), воды  $c_w=4200$  Дж/(кг К), радиус пузырька  $r_g=10^{-3}$  м,  $M_g=16\cdot 04$  г/моль,  $L=5\cdot 10^5$  Дж/кг,  $D^*=5\cdot 10^{-10}$  м<sup>2</sup>/с,  $R=520$  Дж/(кг·К),  $R_g=8,31$  Дж/(моль·К),  $\theta=10$  К,  $T_{h0}=273$  К,  $p_{h0}=2,57$  МПа. При расчетах объемный расход газа примем равным  $Q_g^e=1$  м<sup>3</sup>/с, а объемный расход нефти для простоты анализа полученных результатов примем  $Q_o^e=0$  м<sup>3</sup>/с.

На рис. 3, а приведена траектория распространения струи. С увеличением вертикальной координаты происходит расширение струи за счет вовлечения окружающей воды в струю. На рис. 3, б приведена зависимость температуры струи от вертикальной координаты. С увеличением вертикальной координаты температура струи уменьшается. Такой эффект вызван процессом вовлечения холодной окружающей воды в струю. На рис. 3, б и далее пунктирная черная кривая относится к случаю, когда поведение газа описывается уравнением состояния идеального газа (случай 1), а сплошная красная кривая – для случая реального газа (случай 2).



**Рис. 3.** Траектория струи (а) и зависимость температуры струи от вертикальной координаты (б)  
**Fig. 3.** Jet trajectory (a) and jet temperature dependence on vertical coordinate (б)



**Рис. 4.** Зависимость газовой и гидратной составляющих композитного пузырька от вертикальной координаты  
**Fig. 4.** Dependence of gas and hydrate components of a composite bubble on the vertical coordinate

На рис. 4 представлена зависимость газовой (а) и гидратной (б) составляющих композитного пузырька от

вертикальной координаты. Из графика видим, что для случая 1 гидратообразование протекает быстрее, вслед-

ствие чего радиус газовой составляющей композитного пузырька уменьшается быстрее, чем для случая 2. В то же время видим, что радиус гидратной составляющей убывает для случая 1, но возрастает для случая 2.

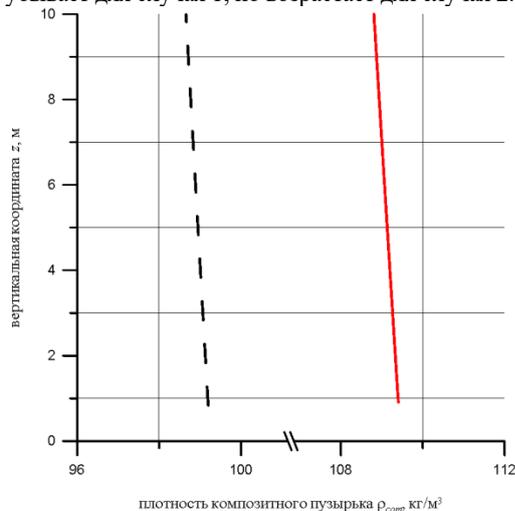


Рис. 5. Зависимость плотности композитного пузырька от вертикальной координаты

Fig. 5. Dependence of the composite bubble density on the vertical coordinate

В связи с тем, что начальная плотность пузырька вычисляется для 1 случая уравнением (9) и для 2 случая уравнением (10) и соответственно составляет  $99,25 \text{ кг/м}^3$  и  $109,47 \text{ кг/м}^3$ , то и характер изменения радиуса связан с плотностью пузырька. Схожий эффект был установлен в работе [16], в которой были рассмотрены случаи миграции метановых пузырьков для различных глубин. В рамках работы [10] было установлено, что начальная плотность пузырька, которая была различной для глубин 1800, 1600 и 800 м, также оказывала влияние на рост или убывание ради-

уса гидратной составляющей пузырька. Таким образом, рис. 4 отражает влияние начальных условий на режим гидратообразования в струе.

На рис. 5 для двух случаев представлены зависимости плотности газа в композитном пузырьке от вертикальной координаты. Из графика видно, что начальные значения плотности различаются, но с увеличением вертикальной координаты характер изменения плотности носит линейный характер.

#### Заключение

Рассмотрена математическая модель струйного течения в условиях гидратообразования. Исследовано влияние начальных параметров окружающей среды на формирование затопленной многофазной струи с учетом гидратообразования. Проведены численные эксперименты, отражающие распространение многофазной затопленной струи, для случаев с различными начальными условиями. Рассмотрены случаи, когда поведение газа описывается уравнениями состояния для идеального и реального газа. Установлено, что радиус гидратной составляющей пузырька убывает для случая, когда поведение газа описывается уравнением состояния для идеального газа, и растет для случая применения уравнения состояния для реального газа. Такой эффект связан с разными способами описания состояния газа и различными значениями плотности газа. Полученный эффект является физически непротиворечивым и согласуется с исследованиями других авторов.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России в сфере научной деятельности, номер для публикаций FEUR-2020-0004 «Решение актуальных задач и исследование процессов в нефтехимических производствах, сопровождающихся течениями многофазных сред».*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Хасанов М.К. Математическая модель инъекции сероводорода в пласт, частично насыщенный водой // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 329. – № 9. – С. 6–14.
- Полетаев А.В., Полетаева Е.В. Оценка объемов углеводородных газов газогидратов Азербайджанского сектора Южного Каспия по сейсмическим данным // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 10. – С. 153–162.
- Recovery of saltmarsh meiofauna six years after the Deepwater Horizon oil spill / J.W. Fleeger, M.R. Riggio, I.A. Mendelsohn, Q. Lin, A. Houc, D.R. Deis // Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. – 2018. – V. 502. – P. 182–190.
- Богоявленский В.И., Баринев П.С., Богоявленский И.В. Катастрофа в мексиканском заливе на месторождении Ixtoc комплекса Cantarell // Бурение и нефть. – 2018. – № 1. – С. 3–13.
- Гималтдинов И.К., Кильдибаева С.Р. Модель затопленной струи с учетом двух предельных схем гидратообразования // Теплофизика и аэромеханика. – 2018. – Т. 25. – № 1. – С. 79–88.
- Гималтдинов И.К., Кильдибаева С.Р. Динамика многофазной затопленной струи с учетом образования гидратов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2015. – Т. 1. – № 3. – С. 92–101.
- Zheng L., Yapa P.D., Chen F. A model for simulating deepwater oil and gas blowouts – part I: theory and model formulation // Journal of hydraulic research. – 2002. – V. 41. – № 4. – P. 339–351.
- Chen F.H., Yapa P.D. A model for simulating deepwater oil and gas blowouts part ii: comparison of numerical simulations with deepspill field experiments // Journal of Hydraulic Research. – 2003. – V. 41. – № 4. – P. 353–365.
- Lee J.H.W., Chu V.H. Turbulent jets and plumes – a Lagrangian approach. – Kluwer, Kluwer Academic Publishers, 2003. – 390 p.
- Bishnoi P.R., Maini B.B. Laboratory study of behaviour of oil and gas particles in salt water, relating to deepwater blowouts // Spill Technology Newsletter. – 1979. – V. 4. – № 1. – P. 24–36.
- Chen F.H., Yapa P.D. Estimating hydrate formation and decomposition of gases released in a deepwater ocean plume // Journal of marine systems. – 2001. – № 30. – P. 21–32.
- Novel concept to control and remediate deep water oil spills: the universal deepwater oil containment system (UDOC). Patent XP055056864 USA, 2016.
- Гималтдинов И.К., Кильдибаева С.Р. К теории начального этапа накопления нефти в куполе-сепараторе // Теплофизика и аэромеханика. – 2015. – Т. 22. – № 3. – С. 401–406.
- Шагапов В.Ш., Тазетдинов Б.И. Образование и разложение газогидратных включений при миграции в воде // Теплофизика и аэромеханика. – 2014. – Т. 21. – № 3. – С. 355–364.
- О миграции одиночного газового пузырька в воде при образовании на его поверхности стабильной газогидратной корки / В.Ш. Шагапов, А.С. Чиглинцева, А.А. Русинов, Б.И. Тазетдинов // Теоретические основы химической технологии. – 2017. – V. 51. – № 2. – С. 199–206.
- О миграции одиночного газового пузырька в воде / В.Ш. Шагапов, А.С. Чиглинцева, А.А. Русинов, Б.И. Тазетди-

- нов // Теплофизика высоких температур. – 2017. – V. 55. – № 3. – P. 440–446.
17. Fate of rising methane bubbles in stratified waters: how much methane reaches the atmosphere? / D.F. McGinnis, J. Greinert, Y. Artemov, S.E. Beaubien, A. Wuest // J. Geophys. Res. – 2006. – V. 111. – P. 382–397.
18. Химическая гидродинамика / А.М. Кутепов, А.Д. Полянин, З.Д. Запрянов, А.В. Вязьмин. – М.: Казенин Квантум, 1996. – 336 с.
19. Хасанов М.К. Математическая модель образования гидрата диоксида углерода при инъекции углекислого газа в метано-гидратный пласт // Теоретические основы химической технологии. – 2017. – Т. 51. – № 5. – С. 499–509.
20. Sloan E.D. Clathrate hydrates of natural gases. 2nd ed. – New York: Mercel dekker, Inc., 1997. – 750 p.
21. Лапшин В.И., Волков А.Н., Шафиев И.М. Коэффициент сжимаемости газов и газоконденсатных смесей: экспериментальное определение и расчеты // Научно-технический сборник. Вести газовой науки. – 2011. – № 1 (6). – С. 120–131.

Поступила 11.10.2019 г.

#### Информация об авторах

**Кильдибаева С.Р.**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной информатики и программирования Стерлитамакского филиала Башкирского государственного университета.

**Гималтдинов И.К.**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики Уфимского государственного нефтяного технического университета; член-корреспондент, Академия наук Республики Башкортостан.

UDC 532.546:536.421

## EVOLUTION OF OIL AND GAS JET FLOWING THROUGH RUPTURE OF MAIN OIL PIPELINE (GAS PIPELINE) LOCATED ON BOTTOM OF WATER RESERVOIR

**Svetlana R. Kildibaeva**<sup>1</sup>,  
freya.13@mail.ru

**Ilyas K. Gimaltdinov**<sup>2,3</sup>,  
iljas\_g@mail.ru

<sup>1</sup> Sterlitamak Branch of Bashkir State University,  
49, Lenin avenue, Sterlitamak, 453100, Russia.

<sup>2</sup> Ufa State Oil Technical University,  
1, Kosmonavtov street, 450062, Russia.

<sup>3</sup> Academy of Sciences of Bashkortostan,  
15, Kirov street, 450008, Ufa, Russia.

**The relevance** of the research is associated with increasing interest in production of hydrocarbons at the bottom of the world ocean. The risk of accidental spills of oil products into the water increases many times. Oil spills on the Ixtoc-1 platform and Deepwater Horizon in the Gulf of Mexico demonstrated the unavailability of modern methods to eliminate emergency underwater leaks. In this regard, there is a need to study the submerged jets consisting of hydrocarbons mixture (oil and gas). In addition, deep-sea spills of a multiphase mixture of oil and associated gases can produce hydrates, which can affect the dynamics of these emissions. Therefore, the study of the multiphase jets dynamics in ocean water accompanied by hydrate formation is an urgent and multifaceted task. This study will reduce the time of elimination of possible leaks. In this work we study a submerged multiphase jet formation taking into account hydrate formation under different initial conditions.

**The main aim** of the research is to investigate the formation of a submerged jet depending on the initial conditions.

**Objects:** multiphase jet of hydrocarbons; components of the jet: oil, gas, water; composite bubbles, covered with a hydrate shell; nature of jet flow spread, hydrate formation.

**Methods.** The integral Lagrangian method of the control volume is used to describe the submerged jet propagation. According to this method, the jet is represented as a sequence of elementary volumes, each of which is characterized by linear dimensions and thermophysical characteristics. Submerged jet distribution is considered for deep-sea spills, which corresponds to the case when hydrate shells begin to form on the surface of the bubbles and the gas bubble turns into a hydrate. The paper adopts a limit scheme, according to which hydrate formation is limited by the diffusion of gas through the hydrate shell.

**Result.** The authors have supplemented the mathematical model of multiphase submerged jet flow taking into account the formation of hydrate on the surface of bubbles. The dependences of the submerged jet thermophysical characteristics on vertical coordinate and the trajectory of jet propagation are obtained. The equation of state for real gases is applied for methane bubbles, which are covered with a hydrate shell. As a result of calculations, the dependences of the radius of the gas and hydrate component of the composite bubble and its density on vertical coordinate are obtained. It is found that the radius of the bubble hydrate component decreases for the case when the gas is described by the ideal gas state equation and grows for the case of applying the equation of state for real gas.

### Key words:

Submerged jet, multiphase jet, hydrate, methane, oil, hydrocarbon spill, oil, control volume method, gas state equation.

*The work was performed within the framework of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation state task in the field of scientific activity, publication number FEUR-2020-0004 «Solving urgent problems and researching processes in petrochemical industries accompanied by flows of multiphase media».*

### REFERENCES

1. Khasanov M.K. Mathematical model of injection of hydrogen sulfide into the formation, partially saturated with water. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 9, pp. 6–14. In Rus.
2. Poletaev A.V., Poletaeva E.V. Estimation of volumes of hydrocarbon gases of gas hydrates of the Azerbaijan sector of the South Caspian sea by seismic data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 10, pp. 153–162. In Rus.
3. Fleeger J.W., Riggio M.R., Mendelssohn I.A., Lin Q., Houc A., Deis D.R. Recovery of saltmarsh meiofauna six years after the Deepwater Horizon oil spill. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2018, vol. 502, pp. 182–190.
4. Bogoyavlenskiy V.I., Barinov P.S., Bogoyavlenskiy I.V. Katastrofa v meksikanskom zalive na mestorozhdenii Ixtoc kompleksa Cantarell [Disaster in the Gulf of Mexico at the Ixtoc Deposit of the Cantarell complex]. *Burenie i neft*, 2018, no. 1, pp. 3–13.
5. Gimaltdinov I.K., Kildibaeva S.R. Model of a submerged jet accounting for two limiting schemes of hydrate formation. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2018, vol. 25, no. 1, pp. 75–83. In Rus.
6. Kildibaeva S.R., Gimaltdinov I.K. Dinamika mnogofaznoy zatoplennoy strui s uchedom obrazovaniya gidratov [Dynamics of multiphase submerged jet taking into account hydrate formation]. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-matematicheskoe modelirovanie. Neft, gaz, ehnergetika*, 2015, no. 3, pp. 92–101.
7. Zheng L., Yapa P. D., Chen F. A model for simulating deepwater oil and gas blowouts – part I: theory and model formulation. *Journal of hydraulic research*, 2002, vol. 41, no. 4, pp. 339–351.
8. Chen F.H., Yapa P.D. A model for simulating deepwater oil and gas blowouts part ii: comparison of numerical simulations with

- deepspill field experiments. *Journal of Hydraulic Research*, 2003, vol. 41, no. 4, pp. 353–365.
9. Lee J.H.W., Chu V.H. *Turbulent jets and plumes – a Lagrangian approach*. Kluwer, Kluwer Academic Publishers, 2003. 390 p.
  10. Bishnoi P.R., Maini B.B. Laboratory study of behaviour of oil and gas particles in salt water, relating to deepwater blowouts. *Spill Technology Newsletter*, 1979, vol. 4, no. 1, pp. 24–36.
  11. Chen F.H., Yapa P.D. Estimating hydrate formation and decomposition of gases released in a deepwater ocean plume. *Journal of marine systems*, 2001, no. 30, pp. 21–32.
  12. Carte G.A. *Novel concept to control and remediate deep water oil spills: the universal deepwater oil containment system (UDOC)*. Patent XP055056864 USA, 2016.
  13. Gimaltdinov I.K., Kildibaeva S.R. About the theory of initial stage of oil accumulation in a dome-separator. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2015, vol. 22, no. 3, pp. 387–392.
  14. Shagapov V.S., Tazetdinov B.I. Formation and dissociation of gas hydrate inclusions during migration in water. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2014, vol. 21, no. 3, pp. 337–345. In Rus.
  15. Shagapov V.S., Chiglintseva A.S., Rusinov A.A., Tazetdinov B.I. Migration of a single gas bubble in water during the formation of stable gas-hydrate crust on its surface. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2017, vol. 51, no. 2, pp. 216–223.
  16. Shagapov V.S., Chiglintseva A.S., Rusinov A.A., Tazetdinov B.I. On the migration of a single gas bubble in water. *High Temperature*, 2017, vol. 55, no. 3, pp. 420–425. In Rus.
  17. McGinnis D.F., Greinert J., Artemov Y., Beaubien S.E., Wuest A. Fate of rising methane bubbles in stratified waters: how much methane reaches the atmosphere? *J. Geophys. Res.*, 2006, vol. 111, pp. 382–397.
  18. Kutepov A.M., Polyaniin A.D., Zapryanov Z.D., Vyazmin A.V., Kazenin A.M. *Khimicheskaya gidrodinamika* [Chemical fluid dynamics]. Moscow, Kazenin Kvantum Publ., 1996. 336 p.
  19. Khasanov M.K. Mathematical model of formation of carbon dioxide hydrate upon injection of carbon dioxide into a methane hydrate stratum. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2017, vol. 51, no. 5, pp. 647–657. In Rus.
  20. Sloan E.D. *Clathrate hydrates of natural gases*. 2<sup>nd</sup> ed. New York, Marcel Dekker, Inc., 1997. 750 p.
  21. Lapshin V.I., Volkov A.N., Shafiev I.M. Koefffitsient szhimae-mosti gazov i gazokondensatnykh smesey: eksperimentalnoe opredelenie i raschety [Compressibility factor of gases and gas-condensate mixtures: experimental determination and calculations]. *Nauchno-tehnicheskiiy sbornik Vestii gazovoy nauki*, 2011, no. 1 (6), pp. 120–131.

Received: 11 October 2019.

#### Information about the authors

**Svetlana R. Kildibaeva**, Cand. Sc., associate professor, Sterlitamak Branch of Bashkir State University.

**Ilyas K. Gimaltdinov**, Dr. Sc., professor, Ufa State Oil Technical University; corresponding member, Academy of Sciences of Bashkortostan.

УДК 544.5

## ДЕЙСТВИЕ ГАММА-ОБЛУЧЕНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ АКТИВНОСТИ МИКРОПОРОШКОВ АЛЮМИНИЯ

Ильин Александр Петрович<sup>1</sup>,  
genchem@mail.ru

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

Роот Людмила Олеговна<sup>1</sup>,  
tolbanova@mail.ru

Змановский Сергей Владиславович<sup>3</sup>,  
zmanovskiy@rusal.com

Смирнова Валентина Владимировна<sup>1</sup>,  
smirnovavalentinav@mail.ru

Исмаилов Данияр Валерьевич<sup>4</sup>,  
Ismailov\_Daniyar\_V@bk.ru

Рузиева Гузель Усеиновна<sup>4</sup>,  
guzel.ruzieva@mail.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, 36.

<sup>3</sup> ООО «СУАЛ ПМ»,  
Россия, 664064, г. Шелехов, ул. Южная, 2.

<sup>4</sup> Казахский национальный университет им. аль-Фараби,  
Казахстан, 050040, г. Алматы, пр. аль-Фараби, 71.

**Актуальность исследования.** Один из лидеров по производству алюминиевых порошков в России ООО «СУАЛ ПМ» перешел от выпуска грубодисперсных порошков к производству микронных порошков, имеющих более высокую реакционную способность. Микропорошки алюминия применяются во многих отраслях промышленности: порошковой металлургии, самораспространяющемся высокотемпературном синтезе новых материалов, водородной энергетике, пиротехнике и ракетных топливах. Повышение реакционной способности порошков алюминия в различных процессах приводит к понижению энергозатрат и экономии ресурсов.

**Цель:** получение и объяснение экспериментальных данных по изменению параметров активности микропорошков алюминия после их облучения в зависимости от дозы  $\gamma$ -облучения.

**Объекты:** микропорошки алюминия АСД-6, АСД-6М.

**Методы:** дифференциальный термический анализ, рентгенофазовый анализ, методика облучения микропорошков алюминия  $\gamma$ -излучением, методика расчета параметров активности порошков алюминия.

**Результаты.** Получены количественные показатели реакционной способности микропорошков алюминия АСД-6 и АСД-6М до и после облучения  $\gamma$ -излучением изотопа  $Co^{60}$  с энергией 1,17 и 1,33 МэВ, т. е. энергией существенно ниже порога фотоядерных реакций. Дозы облучения образцов порошков составляли 1, 2, 4, 8 и 10 Мрад. После  $\gamma$ -облучения температура начала окисления микропорошков снизилась максимально на 90 и 85 °С; максимальная скорость окисления возросла на 83 и 36 %; степень окисленности (при нагревании до 1250 °С) повысилась на 5,1 %, и минимально понизилась на 1,3 % для микропорошков АСД-6 и АСД-6М, соответственно. Удельный тепловой эффект окисления после  $\gamma$ -облучения всеми дозами был больше, чем для необлученных порошков. Максимальные значения удельного теплового эффекта для АСД-6 на 199,5 кДж/моль, а для АСД-6М – на 134,8 кДж/моль больше тепловых эффектов, чем для необлученных порошков, что существенно превышает стандартную теплоту плавления алюминия (10,8 кДж/моль). Следовательно, такое состояние системы «алюминий – оксид алюминия» характеризуется запасенной энергией в 9 раз больше стандартной теплоты плавления алюминия, что с позиции классической термодинамики невозможно. В то же время известно, что запасание энергии в нанопорошках происходит за счет формирования двойного электрического слоя в частицах алюминия.

### Ключевые слова:

Микропорошки, алюминий, параметры активности, облучение,  $\gamma$ -излучение, запасенная энергия, теплота плавления, система «алюминий–оксид», термодинамика, энергонасыщенное состояние вещества.

### Введение

Влияние  $\beta$ -излучения [1] на атомную и молекулярную структуру веществ широко используется зарубежными учеными [2]. Действие низкоэнергетического ионизирующего  $\gamma$ -излучения галлиевого контура атомного реактора ТПУ [3] на материалы [4] в настоящее время используется для облучения кремния и полупроводниковых приборов для улучшения их характеристик [3–7]. Порошки алюминия входят в

состав пиротехнических смесей и твердых ракетных топлив [8]. Переход от грубодисперсных порошков алюминия к высокодисперсным [9] и нанодисперсным порошкам [10, 11] привел к новым закономерностям в их свойствах как энергоаккумулирующих веществ [12, 13]. Действие различных видов ионизирующих излучений на массивные материалы изучено достаточно подробно при строительстве и эксплуатации облучения атомных реакторов [4–7, 14, 15]. В то же вре-

мя действие  $\gamma$ -излучения на микропорошки алюминия осталось практически не изученным [14, 16, 17].

Целью работы являлось получение и объяснение экспериментальных данных по изменению параметров активности микропорошков алюминия после их облучения в зависимости от дозы  $\gamma$ -облучения.

#### Методики экспериментов и характеристики микропорошков алюминия

В качестве объекта исследования выбраны микропорошки алюминия АСД-6 и АСД-6М производства ООО «СУАЛ ПМ» (г. Шелехов) [18]. Согласно паспортным данным микропорошки имеют следующие характеристики (табл. 1).

**Таблица 1.** Характеристики микропорошков алюминия ( $S_{уд}$  – площадь удельной поверхности,  $d_s$  – среднееповерхностный диаметр частиц,  $\omega(Al)$  – массовая доля  $Al^0$ ,  $h$  – расчетная средняя толщина оксидной пленки)

**Table 1.** Characteristics of aluminium micro powders ( $S_{sp}$  – specific surface area,  $d_s$  – average particle diameter,  $\omega(Al)$  – mass fraction of  $Al^0$ ,  $h$  – estimated average thickness of the oxide film)

Вид порошка Type of powder	$S_{уд}$ , м <sup>2</sup> /г (m <sup>2</sup> /g)	$d_s$ , мкм (mkm)	$\omega(Al)^*$ мас. % (wt. %)	$h^*$ , нм (nm)
АСД-6 ASD-6	0,51	4,36	92	15
АСД-6М ASD-6M	0,63	3,53	91	12

\* параметры порошков после одного года хранения в условно-герметичной таре.

\* parameters of powders after one year of storage in a relatively airtight containers.

Для облучения микропорошков использовали источник  $\gamma$ -излучения – изотоп  $Co^{60}$ : 1,17 и 1,33 МэВ, интенсивность излучения 0,05 Мрад/с. Образцы микропорошков облучали в тонком слое толщиной ~2 мм в конвертах из алюминиевой фольги толщиной 8 мкм, облучение проводили на всю глубину порошка. Дозу облучения определяли с помощью стандартной мето-

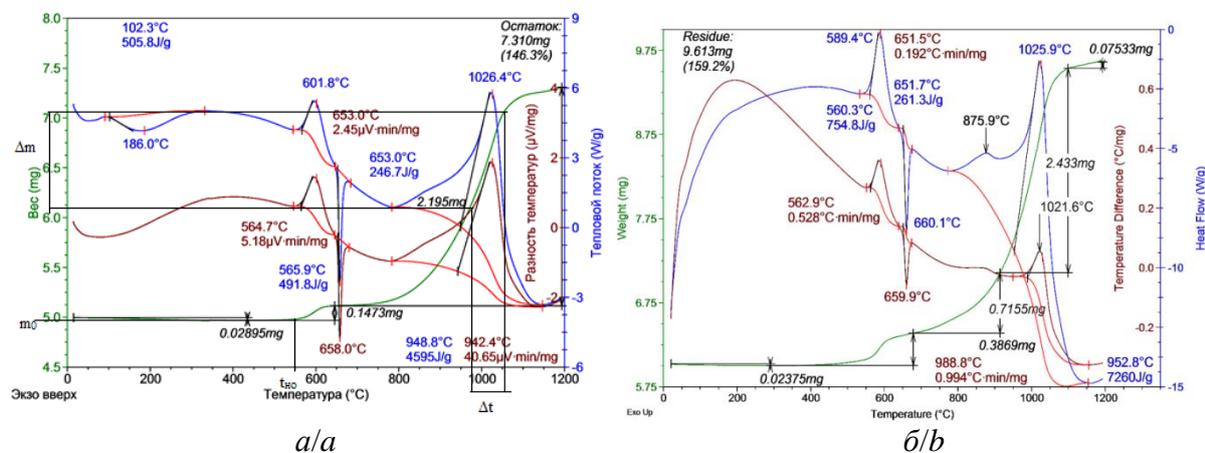
дики по потемнению дозиметрической пленки [19]. При облучении температура поверхности образца не превышала 40 °С.

Для определения реакционной способности микропорошков алюминия применяли дифференциальный термический анализ (ДТА) при линейном повышении температуры со скоростью 10 град/мин в атмосфере воздуха (термоанализатор SDT Q600 фирмы «Instrument») [20]. Для исследований количественной оценки реакционной способности порошков металлов были разработаны четыре параметра их активности [21]:  $t_{но}$  – температура начала окисления,  $V_{max}$  – максимальная скорость окисления,  $\alpha$  – степень окисленности порошков и  $\Delta H$  – удельный тепловой эффект окисления. В это же время ДТА использовали в качестве метода определения величины запасенной энергии следующим образом: из величины удельного теплового эффекта окисления облученного микропорошка вычитали удельный тепловой эффект этого же порошка до облучения.

#### Результаты экспериментов

Параметры активности максимально отражают структурно-энергетическое состояние порошков [22]. Порошки АСД-6 и АСД-6М были подвергнуты  $\gamma$ -облучению непрерывным излучением  $\gamma$ -источника  $Co^{60}$  [7]. До и после облучения образцы были подвергнуты ДТА при нагревании в воздухе (рисунок), по результатам которого были рассчитаны параметры активности. В табл. 2 приведена температура начала окисления в зависимости от дозы  $\gamma$ -облучения.

С увеличением дозы  $\gamma$ -облучения  $t_{но}$  порошков снижалась: максимальное снижение происходило для АСД-6 и составило 90 °С. Необходимо отметить (табл. 2), что максимальное снижение  $t_{но}$  для обоих образцов наблюдалось при облучении минимальной дозой 1 Мрад. Таким образом,  $\gamma$ -излучение взаимодействует с оксидной оболочкой частиц микропорошков, в основном снижая ее температурную устойчивость при нагревании порошков в воздухе.



**Рисунок.** Термограммы микропорошков алюминия АСД-6 (скорость нагрева 10 град/мин, атмосфера – воздух): а) исходный порошок; б) после воздействия  $\gamma$ -излучением дозой 1 Мрад

**Figure.** Thermograms of ASD-6 aluminum micropowders (heating rate 10 deg/min, atmosphere – air): a) initial powder; b) after 1 Mrad  $\gamma$ -radiation exposure

**Таблица 2.** Температура начала окисления ( $t_{но}$ , °C) микронных порошков алюминия после  $\gamma$ -облучения

**Table 2.** Oxidation start temperature ( $t_{os}$ , °C) of aluminium micron powders after  $\gamma$ -radiation exposure

Вид порошка Type of powder	$t_{но}, t_{ос}, ^\circ\text{C}$						Максимальное понижение температуры начала окисления, $\Delta t_{но}, ^\circ\text{C}$ Maximum decrease of the oxidation start temperature, $\Delta t_{os}, ^\circ\text{C}$
	Доза $\gamma$ -облучения, Мрад $\gamma$ -radiation exposure, Mrad						
	0	1	2	4	8	10	
АСД-6 ASD-6	550	460	530	548	549	460	90
АСД-6М ASD-6M	530	445	475	510	524	475	85

Максимальное увеличение скорости окисления  $V_{max}$  для микропорошка АСД-6 наблюдали после  $\gamma$ -облучения максимальной дозой 10 Мрад (на 83 %), в то время как максимальную  $V_{max}$  для микропорошка АСД-6М наблюдали после облучения минимальной дозой 1 Мрад (на 36 %). Результаты экспериментов приведены в табл. 3.

**Таблица 3.** Максимальная скорость окисления ( $V_{max}$ , мг/мин) микронных порошков алюминия после  $\gamma$ -облучения

**Table 3.** Maximal oxidation rate ( $V_{max}$ , mg/min) of aluminium micron powders after  $\gamma$ -radiation exposure

Вид порошка Type of powder	$V_{max}$ , мг/мин (mg/min)						$\Delta V_{max}$ , мг/мин (mg/min)
	Доза $\gamma$ -облучения, Мрад $\gamma$ -radiation exposure, Mrad						
	0	1	2	4	8	10	
АСД-6 ASD-6	0,12	0,21	0,18	0,19	0,14	0,22	0,10
АСД-6М ASD-6M	0,14	0,16	0,11	0,10	0,17	0,19	0,05

Согласно полученным данным (табл. 3) облучение микропорошка алюминия АСД-6 всеми дозами привело к увеличению скорости окисления. При облучении микропорошка АСД-6М после воздействия  $\gamma$ -излучения дозами 2 и 4 Мрад максимальная скорость окисления максимально снизилась на 30 %.

В зависимости от дозы облучения степень окисленности порошка АСД-6 повышалась и понижалась, достигая максимума после облучения дозой 10 Мрад: повысилась на 5,1 % (табл. 4). Степень окисленности порошка АСД-6М при нагревании в воздухе после  $\gamma$ -облучения всеми дозами в изучаемом диапазоне понизилась и имела максимальное значение – на 1,3 % меньше, чем  $\alpha$  исходного порошка. Максимальное понижение  $\alpha$  порошка АСД-6М на 52,4 % произошло после облучения дозой 1 Мрад.

**Таблица 4.** Степень окисленности ( $\alpha$ , %) микронных порошков алюминия после  $\gamma$ -облучения

**Table 4.** Oxidation degree ( $\alpha$ , %) of aluminium micron powders after  $\gamma$ -radiation exposure

Вид порошка Type of powder	$\alpha$ , % (до 1250 °C)/(up to 1250 °C)						$\Delta\alpha_{max}$ , %
	Доза $\gamma$ -облучения, Мрад $\gamma$ -radiation exposure, Mrad						
	0	1	2	4	8	10	
АСД-6/ASD-6	21,3	23,8	17,9	20,8	22,8	26,4	5,1
АСД-6М/ASD-6M	23,3	11,0	16,9	13,3	18,1	22,0	-1,3

Величины тепловых эффектов окисления образцов микропорошков алюминия до и после  $\gamma$ -облучения приведены в табл. 5. В зависимости от дозы облучения тепловой эффект окисления микропорошка АСД-6 только увеличивался, достигая максимального значения после облучения дозой 10 Мрад 199,5 кДж/моль.

**Таблица 5.** Удельный тепловой эффект окисления ( $\Delta H$ , кДж/моль) микронных порошков алюминия после их  $\gamma$ -облучения

**Table 5.** Specific heat effect of oxidation ( $\Delta H$ , kJ/mol) of aluminium micron powders after  $\gamma$ -radiation exposure

Вид порошка Type of powder	$\Delta H$ , кДж/моль (kJ/mol)						$\Delta H_{max}$ , кДж/моль (kJ/mol)
	Доза $\gamma$ -облучения, Мрад $\gamma$ -radiation exposure, Mrad						
	0	1	2	4	8	10	
АСД-6 ASD-6	117,8	209,4	148,4	277,4	120,7	317,3	199,5
АСД-6М ASD-6M	121,2	110,8	93,7	113,1	85,0	261,0	139,8

В то же время после облучения тепловой эффект окисления микропорошка алюминия АСД-6М уменьшался за исключением дозы облучения 10 рад, после действия которой тепловой эффект повысился на 139,8 кДж/моль (табл. 5).

#### Обсуждение результатов

Микропорошки АСД-6 и АСД-6М по величинам площади удельной поверхности сразу после получения различались на 23,5 %. После одного года хранения на частицах порошка АСД-6М толщина оксидной пленки была меньше примерно на 30 % в сравнении с оболочкой на частицах порошка АСД-6. Снижение температуры начала окисления алюминия (частиц микропорошков) связано со снижением термической стабильности оксидной пленки после действия  $\gamma$ -излучения. При общей тенденции к снижению температуры начала окисления после  $\gamma$ -облучения при некоторых дозах облучения происходил отжиг дефектов в защитной пленке и повышение ее термостабильности (табл. 2).

Повышение удельного теплового эффекта (табл. 5) с эмиссией запасенной энергии происходит после разрушения двойного электрического слоя, ранее сформированного  $\gamma$ -излучением [23]. Таким образом, при  $\gamma$ -облучении происходило образование лавин электронов, их торможение и взаимодействие с ионами  $\text{Al}^{3+}$  в решетке  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , их восстановление до  $\text{Al}^0$  с образованием кластеров алюминия  $\text{Al}_n$  в защитной оболочке [24, 25]. При облучении  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , синтезированного из  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , выход кластеров  $\text{Al}_n$  оказался низким (менее 3 мас. %), что не позволило внедрить способ в практику получения водорода [24]. Для частицы алюминия диаметром 100 мкм максимальная толщина защитной оболочки составляет 10 нм [23]. Массовая доля оксида алюминия в частицах алюминия составляет 6–8 %. Таким образом, вклад в повышение теплового эффекта за счет окисления кластеров после  $\gamma$ -облучения порошков не превышает 8–9 %.

При нагревании в воздухе  $\gamma$ -облученных образцов порошков алюминия АСД-6 не происходили колебательные процессы: только повышение  $V_{\max}$  максимально с 0,12 до 0,22 мг/мин после облучения дозой 10 Мрад (табл. 3). После  $\gamma$ -облучения более дисперсного порошка АСД-6М происходило как повышение, так и понижение  $V_{\max}$ . После облучения дозой 10 Мрад  $V_{\max}$  возросла на 0,05 мг/мин. Такое изменение параметра активности объясняется изменением термической стабильности защитной оксидной пленки ( $t_{\text{но}}$ ).

После  $\gamma$ -облучения микропорошков алюминия АСД-6 дозами от 1 до 10 Мрад тепловой эффект окисления (табл. 5) только увеличивался, достигая максимального значения (261 кДж/моль) после облучения дозой 10 Мрад. В сравнении с необлученным порошком удельный тепловой эффект окисления увеличился на 199,5 кДж/моль.

После облучения микропорошка АСД-6М дозами 1, 2, 4 и 8 Мрад удельный тепловой эффект окисления был ниже удельного теплового эффекта необлученного порошка, но после облучения дозой 10 Мрад удельный тепловой эффект окисления увеличился с 121,2 до 261,0 кДж/моль, т. е. на 139,8 кДж/моль. Ранее такой эффект наблюдали после облучения нанопорошков металлов  $\beta$ -излучением и СВЧ-излучением [26, 27]. Вероятной причиной запасания энергии порошками металлов является формирование или усиление под действием  $\gamma$ -излучения двойного электрического слоя [23], как и в случае действия  $\beta$ -излучения на эти порошки [28].

#### Выводы

1. Полученный экспериментальный результат объясняется формированием двойного электрического слоя под действием  $\gamma$ -облучения в поверхностном и приповерхностных слоях частиц алюминия,

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bing-She Xu, Shun-Ichiro Tanaka. Behavior and bonding mechanisms of aluminum nanoparticles by electron beam irradiation // Nanostructured Materials. – 1999. – V. 12. – P. 915–918.
2. Gordon W.F. Drake, Jung-Sik Yoon, Daiji Kato G.K. Atomic and molecular data and their applications // European Physical Journal. – 2018. – V. 72. – № 3. – P. 140–142.
3. Application of NANOColloid materials labeled by radionuclides in medicine / V.S. Skuridin, E.S. Stasyuk, A.S. Rogov, V.L. Sadkin, N.V. Varlamova, E.A. Nesterov // Advanced Materials Research: Radiation and nuclear techniques in material science: Scientific Journal. – 2015. – V. 1084. – P. 352–356.
4. Воробьев А.А., Завадовская Е.К., Головачевский Е.М. Запасенная энергия в щелочногалогенидных кристаллах // Известия Томского политехнического института. – 1969. – Т. 170. – С. 8–24.
5. Harneet Kaur Sidana, Rameez Ahmad Mir, Pandey O.P. Synthesis of molybdenum nitride (Mo<sub>2</sub>N) nanoflakes via in-situ reduction-nitridation // Journal of Alloys and Compounds. – 2018. – V. 736. – P. 255–265.
6. Korchagin M.A., Zarko V.E., Bulina N.V. Synthesis of nanocrystalline magnesium and aluminum diborides // Eurasian Chemico-Technological Journal. – 2017. – V. 19. – № 3. – P. 209–213.
7. Standish N., Worner H. Microwave application in the reduction of metal oxides with carbon // The Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy. – 1990. – V. 25. – Iss. 3. – P. 177–180.
8. Microstructure effects in aluminized solid rocket propellants / L.T. DeLuca, L. Galfetti, G. Colombo, F. Maggi, A. Bandera, V.A. Babuk, V.P. Sinditskii // Journal of Propulsion and Power. – 2010. – V. 26. – № 4. – P. 724–732.

в которых энергия запасается необратимо, по механизму псевдоемкости. Альтернатива предложенному объяснению в настоящее время в литературе отсутствует.

2. Облучение микропорошков алюминия АСД-6, АСД-6М потоком  $\gamma$ -излучения приводило к повышению запасенной энергии максимально на 199,5 кДж/моль, что в 17,5 раз больше стандартной теплоты плавления алюминия. Таким образом, облученные микропорошки имеют преимущества в таких процессах, как неорганический синтез, горение, спекание, приготовление металлокерамики и др. Алюминий в виде микропорошков необходимо рассматривать не как компактный материал, а как композиционный материал – алюминий-оксид алюминия. В этом случае облучение микропорошков  $\gamma$ -излучением является тестом на характеристики композитов.
3. Облучение микропорошков алюминия АСД-6, АСД-6М  $\gamma$ -излучением приводило к повышению их реакционной способности: снижалась температура начала окисления максимально на 90 °С (АСД-6, 1 Мрад), увеличивалась максимальная скорость окисления максимально на 83 % (АСД-6, 10 Мрад), степень окисленности также увеличивалась максимально на 24 % (АСД-6, 10 Мрад) и повышался удельный тепловой эффект окисления максимально на 170 % (АСД-6, 10 Мрад).

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

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 19-03-00160.*

9. Nanocomposite thermite powders with improved flowability prepared by mechanical milling / Quang Nguyen, Ci Huang, Mirko Schoenitz, K.T. Sullivan, E.L. Dreizin // Powder Technology. – 2018. – V. 327. – P. 368–380.
10. Морохов И.Д., Трусов Л.И., Чижик С.П. Ультрадисперсные металлические среды. – М.: Атомиздат, 1977. – 264 с.
11. Gleiter H. Nanocrystalline materials // Progress in Materials Science. – 1989. – V. 33. – № 4. – P. 223–315.
12. Kinetic model of Al oxidation by water vapor in heterogeneous plasma: Heterophase kinetics / V.A. Bityurin, A.I. Klimov, O.V. Korshunov, V.F. Chinnov // High Temperature. – 2015. – V. 53. – № 1. – P. 21–26.
13. Марчук Г.И., Образцов И.Ф., Седов Л.И. Научные основы прогрессивной техники и технологии. – М.: Машиностроение, 1986. – 376 с.
14. Mills K.C., Dächer C.-Å. The casting powders book. – Berlin; London; Paris: Springer Int. Publishing AG, 2017. – 550 p.
15. Рыкалин Н.Н., Углов А.А. Тепло- и массоперенос при электронно-лучевой обработке // Промышленная теплотехника. – 1981. – Т. 3. – № 5. – С. 3–16.
16. Рыкалин Н.Н., Зуев И.В., Углов А.А. Основы электронно-лучевой обработки материалов. – М.: Машиностроение: 1978. – 239 с.
17. Воздействие концентрированных потоков энергии на материалы / под ред. акад. Н.Н. Рыкалина. – М.: Наука, 1985. – 246 с.
18. ТУ 1791-007-49421776-2011. Порошки алюминиевые АСД. – Город: Шелехов, Изд-во ООО «СУАЛ ПМ». – 7 с.
19. Химическая энциклопедия / под ред. акад. И.П. Кнунянц. Т. 2. – М.: Советская энциклопедия, 1990. – С. 219–221.

20. Wendlandt W.W. Thermal methods of analysis. 2nd ed. – NY: John Wiley & Sons, 1974. – 524 p.
21. Characterization of aluminum powders. I. Parameters of reactivity of aluminium powders / A. Ilyin, A. Gromov, V. An et al. // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. – 2002. – V. 27. – № 6. – P. 361–364.
22. Allen D., Krier H., Glumac N. Heat transfer effects in nano-aluminum combustion at high temperatures // Combustion and Flame. – 2014. – V. 161. – Iss. 1. – P. 295–302.
23. Ильин А.П. Развитие электровзрывной технологии получения нанопорошков в НИИ высоких напряжений при Томском политехническом университете // Известия томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – № 1. – С. 133–139.
24. Standish N., Worner H. Microwave application in the reduction of metal oxides with carbon // Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy. – 1990. – V. 25 (3). – P. 177–180.
25. Bonevich J.E., Marks L.D. Electron radiation damage of  $\alpha$ -alumina // Ultramicroscopy. – 1991. – V. 35. – P. 161–166.
26. Microwave heating characteristics of magnetite ore / R. Rajavaram, J. Lee, J.S. Oh, H.G. Kim, J. Lee // Metals and Materials International. – 2016. – V. 22. – Iss. 6. – P. 1116–1120.
27. Perov V.V., Zarko V.E., Zhukov A.S. New microwave method for measuring unsteady mass gasification rate of condensed systems // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2014. – V. 50. – № 6. – P. 739–741.
28. Влияние бета-облучения на параметры активности микропорошков алюминия / А.П. Ильин, А.В. Мостовщиков, Л.О. Роот и др. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 8. – С. 87–93.

Поступила 27.12.2019 г.

#### Информация об авторах

**Ильин А.П.**, доктор физико-математических наук, профессор отделения естественных наук Школы базовой инженерной подготовки Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Мостовщиков А.В.**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории СВЧ-технологий Инженерной школы ядерных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета; доцент кафедры физической электроники Факультета электронной техники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

**Роот Л.О.**, кандидат технических наук, старший преподаватель отделения естественных наук Школы базовой инженерной подготовки Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Змановский С.В.**, кандидат технических наук, директор Центра инноваций ООО «СУАЛ ПМ».

**Смирнова В.В.**, кандидат технических наук, старший преподаватель отделения естественных наук Школы базовой инженерной подготовки Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Исмаилов Д.В.**, аспирант Казахского национального университета им. аль-Фараби.

**Рузиева Г.У.**, магистрант Казахского национального университета им. аль-Фараби.

UDC 544.5

## IMPACT OF GAMMA-RADIATION EXPOSURE ON ACTIVITY PARAMETERS OF ALUMINIUM MICROPOWDERS

**Alexander P. Ilyin**<sup>1</sup>,  
genchem@mail.ru

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

**Liudmila O. Root**<sup>1</sup>,  
tolbanova@mail.ru

**Sergey V. Zmanovskiy**<sup>3</sup>,  
zmanovskiy@rusal.com

**Valentina V. Smirnova**<sup>1</sup>,  
smirnovavalentinav@mail.ru

**Daniyar V. Ismailov**<sup>4</sup>,  
Ismailov\_Daniyar\_V@bk.ru

**Guzel U. Ruzieva**<sup>4</sup>,  
guzel.ruzieva@mail.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,  
36, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

<sup>3</sup> OOO SUAL PM,  
2, Yuzhnaya street, Shelekhov, 664064, Russia.

<sup>4</sup> Al-Farabi Kazakh National University,  
71, al-Farabi avenue, Almaty, 050040, Kazakhstan.

**The relevance of the research.** One of the leaders in production of aluminum powders in Russia OOO «SUAL-PM» has passed from production of coarse powders to production of micron powders with higher reactivity. Aluminium micropowders are used in many branches of industry: powder metallurgy, self-propagating high-temperature synthesis of new materials, hydrogen energy, pyrotechnics and rocket fuels. Increase of aluminium powders reactivity in various processes leads to reduction in energy consumption and resource saving.

**The main aim** of the research was to obtain and explain experimental data on changes in activity parameters of aluminium micropowders after radiation exposure, depending on the  $\gamma$ -radiation dose.

**Objects:** micron-scaled aluminium powders ASD-6, ASD-6M.

**Methods:** differential thermal analysis, X-ray diffraction analysis, method of aluminium micropowders exposure with  $\gamma$ -radiation, method of calculation of the activity parameters of aluminium powders.

**Results.** Quantitative indicators of the reactivity of aluminium micropowders ASD-6 and ASD-6M before and after exposure with  $\gamma$ -radiation were obtained. The radiation source was the  $Co^{60}$  isotope with the energy of 1,17 and 1,33 MeV, i. e. the energy substantially below the threshold of photonuclear reactions. The doses to the powder samples exposure were 1, 2, 4, 8, and 10 Mrad. After  $\gamma$ -radiation exposure the micropowders oxidation start temperature has maximally decreased on 90 and 85 °C; maximal oxidation rate increased by 83 and 36 %; the degree of oxidation (at heating up to 1250 °C) increased by 5,1 %, and minimally decreased by 1,3 % for the ASD-6 and the ASD-6M micropowders, accordingly. The specific thermal effect of oxidation after  $\gamma$ -radiation exposure with all doses was greater than for non-exposed powders; the maximum values of the specific thermal effect was on 199,5 kJ/mol for ASD-6, and 134,8 kJ/mol for ASD-6M higher than thermal effects for non-exposed powders, which significantly exceeds the standard heat of aluminium melting (10,8 kJ/mol). Consequently, such a state of the «aluminium – aluminium oxide» system is characterized by the stored energy, 9 times higher than the standard heat of aluminium melting, which is impossible according to thermodynamics. At the same time, it is known that energy is stored in nanopowders due to the formation of a double electric layer in aluminium particles.

### Key words:

Micropowders, aluminium, activity parameters, exposure,  $\gamma$ -radiation, stored energy, melting heat, «aluminium – aluminium oxide» system, thermodynamics, energy-saturated state of matter.

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

This work was financially supported by the Russian Fund of Fundamental Investigations, Project No. 19-03-00160.

### REFERENCES

1. Bing-She Xu, Shun-Ichiro Tanaka. Behavior and bonding mechanisms of aluminum nanoparticles by electron beam irradiation. *Nanostructured Materials*, 1999, vol. 12, pp. 915–918.
2. Gordon W.F. Drake, Jung-Sik Yoon, Daiji Kato G.K. Atomic and molecular data and their applications. *European Physical Journal*, 2018, vol. 72, no. 3, pp. 140–142.
3. Skuridin V.S., Stasyuk E.S., Rogov A.S., Sadkin V.L., Varlamova N.V., Nesterov E.A. Application of NANOcolloid materials labeled by radionuclides in medicine. *Advanced Materials Research: Radiation and nuclear techniques in material science: Scientific Journal*, 2015, vol. 1084, pp. 352–356.
4. Vorobyev A.A., Zavadovskaya E.K., Golovchanskiy E.M. The stored energy in alkaline halide crystals. *Bulletin of Tomsk Polytechnic Institute*, 1969, vol. 170, pp. 8–24. In Rus.

5. Harneet Kaur Sidana, Rameez Ahmad Mir, Pandey O.P. Synthesis of molybdenum nitride (Mo<sub>2</sub>N) nanoflakes via in-situ reduction-nitridation. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, vol. 736, pp. 255–265.
6. Korchagin M.A., Zarko V.E., Bulina N.V. Synthesis of nanocrystalline magnesium and aluminum diborides. *Eurasian Chemico-Technological Journal*, 2017, vol. 19, no. 3, pp. 209–213.
7. Standish N., Worner H. Microwave application in the reduction of metal oxides with carbon. *The Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 1990, vol. 25, Iss. 3, pp. 177–180.
8. DeLuca L.T., Galfetti L., Colombo G., Maggi F., Bandera A., Babuk V.A., Sinditskii V.P. Microstructure effects in aluminized solid rocket propellants. *Journal of Propulsion and Power*, 2010, vol. 26, no. 4, pp. 724–732.
9. Quang Nguyen, Ci Huang, Mirko Schoenitz, Sullivan K.T., Dreizin E.L. Nanocomposite thermite powders with improved flowability prepared by mechanical milling. *Powder Technology*, 2018, vol. 327, pp. 368–380.
10. Morokhov I.D., Trusov L.I., Chizhik S.P. *Ultradispersnye metallicheskie sredy* [Ultrafine metal media]. Moscow, Atomizdat Publ., 1977. 264 p.
11. Gleiter H. Nanocrystalline materials. *Progress in Materials Science*, 1989, vol. 33, no. 4, pp. 223–315.
12. Bityurin V.A., Klimov A.I., Korshunov O.V., Chinnov V.F. Kinetic model of Al oxidation by water vapor in heterogeneous plasma: Heterophase kinetics. *High Temperature*, 2015, vol. 53, no. 1, pp. 21–26.
13. Marchuk G.I., Obratsov I.F., Sedov L.I. *Nauchnye osnovy progressivnoy tekhniki i tekhnologii* [Scientific basis of progressive engineering and technologies]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 376 p.
14. Mills K.C., Dächer C.-Å. *The casting powders book*. Berlin; London; Paris, Springer Int. Publishing AG, 2017. 550 p.
15. Rykalin N.N., Uglov A.A. Teplo- i massopereenos pri elektronno-luchevoy obrabotke [Heat and mass transfer during electron-beam processing]. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 1981, vol. 3, no. 5, pp. 3–16.
16. Rykalin N.N., Zuev I.V., Uglov A.A. *Osnovy elektronno-luchevoy obrabotki materialov* [Fundamentals of electron-beam material processing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 239 p.
17. *Vozdeystvie kontsentrirrovannykh potokov energii na materialy* [The impact of concentrated energy flow on materials]. Ed. by Acad. N.N. Rykalin. Moscow, Nauka Publ., 1985. 246 p.
18. *TU 1791–007–49421776–2011. Poroshki alyuminievye ASD* [Product Specifications 1791–007–49421776–2011. Aluminum fine powder]. Shelekhov, OOO «SUAL PM» Pres, 2011. 7 p.
19. *Khimicheskaya entsiklopediya* [Chemical encyclopedia]. Ed. by acad. I.P. Knuyants. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1990. Vol. 2, pp. 219–221.
20. Wendlandt W.W. *Thermal methods of analysis*. 2<sup>nd</sup> ed. NY, John Wiley & Sons, 1974. 524 p.
21. Ilyin A., Gromov A., An V. Characterization of aluminum powders. I. Parameters of reactivity of aluminium powders. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2002, vol. 27, no. 6, pp. 361–364.
22. Allen D., Krier H., Glumac N. Heat transfer effects in nano-aluminum combustion at high temperatures. *Combustion and Flame*, 2014, vol. 161, Iss. 1, pp. 295–302.
23. Ilyin A.P. Development of electric explosive technology for nanopowders production in the High Voltage Research Institute at Tomsk Polytechnic University. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2003, vol. 306, no. 1, pp. 133–139. In Rus.
24. Standish N., Worner H. Microwave application in the reduction of metal oxides with carbon. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 1990, vol. 25 (3), pp. 177–180.
25. Bonevich J.E., Marks L.D. Electron radiation damage of  $\alpha$ -alumina. *Ultramicroscopy*, 1991, vol. 35, pp. 161–166.
26. Rajavaram R., Lee J., Oh J.S., Kim H.G., Lee J. Microwave heating characteristics of magnetite ore. *Metals and Materials International*, 2016, vol. 22, Iss. 6, pp. 1116–1120.
27. Perov V.V., Zarko V.E., Zhukov A.S. New microwave method for measuring unsteady mass gasification rate of condensed systems. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2014, vol. 50, no. 6, pp. 739–741.
28. Ilyin A.P., Mostovshchikov A.V., Root L.O. Effect of beta-radiation exposure on the parameters of aluminium micropowders activity. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 8, pp. 87–93. In Rus.

Received: 27 December 2019.

#### Information about the authors

**Alexander P. Ilyin**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Andrei V. Mostovshchikov**, Cand. Sc., senior researcher, National Research Tomsk Polytechnic University; associate professor, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

**Liudmila O. Root**, Cand. Sc., senior lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Sergey V. Zmanovskiy**, Cand. Sc., head of Innovation Centre OOO «SUAL PM».

**Valentina V. Smirnova**, Cand. Sc., senior lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Daniyar V. Ismailov**, postgraduate student, Al-Farabi Kazakh National University.

**Guzel U. Ruzieva**, student, Al-Farabi Kazakh National University.

УДК 621.313.32.019.3: 62-503.55: 621.313 +06

## АЛГОРИТМЫ БЕЗДАТЧИКОВОГО ОТКАЗОУСТОЙЧИВОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ НАСОСА ДЛЯ ДОБЫЧИ НЕФТИ

Однокопылов Георгий Иванович<sup>1</sup>,  
OGIz@ya.ru

Розаев Иван Андреевич<sup>1</sup>,  
veazor@tpu.ru

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

**Актуальность.** Нефтегазовая отрасль России сегодня одна из самых быстро развивающихся в стране. Высокие темпы развития предполагают внедрение новых технологий и значительную модернизацию технологических комплексов, входящих в состав производственной базы. В частности, исполнительных двигателей насосов добычи и транспортировки ископаемого топлива. Надёжное и бесперебойное функционирование двигателя насоса является конкурентным преимуществом. Для снижения вероятных простоев оборудования и недоотпуска нефти предлагается использовать современный вентиляльно-индукторный электродвигатель в качестве исполнительного двигателя насоса добычи нефти. Существующие разработки показывают конкурентные преимущества этого типа электродвигателя при доработке системы управления и применении алгоритмов отказоустойчивого управления. Повысить отказоустойчивость и расширить области применения вентиляльно-индукторного электродвигателя позволяет использование бездатчикового управления. На сегодняшний день в технической литературе данная тематика проработана недостаточно глубоко, а математическая и имитационная модели бездатчикового управления вентиляльно-индукторным электроприводом в аварийном неполнофазном режиме работы ранее рассмотрены не были.

**Цель:** разработка алгоритмов отказоустойчивого бездатчикового управления исполнительным вентиляльно-индукторным электродвигателем в неполнофазных режимах работы; обеспечение корректности переключения структуры управления при обрыве фазы; повышение отказоустойчивости вентиляльно-индукторного электродвигателя насоса в аварийных режимах работы путем подключения алгоритмов отказоустойчивого управления при переключении структуры управления.

**Объект:** четырехфазный вентиляльно-индукторный электродвигатель насоса добычи или транспортировки нефти в аварийных неполнофазных режимах работы.

**Методы:** математическое и имитационное моделирование, программирование в среде Matlab Simulink.

**Результаты.** Разработаны математическая и имитационная модели бездатчикового отказоустойчивого четырехфазного вентиляльно-индукторного электропривода в аварийном режиме работы. Получен алгоритм бездатчикового отказоустойчивого управления насосом с вентиляльно-индукторным электродвигателем в аварийном режиме работы. Получены характеристики насоса добычи нефти в неполнофазном режиме работы исполнительного вентиляльно-индукторного электродвигателя с применением алгоритма отказоустойчивого управления.

### Ключевые слова:

Вентильно-индукторный электродвигатель, обрыв фазы электродвигателя, отказоустойчивый электропривод, алгоритм отказоустойчивого управления, бездатчиковое управление.

### Введение

На сегодняшний день нефтяная отрасль является основой развития Российского энергетического сектора. Очевидно, что необходимо обеспечивать полное функционирование производства на месторождениях и избегать простоев и недоотпуска нефти [1]. Одним из основных факторов, влияющих на непрерывность процесса добычи, является эффективное использование электрооборудования на участках цикла добычи [2]. Необходимо повышение отказоустойчивости исполнительных двигателей насосных агрегатов с целью предотвращения аварийных отключений насоса добычи нефти. Предложено использование вентиляльно-индукторного электродвигателя (ВИД) в качестве исполнительного двигателя насоса добычи или транспортировки нефти, это позволяет продолжить работу насоса после обрыва фазы статорной обмотки исполнительного двигателя [3, 4]. Существует ряд исследований, касающихся повышения отказоустойчивости [5] ВИД, однако они преимущественно относятся к модернизации конструктивных особенностей ВИД, а не алгоритмического управления [6]. Следует

отметить, что преимущества ВИД и некоторые существующие варианты повышения отказоустойчивости приведены в работах [7–10]. Аппаратное применение бездатчикового управления в погружных насосах с вентиляльным двигателем изучено и широко используется, например, группой компаний «Новомет» [3, 4, 6]. Существующие разработки показывают конкурентные преимущества этого типа электродвигателя, однако не рассматривают работу ВИД в аварийных неполнофазных режимах работы [4]. В работе показано, что при доработке системы управления и применении алгоритма отказоустойчивого управления можно значительно повысить отказоустойчивость и применимость вентиляльно-индукторного электродвигателя за счет использования исполнения ВИД без датчика положения ротора, так как для погружного насоса добычи нефти блок телеметрии способен передавать из скважины только медленно меняющиеся сигналы технологического процесса [11, 12]. В реальных электромеханических комплексах насосных агрегатов положение ротора электродвигателя определяется путем математических вычислений на основе

мгновенных значений токов и напряжений [13, 14]. Существующие системы с наблюдателями состояния не позволяют адекватно при помощи математического аппарата рассчитывать положение ротора в аварийном режиме, так как в структуры системы управления не заложено возникающее при отказе фазы смещение векторов потока, соответственно происходит ошибка расчета и модель перестает функционировать [15–17]. В отличие от имеющихся ранее рассмотренных разработок [4, 18–23], рассмотренное в статье решение позволяет реализовать работу исполнительного четырехфазного ВИД электроцентробежного насоса (ЭЦН) с бездатчиковым управлением в аварийном режиме работы, за счет переключения структуры управления со смещением векторов в соответствии с оставшимися в работе фазами.

#### Математическое и имитационное моделирование насоса с бездатчиковым ВИД

За основу была принята математическая модель насоса с ВИД, рассмотренная в [4]. Матрица  $[M_o]$  отказов для четырехфазного ВИД примет вид:

$$[M_o] = \begin{bmatrix} b_A & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_B & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_C & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_D \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где единичному состоянию битов отказов,  $b_A, b_B, b_C, b_D$  будет соответствовать нормальный полнофазный режим работы, а нулевому – неполнофазный режим работы при обрыве соответствующей фазы  $A, B, C, D$  обмотки статора [4].

Бездатчиковое векторное управление ВИД осуществляет система управления, которая анализирует изменения магнитного потока в фазах двигателя и определяет необходимые моменты коммутации обмоток ВИД, производит регулирование тока в фазных обмотках ВИД, рассчитывает текущую скорость вращения ротора. Величина потокосцепления на полюсах ВИД изменяется во времени, но ее направление соответствует оси поля статора фазы [24–26]. В аварийном режиме ВИД при обрыве фазы необходимо перенаправить векторы магнитного потока для создания общего магнитного поля, чтобы избежать ошибки

при расчете положения и скорости для правильной очередности переключения фаз как при наличии датчика положения ротора [27, 28]. Чтобы вывести общий вектор потока статора, вектора потоков фаз преобразуются в стационарной ортогональной двухосной системе координат  $d-q$ . На рис. 1 приведены векторные диаграммы потока  $\Phi$  в осях  $d-q$  для разных конструкций пяти (10/8), четырех (8/6), трех (6/4) фазного ВИД.

Магнитные потоки будут суммироваться в магнитной системе ВИД с разными амплитудами и приводить к возникновению суммарного магнитного потока, фаза которого зависит от углового положения ротора ВИД [29, 30]. Изучение существующих бездатчиковых алгоритмов управления электроприводом показало, что данные алгоритмы не позволяют производить адекватное управление в аварийном неполнофазном режиме работы [31–36]. Разработан алгоритм (2), позволяющий изменять углы векторов потока в соответствии с количеством оставшихся в работе фаз в аварийном режиме. Необходимые углы векторов потока в фазах для разных конструкций, в зависимости от числа оставшихся в работе фаз, приведены в табл. 1.

$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{\Phi}_d = \sum_{j=1}^X b_j \cdot \overline{\Phi}_j \cdot \cos(\sigma_j); \\ \overline{\Phi}_q = \sum_{j=1}^X b_j \cdot \overline{\Phi}_j \cdot \sin(\sigma_j); \\ X = \sum_{j=1}^N b_j; \\ \overline{\Phi}_{\text{общ}} = \sqrt{\overline{\Phi}_d^2 + \overline{\Phi}_q^2}; \\ \sigma = \arctan\left(\frac{\overline{\Phi}_q}{\overline{\Phi}_d}\right), \end{array} \right. \quad (2)$$

где  $b_j$  – бит отказа соответствующей фазы;  $N$  – число фаз ВИД;  $X$  – счетчик состояния ВИД;  $\overline{\Phi}_d$  – вектор потока соответствующей фазы;  $\Phi_d$  и  $\overline{\Phi}_d$  – поперечная и продольная составляющая результирующего вектора суммарного потока в осях  $d-q$ ;  $\sigma_j$  – угол вектора соответствующей фазы (табл. 1);  $\sigma$  – угол вектора  $\Phi_{\text{общ}}$ .

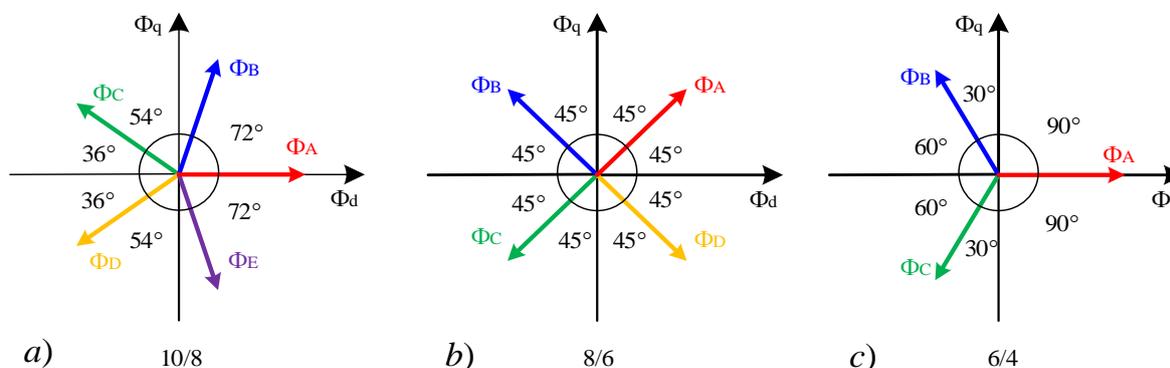


Рис. 1. Векторные диаграммы потока  $\Phi$  в осях  $d-q$  для разных конструкций 5-ти (а), 4-х (б), 3-х (с) фазного ВИД  
 Fig. 1. Flux  $\Phi$  vector diagrams in  $d-q$  axes for different constructions 5<sup>th</sup> (a), 4<sup>th</sup> (b), 3<sup>rd</sup> (c) phases SRM

Рассмотрим работу четырехфазного ВИД топологии 8/6 в аварийном режиме с реализацией алгоритма переключения (2). Формирование векторов потока в нормальном рабочем режиме работы обеспечивает поочередную коммутацию полюсов фаз электродвигателя с рабочим углом  $\pi/4$  (3). При этом  $X=4$ , ( $b_A=1$ ,  $b_B=1$ ,  $b_C=1$ ,  $b_D=1$ ). Принято, что вектор фазы А ориентирован в одном направлении с осью  $d$ .

$$\begin{cases} \Phi_d = \Phi_A \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) - \Phi_B \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) - \Phi_C \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) - \Phi_D \cos\left(\frac{\pi}{4}\right); \\ \Phi_q = \Phi_A \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) + \Phi_B \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) - \Phi_C \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) - \Phi_D \sin\left(\frac{\pi}{4}\right). \end{cases} \quad (3)$$

В аварийном режиме при отказе одной фазы необходимо изменить углы векторов потока на рабочий угол  $\pi/3$  в соответствии с табл. 3, чтобы избежать ошибки при расчете положения и скорости для правильной очередности переключения фаз (4). При этом  $X=3$ , ( $b_A=1$ ,  $b_B=1$ ,  $b_C=1$ ,  $b_D=0$ ) тогда:

$$\begin{cases} \Phi_d = \Phi_A - \Phi_B \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) - \Phi_C \cos\left(\frac{\pi}{3}\right); \\ \Phi_q = \Phi_A + \Phi_B \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) - \Phi_C \sin\left(\frac{\pi}{3}\right). \end{cases} \quad (4)$$

В нормальном режиме работы формируется четыре матрицы коммутации полюсов фаз, по аналогии с ранее рассмотренными матрицами отказов (1). В аварийном режиме при отказе одной фазы двигатель теряет два полюса и переходит в трехфазный режим с тремя матрицами коммутации фаз.

В общем виде математическая модель насоса на базе ВИД с бездатчиковым управлением примет вид (5).

$$\begin{cases} \overline{\Phi}_d = \sum_{j=1}^X b_j \cdot \overline{\Phi}_j \cdot \cos(\sigma_j); \\ \overline{\Phi}_q = \sum_{j=1}^X b_j \cdot \overline{\Phi}_j \cdot \sin(\sigma_j); \\ X = \sum_{j=1}^N b_j; \\ \overline{\Phi}_{\text{обм}} = \sqrt{\overline{\Phi}_d^2 + \overline{\Phi}_q^2}; \\ \sigma = \arctan(\overline{\Phi}_d / \overline{\Phi}_q); \\ \Psi_j = \sum_j \Phi_j; \\ K_{\omega j} = (\partial \Psi_j(i_j, \theta_j)) / \partial \sigma; \\ L_{dj} = (\partial \Psi_j(i_j, \theta_j)) / \partial i_j; \\ [R_M] = ([I] + k_{\omega} [M_o]) \cdot [R]; \\ d[i] / dt = [L_d]^{-1} \{ [U] - [R_M][i] - \omega [K_{\omega}] \}; \\ M = M_A(i_A, \theta_j) + M_B(i_B, \theta_j) + M_C(i_C, \theta_j) + M_D(i_D, \theta_j); \\ M_c(\omega) = M + (M_{c_{\max}} - \Delta M_{c_{\text{тр}}} - \Delta M_{c_{\text{ж}}}) \cdot (\omega / \omega_n)^x; \\ d\omega / dt = (p / J)(M - M_c); \\ \theta_j = p \int_0^t \omega dt = p\theta; \\ Z = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0) / (G_0 + j\omega C_0)}; \\ P / (\rho g) - H_{\text{н}} \cdot (\omega / \omega_n)^x + S_f \cdot Q^2 = 0, \end{cases} \quad (5)$$

Таблица 1. Углы векторов потока для разных конструкций

Table 1. Flux vectors angles for different constructions

X	$\sigma_j$ , град.				
	A	B	C	D	E
5	0	72	36	36	72
4	45	45	45	45	–
3	0	60	60	–	–
2	0	90	–	–	–

где  $[i]$  – матрица токов фаз статора ВИД;  $[U]$  – матрица напряжений фаз ВИД;  $[R]$  – матрица сопротивлений фаз ВИД;  $L_{dj}$  – дифференциальная индуктивность  $j$ -й фазой;  $[L_d]$  – прямая матрица дифференциальных индуктивностей фаз ВИД в функции фазных токов и текущего расчетного положения ротора;  $\psi_j$  – потокосцепление  $j$ -й фазы;  $F$  – число витков обмотки;  $K_{\omega j}$  – коэффициент противо-ЭДС  $j$ -й фазы;  $[K_{\omega}]$  – матрицы коэффициентов противо-ЭДС фаз ВИД в функции фазных токов и расчетного положения ротора;  $\theta_j$  – угол поворота ротора, формируемый  $j$ -й фазой;  $k_{\omega}$  – коэффициент, имитирующий введение высокоомного сопротивления в цепь статора;  $J$  – суммарный момент инерции электропривода;  $M_A(i_A, \theta_j)$ ,  $M_B(i_B, \theta_j)$ ,  $M_C(i_C, \theta_j)$ ,  $M_D(i_D, \theta_j)$  – моменты, развиваемые фазами А, В, С, D;  $p$  – число пар полюсов;  $\omega$  – угловая скорость вращения ротора;  $M_c$  – момент сопротивления;  $\omega_n$  – номинальное значение частоты вращения вала насоса;  $H_n$  – уровень напора на выходе насоса;  $H_{\text{н}}$  – принятое «фиктивное» значение напора насоса на номинальной частоте вращения;  $H_z$  – заданное значение напора;  $S_f$  – принятое значение гидравлического сопротивления насоса;  $\rho$  – значение плотности жидкости, проходящей через насос;  $g$  – ускорение свободного падения;  $Z$  – волновое сопротивление кабеля;  $G_0$  – диэлектрические потери;  $L_0$  – индуктивность единицы длины кабельной линии питания (КЛ);  $R_0$  – продольное активное сопротивление КЛ с распределенными параметрами;  $C_0$  – емкость единицы длины КЛ. Момент от сил трения на валу электродвигателя можно принять постоянным и равным  $\Delta M_{c_{\text{тр}}}$ , момент сопротивления жидкости  $\Delta M_{c_{\text{ж}}}$ .

Здесь в системе уравнений (5) строки с 1 по 5 – это уравнения, составляющие алгоритм переключения структуры управления при бездатчиковом управлении ВИД (2), строка 6 уравнения – формирование потокосцепления. Строки 7, 8 – ранее разработанные уравнения формирования матрицы активных сопротивлений и токов, подробно рассмотренные в ранее опубликованной статье [4]. Строки 9, 10 – уравнения формирования момента и нагрузки, доработанные под четырехфазный ВИД. Строка 11 – основное уравнение движения электропривода, строка 12 – расчет угла положения на основании расчетной частоты вращения, строка 13 – уравнение, учитывающее волновое сопротивление КЛ, строка 14 – уравнение статической модели центробежного насоса [4].

В дополнение к рассмотренному выше алгоритму бездатчикового управления (4), целесообразно применить алгоритм отказоустойчивого управления четы-

рехфазным ВИД с компенсацией момента за счет изменения угла перекрытия фаз [4]. Доказано, что применение данного алгоритма (6) позволяет при отказе типа «обрыв фазы» уменьшить падение активной мощности ВИД за счет увеличения амплитудных значений токов в оставшихся функционирующих фазах.

Коэффициент  $k_d$  управления обеспечивает скачкообразное увеличение амплитуды фазных токов в аварийном режиме, здесь

$$k_d = \left( b_j + \bar{b}_j \cdot \frac{3}{2} \right),$$

для компенсации активной мощности отказавшей фазы двигателя. При отсутствии отказа в  $j$ -й фазе:  $b_j=1, \bar{b}_j=0, k_d=1$ ; при наличии отказа в  $j$ -й фазе  $b_j=0, \bar{b}_j=1, k_d=3/2$ .

$$\begin{cases} I_A = I_\omega b_A \cdot k_d \left[ 1 + \text{sign}(\varphi(i_A, \theta_A) - \theta) \right] / 2; \\ I_B = I_\omega b_B \cdot k_d \left[ 1 + \text{sign}(\varphi(i_B, \theta_B) - \theta) \right] / 2; \\ I_C = I_\omega b_C \cdot k_d \left[ 1 + \text{sign}(\varphi(i_C, \theta_C) - \theta) \right] / 2; \\ I_D = I_\omega b_D \cdot k_d \left[ 1 + \text{sign}(\varphi(i_D, \theta_D) - \theta) \right] / 2. \end{cases} \quad (6)$$

В общем виде блок-схема совместной работы алгоритмов отказоустойчивого бездатчикового управления (4) насосом добычи нефти с ВИД и алгоритма компенсации токов фаз (6) примет вид, как показано на рис. 2.

Функциональная блок-схема рассматриваемого насоса добычи нефти с ВИД приведена на рис. 3.

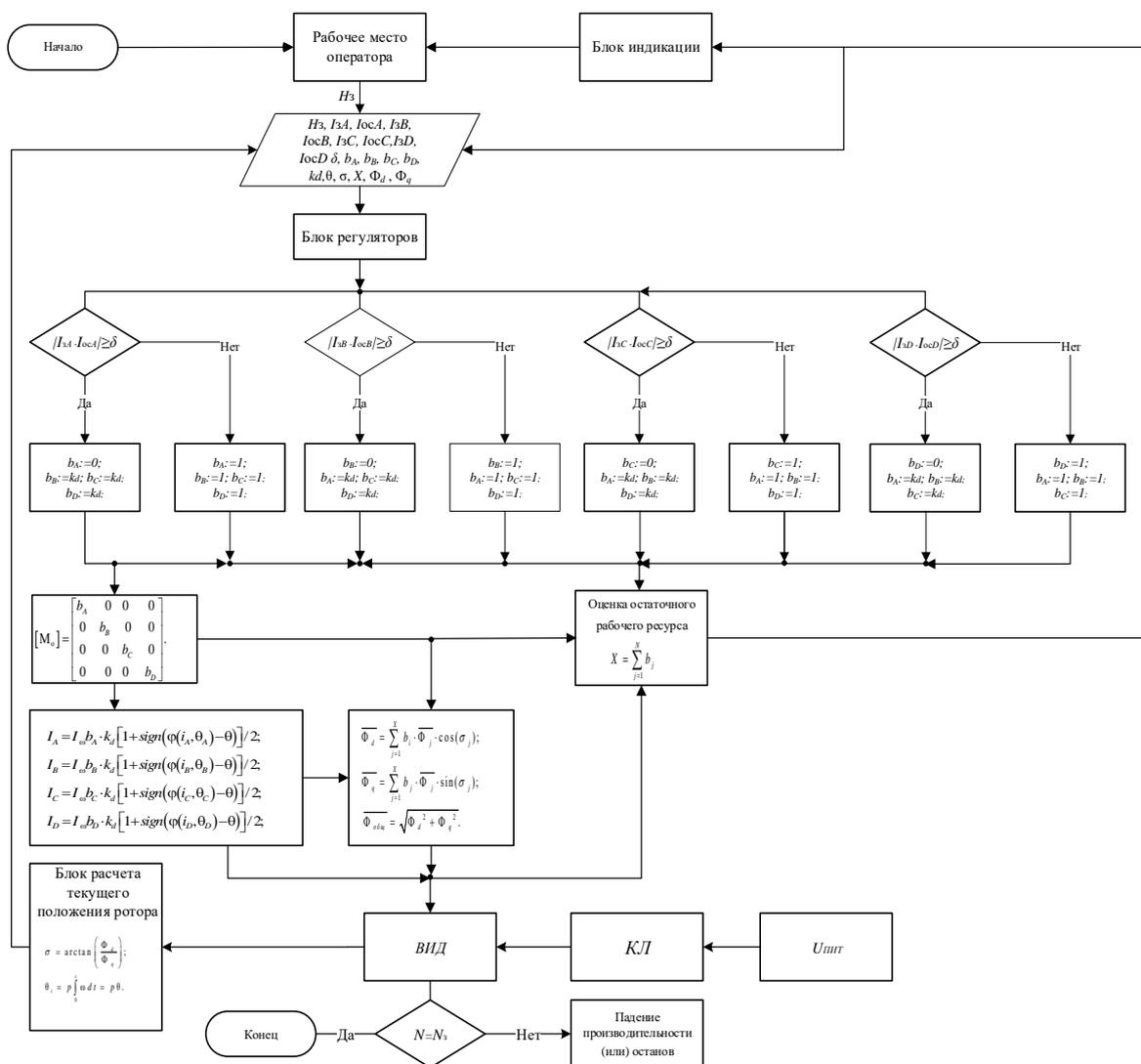


Рис. 2. Блок-схема совместной работы алгоритма отказоустойчивого бездатчикового управления насосом добычи нефти с ВИД и алгоритма компенсации токов фаз

Fig. 2. Block diagram of joint operation of fault-tolerant sensorless control algorithm of an oil pump with SRM and the phase current compensation algorithm

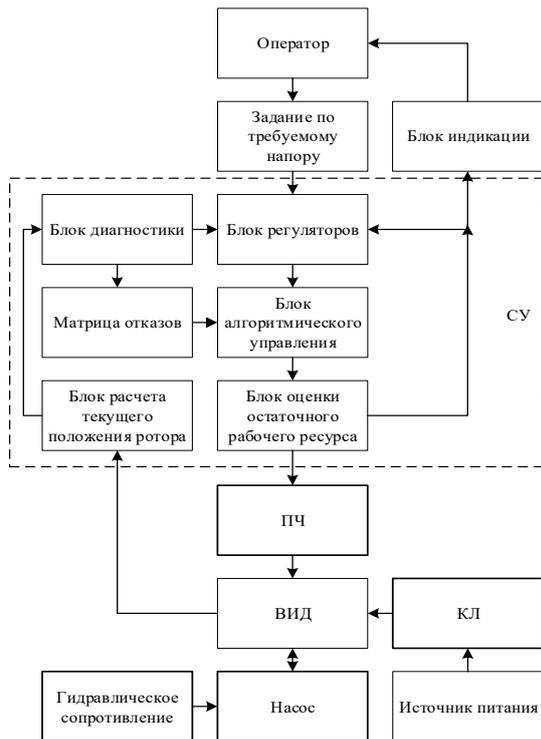


Рис. 3. Функциональная блок-схема рассматриваемого насоса добычи нефти с ВИД

Fig. 3. Functional block diagram of the considered oil pump with a SRM

Основные принципы построения моделей блоков и систем вентильно-индукторного электропривода в среде имитационного моделирования MatLab Simulink ранее рассмотрены в ряде работ [37–40]. Структурная схема имитационной модели насоса добычи нефти с вентильно-индукторным электродвигателем в качестве исполнительного с отказоустойчивым бездатчиковым векторным управлением показана на рис. 4.

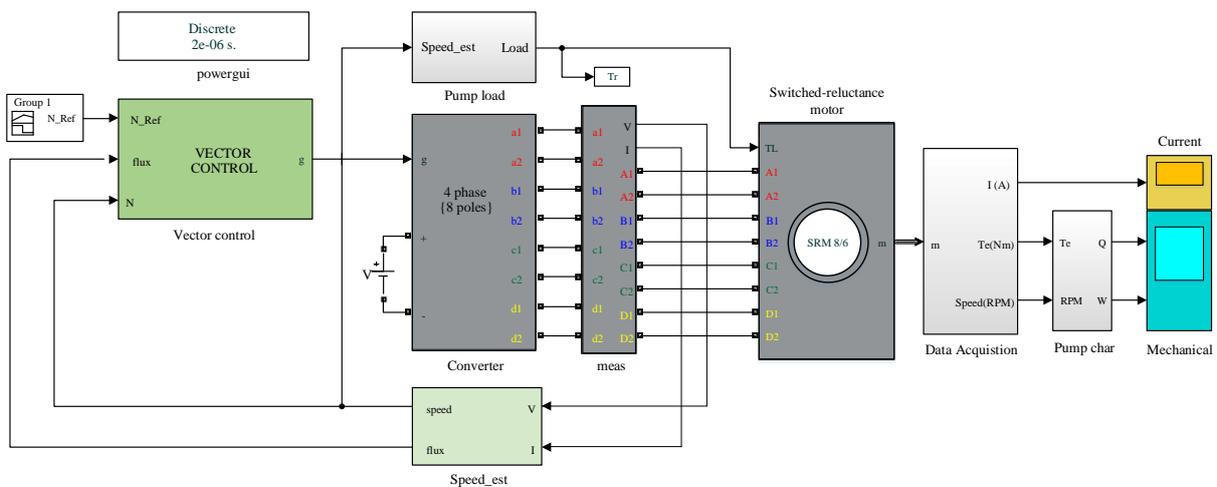


Рис. 4. Структурная схема имитационной модели насоса добычи нефти с вентильно-индукторным электродвигателем с отказоустойчивым бездатчиковым управлением

Fig. 4. Block diagram of a simulation model of an oil pump with a switched-reluctance motor with fault-tolerant sensorless control

Блок анализа задания и векторного управления и формирования сигналов на преобразователь частоты показан на рис. 5.

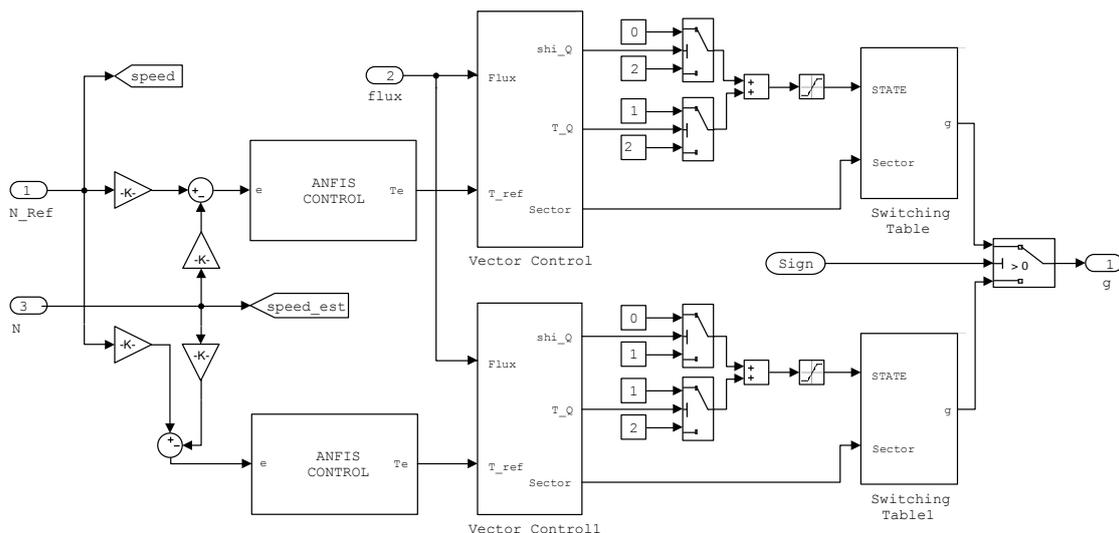
При обрыве фазы значение входного сигнала «sign» изменится с 0 на 1, что приведет к переключению структуры системы управления с 4-х фазного ВИД топологии 8/6 на 3-х фазный с топологией 6/4. Это позволяет изменить матрицы коммутации ключей по секторам с учетом оставшегося количества рабочих полюсов фаз. Блок, формирующий вектора потока, реализующий уравнения (3) и (4), показан на рис. 6.

Здесь сигнал «sign» аналогично предназначен для переключения структуры бездатчикового управления в соответствии с табл. 1 и рис. 1.

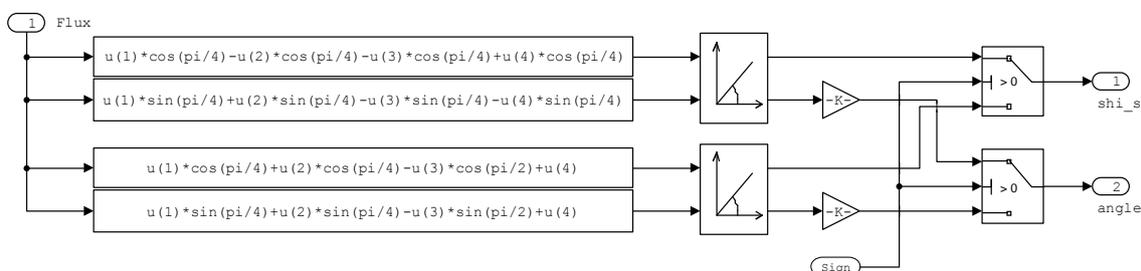
Описание устройства блоков преобразователя частоты (ПЧ), кабельной линии (КЛ), блока регуляторов, блока возмущающего воздействия и блока ЭЦН с ВИД рассмотрены в ранее опубликованных работах [4, 18–20].

### Результаты моделирования

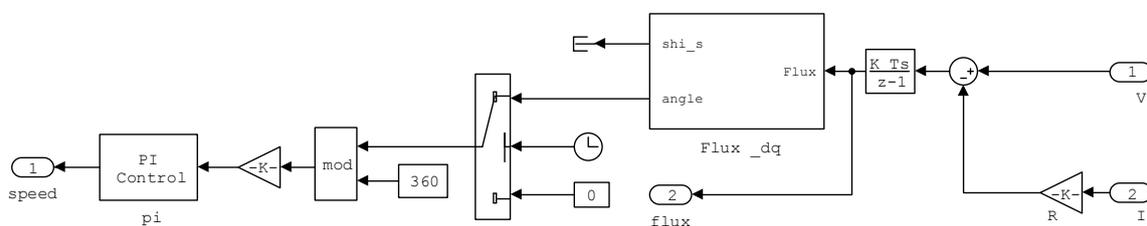
Ниже приведены зависимости частоты вращения ( $\omega$ , фиолетовая кривая), объемного расхода жидкости ( $Q$ , голубая кривая) и токов ( $i_m$ , красная кривая для фазы A, синяя для фазы B, зеленая для фазы C, желтая для фазы D) для случая аварийного режима штатной четырехфазной модели без переключения структуры бездатчикового управления (рис. 8), в случае работы с разработанным алгоритмом бездатчикового управления (4) в аварийном режиме работы (рис. 9), при работе с алгоритмом бездатчикового управления (4) и алгоритма компенсации токов (6), где  $m$  – число функционирующих фаз двигателя (рис. 10). На графиках объемный расход ( $Q$ ) показан пульсирующей кривой, это обусловлено особенностями работы ВИД как машины с пульсацией момента.



**Рис. 5.** Структурная схема имитационной модели блока «Векторное управление»  
**Fig. 5.** Structural scheme of simulation model block «Vector control»



**Рис. 6.** Структурная схема имитационной модели блока, формирующего вектора потока  
**Fig. 6.** Structural scheme of simulation model block of flow vectors formation



**Рис. 7.** Структурная схема имитационной модели блока, рассчитывающего текущую скорость и положение ротора  
**Fig. 7.** Structural scheme of simulation model block of rotor speed and position calculation

Показано, что при работе без переключения структуры управления (рис. 8) после отказа типа «обрыв фазы» (0,5 с.) электропривод насоса прекращает функционировать и реагировать на управление, токи в отдельных оставшихся подключенных к питанию фазах возрастают в 5 раз от номинального уровня. Время достижения первого максимума при пуске  $t_1=0,19$  с. Время пуска до установившегося значения  $t_2=0,265$  с.

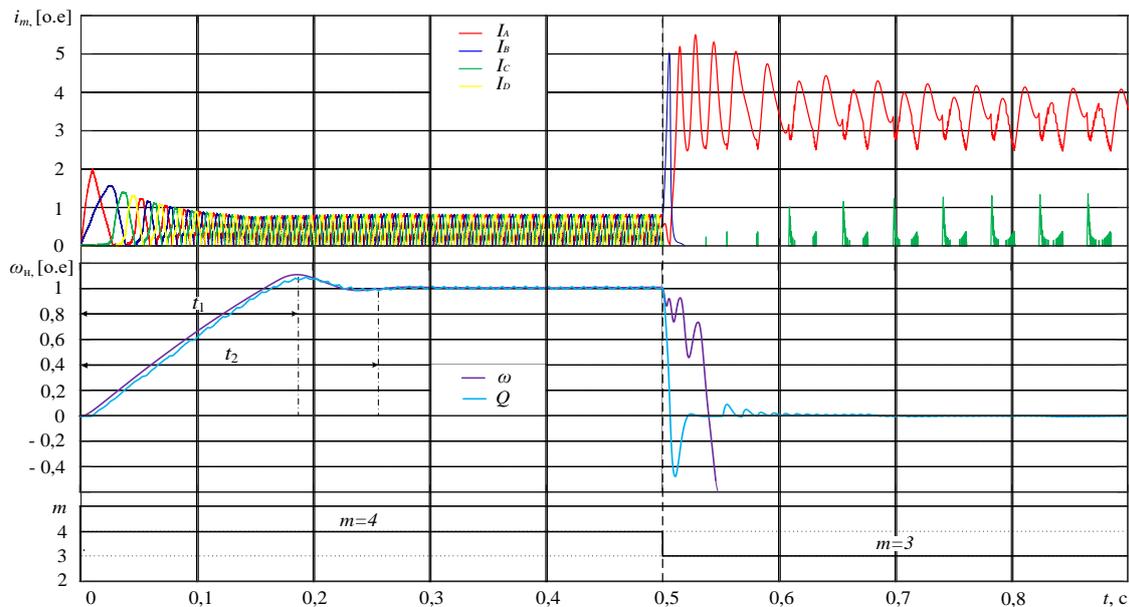
При использовании алгоритма отказоустойчивого векторного бездатчикового управления (4) (рис. 9) после отказа типа «обрыв фазы» (0,5 с.) электродвигатель насоса продолжает функционировать с потерей мощности до уровня 0,62 от номинального значения. При этом значения токов в оставшихся в работе фазах на время переходного процесса возрастают на 25 %, не превышая пусковых значений токов. Время дости-

жения первого максимума при пуске  $t_1=0,19$  с. Время пуска до установившегося значения  $t_2=0,265$  с. Время переходного процесса при переключении структуры управления  $t_3=0,2$  с.

При использовании алгоритма отказоустойчивого векторного бездатчикового управления (4) совместно с алгоритмом компенсации токов в оставшихся функционирующих фазах (6) (рис. 10) после отказа типа «обрыв фазы» (0,5 с.) электродвигатель насоса продолжает свою работу в трехфазном режиме. На участке (0,5–0,7 с) показана возможность работы с алгоритмом компенсации токов в оставшихся в работе фазах на уровне мощности 0,89 от заданного номинального уровня, значение токов в оставшихся в работе фазах повышается на  $k_f=1,5$ . Время переходного процесса при переключении структуры управления на работу с алгоритмом компенсации токов

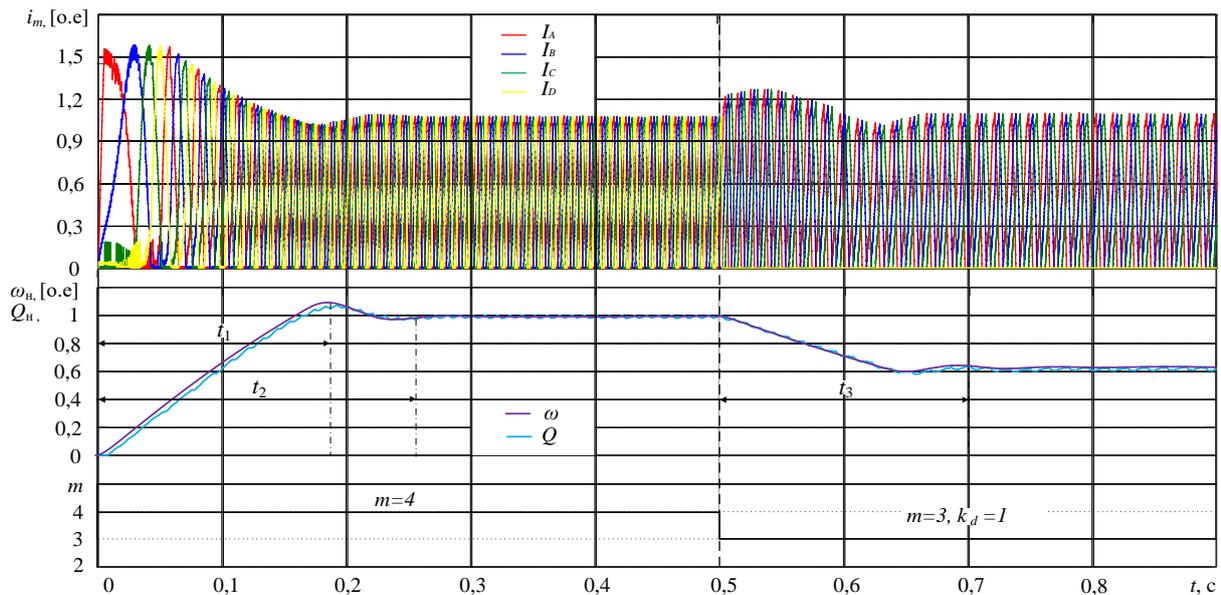
$t_3=0,09$  с. Как видно из графика (рис. 10), работа с алгоритмом компенсации позволяет сохранить близкую к требуемой мощность, но значительно увеличивает токи в оставшихся в работе фазах, что может привести к перегреву и выходу из строя электродвигателя. Поэтому рассмотренный режим рекомендуется использовать как кратковременный в случае необходимости на непродолжительное время поднять крутящий момент и мощность насоса с дальнейшим переходом на трехфазный режим с уровнем 0,62 от но-

минального, как показано на рис. 8. На участке графика (0,7–0,9 с) показан переход к трехфазному режиму работы без алгоритма компенсации токов, установившийся режим показан на графике в интервале от 0,85 до 0,9. Время достижения первого максимума при пуске  $t_1=0,185$  с. Время пуска до установившегося значения  $t_2=0,265$  с. Время обратного перехода на структуру с бездатчиковым алгоритмом управления  $t_4=0,15$  с.



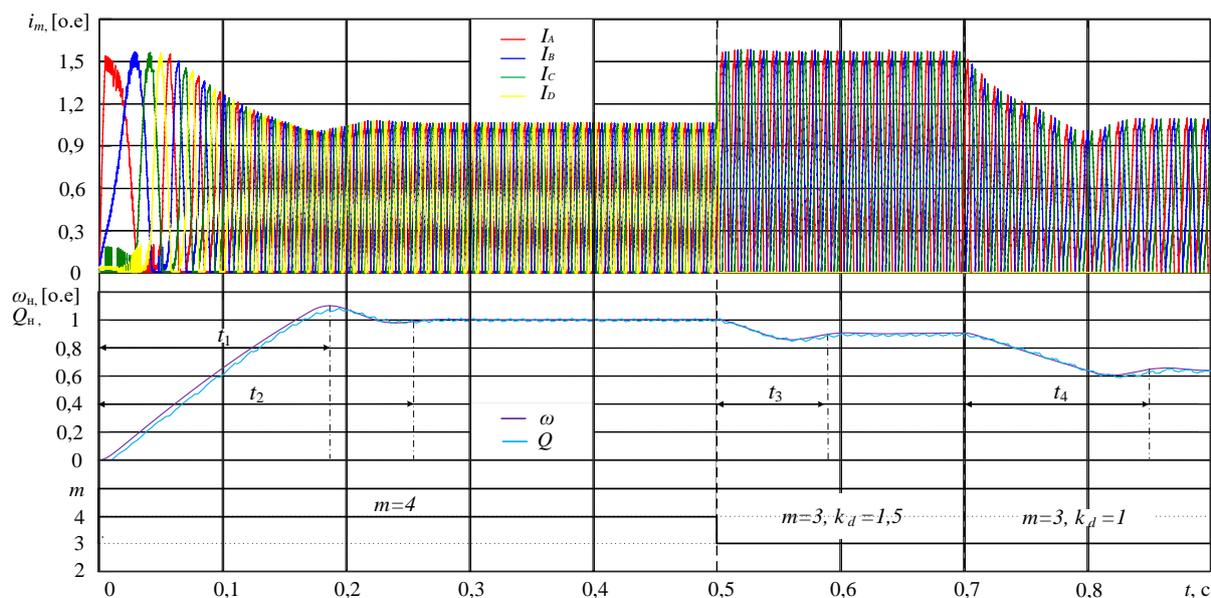
**Рис. 8.** Зависимость токов фаз ( $i_m$ ) угловой частоты вращения ( $\omega$ ), объемного расхода жидкости ( $Q$ ) в о.е. В аварийном режиме 4-х фазного ВИД без переключения структуры управления

**Fig. 8.** Phase current ( $i_m$ ), speed ( $\omega$ ) and flow ( $Q$ ) curves in relative units during emergency operation mode of 4-phase SRM without switching the control structure



**Рис. 9.** Зависимость токов фаз ( $i_m$ ), угловой частоты вращения ( $\omega$ ), объемного расхода жидкости ( $Q$ ) в о.е. В аварийном режиме 4-х фазного ВИД с алгоритмом бездатчикового управления

**Fig. 9.** Phase current ( $i_m$ ), speed ( $\omega$ ) and flow ( $Q$ ) curves in relative units during emergency operation mode of 4-phase SRM under switching control structure to sensorless control algorithm



**Рис. 10.** Зависимость токов фаз ( $i_m$ ), угловой частоты вращения ( $\omega$ ), объемного расхода жидкости ( $Q$ ) в о.е. В аварийном режиме 4-х фазного ВИД с алгоритмом бездатчикового управления и алгоритмом компенсации токов

**Fig. 10.** Phase current ( $i_m$ ), speed ( $\omega$ ) and flow ( $Q$ ) curves in relative units during emergency operation mode of 4-phase SRM under using switching control structure both to sensorless control algorithm and to the phase current compensation algorithm

#### Выводы

1. Разработаны математическая и имитационная модели отказоустойчивого бездатчикового четырехфазного вентильно-индукторного электропривода насосного агрегата в аварийном режиме работы.
2. Показано, что при использовании алгоритма бездатчикового отказоустойчивого управления насосом с вентильно-индукторным электродвигателем в аварийном режиме работы после отказа типа «обрыв фазы» происходит переключение структуры управления и электродвигатель продолжает функционировать с потерей мощности 38 % от номинального заданного уровня частоты вращения вала электродвигателя насоса. Данный алго-

ритм допускает долговременную эксплуатацию насосного агрегата на оставшихся в работе фазах без риска перегрева обмоток электродвигателя.

3. При совместном использовании алгоритма бездатчикового управления и алгоритма компенсации момента за счет увеличения амплитуды фазных токов после отказа типа «обрыв фазы» электродвигателя работоспособность можно временно восстановить до уровня 89 % от номинального заданного значения частоты вращения вала электродвигателя с минимальным снижением требуемого уровня объемного расхода жидкости, с дальнейшим переходом на длительный режим 62 % уровня от номинального без использования алгоритма компенсации токов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ларченко Л.В. Нефтегазовая отрасль России: современное состояние и направления развития в условиях неопределенности // Общество. Среда. Развитие. – 2019. – № 1. – С. 9–13.
2. Проблемы анализа технического состояния современных приводов компрессорных установок магистральных газопроводов / П.С. Кунина, Е.И. Величко, М.С. Степанов, А.В. Музыкантова // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2019. – № 3. – С. 56–58.
3. Павлов Д.О., Кузнецов Е.М. Бездатчиковое определение скорости в электроприводе установок электроцентробежных насосов // Актуальные вопросы энергетики. – Омск: Изд-во Омского государственного технического университета, 2016. – С. 147–153.
4. Однокопылов Г.И., Букреев В.Г., Розаев И.А. Исследование отказоустойчивого вентильно-индукторного электродвигателя насоса для добычи нефти // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 10. – С. 69–81.
5. Zhang Y., Jiang J. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems // Annual reviews in control. – 2008. – V. 32. – № 2. – P. 229–252.

6. Птах Г.К. Вентильно-индукторный реактивный электропривод средней и большой мощности: зарубежный и отечественный опыт // Электротехника: Сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Т. 2. – № 3. – С. 23–33.
7. Krishnan R. Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications. Industrial electronics series. – USA: CRC Press, 2010. – 398 p.
8. Sheth N.K., Sekharbabu A.R.C., Rajagopal K.R. Effects of interturn fault in phase winding on the performance of multi-phase doubly salient motors // Journal of magnetism and magnetic materials. – 2006. – V. 304. – № 1. – P. 207–209.
9. Александровский С.В., Петренко Ю.Н. Разработка математической и имитационной модели вентильно-индукторного двигателя // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2011. – № 2. – С. 15–22.
10. Gerling D., Schramm A. Evaluation and comparison of fault tolerant switched reluctance machines for a specific application // Proc. of the 9 Spanish-Portuguese Congress on Electrical Engineering (9CHLIE). – Marbella, Spain, 2005. – 5 p.
11. Котин Д.А., Панкратов В.В. Принципы векторного управления и алгоритмы ориентирования по полю в асинхронизированном синхронном электроприводе // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2010. – № 4. – С. 46–51.

12. Нос О.В., Волков В.Ю., Клан В.А. Векторное управление электроприводом переменного тока с многоуровневым преобразователем частоты на базе n-мостов // Электротехника. – 2019. – Т. 90. – № 4. – С. 304–309.
13. Lee J., Seo J.H., Kikuchi N. Topology optimization of Switched-reluctance motors for the desired torque profile. Structural and multidisciplinary optimization. – 2010. – V. 42. – № 5. – P. 783–796.
14. Нгуен Куанг Кхоа. Исследование электромеханического комплекса: вентильно-индукторный электропривод – центробежный насос // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2016. – № 4. – С. 55–64.
15. Разработка наблюдателя полного порядка с оперативным мониторингом момента сопротивления для погружных асинхронных электродвигателей / А.С. Глазырин, С.Н. Кладиев, К.С. Афанасьев, В.В. Тимошкин, И.Г. Слепнёв, В.И. Полищук, Sandor Halasz // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 2. – С. 118–126.
16. Nesimi Ertugrul, Adrian D. Cheok. Indirect angle estimation in switched reluctance motor drives using fuzzy logic based motor model // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2000. – Iss. 15. – № 6. – P. 1029–1044.
17. Simani S., Fantuzzi C., Patton R.J. Model-based fault diagnosis in dynamic systems using identification techniques. – NY: Springer, 2003. – 282 p.
18. Odnokopylov G.I., Rozayev I.A. Formation of failure matrix and failure-free control algorithm for multi-sectioned Switched-reluctance drive // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2014. – V. 66. – № 1. – P. 1–7.
19. Odnokopylov G.I., Rozayev I.A. Fault-tolerant control of switched-reluctance drive in emergency modes // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON): Proc. – Omsk, May 21–23, 2015. – P. 1–6.
20. Odnokopylov G.I., Rozayev I. A. Fault-tolerant control algorithms of switched-reluctance motor drive in open-phase modes // 2016 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST): Proc. – Novosibirsk, June 1–3, 2016. – Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 2016. – V. 2. – P. 140–144.
21. Однокопылов Г.И., Саркисов Д.Ю. Оценка параметров разрушающей нагрузки при ударно-волновом нагружении для ответственных строительных конструкций сооружений нефтегазового комплекса // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 3. – С. 85–95.
22. Однокопылов Г.И., Шевчук В.А., Дементьев Ю.Н. Применение системного анализа для обеспечения эксплуатационной надёжности электрических машин в алмазодобывающей промышленности // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 5. – С. 131–140.
23. Odnokopylov G.I., Bragin A.D. Mathematical model of brushless DC motor in phase loss operation mode // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – V. 698. – P. 24–29.
24. Sensorless operation of an ultra-high-speed switched reluctance machine / C.J. Bateman, B.C. Mecrow, P.P. Acarnley, A.C. Clothier, N.D. Tuftnell // IEEE transactions on industry applications. – 2010. – V. 46. – № 6. – P. 2329–2337.
25. Torque-ripple minimization for switched reluctance motor based on torque sharing function by fuzzy variable angle strategy / Z. Liu, J. Wang, X. Song, J. Tang, Y. Yang // ICIC express letters. – 2017. – V. 11. – № 1. – P. 161–168.
26. Чавылалов М.В. Бездатчиковое определение положения ротора в системе управления вентильно-индукторного электропривода: дис. ... канд. тех. наук. – Ростов-на-Дону, 2013. – 115 с.
27. Multiphysics NVH modeling: simulation of a switched reluctance motor for an electric vehicle / F.L.M. dos Santos, J. Anthonis, F. Naclerio, H. van Der Auweraer, J.J.C. Gyselinck, L.C.S. Góes // IEEE transactions on industrial electronics. – 2014. – V. 61. – № 1. – P. 469–476.
28. Diab A.A.Z., Kotin D.A., Pankratov V.V. Speed control of sensorless induction motor drive based on model predictive control // International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices. – Novosibirsk, 2013. – P. 269–274.
29. Petrushin A., Tchavychalov M. Improving the accuracy of switched reluctance motor sensorless rotor position estimation // Journal of engineering and applied sciences. – 2015. – V. 10. – № 4. – P. 80–84.
30. Polyakov V., Plotnikov I., Postnikov N. Three-loop control system of energy storage device in the frequency-controlled electric drive // 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED). – Moscow, 2019. – P. 1–5.
31. Вдовин В.В., Котин Д.А., Панкратов В.В. Адаптивный алгоритм вычисления координат для бездатчикового векторного управления машинами двойного питания // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2013. – № 6. – С. 23–27.
32. Фролов В.Я., Жилиготов Р.И. Разработка системы бездатчикового векторного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами в Matlab Simulink // Записки горного института. – 2018. – Т. 229. – С. 92–97.
33. Adaptive state observers for sensorless control of switched reluctance motors / R. Ortega, A. Sarr, I. Bahri, D. Diallo, A. Bobtsov // International journal of robust and nonlinear control. – 2019. – V. 29. – № 4. – P. 990–1006.
34. Study of a 3 phase (6/4) switched reluctance motor control / N.D. Irimia, A. Simon, L. Livadaru, S. Vlasceanu, O. Dabija, A.M. Mihai // Buletinul AGIR. – Iasi, Romania: Gheorghe Asachi Technical University of Iasi, 2011. – P. 129–134.
35. Нугаев И.Ф., Искужин Р.В. Комплекс математических моделей для решения задач синтеза алгоритмов управления процессами в нефтедобывающих скважинах // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2012. – № 7. – С. 36–44.
36. Senthil Murugan L., Maruthupandi P. Sensorless speed control of 6/4-pole switched reluctance motor with ANFIS and fuzzy-PID-based hybrid observer // Electrical Engineering. – 2020. DOI: 10.1007/s00202-019-00915-5
37. Wajdi Z., Jalel K., Habib R. Comparative design and modeling study of single sided linear planner switched reluctance motor // WSEAS transactions on circuits and systems. – 2014. – V. 13. – P. 37–46.
38. Бычков М.Г., Красовский А.Б. Имитационная модель вентильно-индукторного электропривода при бездатчиковом варианте управления // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. – 2011. – № S2. – С. 5–17.
39. Ganji B., Askari M.H. Analysis and modeling of different topologies for linear switched reluctance motor using finite element method // AEJ – Alexandria engineering journal. – 2016. – V. 55. – № 3. – P. 2531–2538.
40. Nos O.V., Starostina L.V., Radel U. The synchronous switching of motor power supply from frequency converter to grid for an ac drives with field-oriented vector control // 18th international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices. – Novosibirsk, 2017. – P. 511–515.

Поступила 05.05.2020 г.

#### Информация об авторах

**Однокопылов Г.И.**, доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

**Розаев И.А.**, ассистент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

UDC 621.313.32.019.3: 62-503.55: 621.313 +06

## ALGORITHMS OF FAULT-TOLERANT SENSORLESS VECTOR CONTROL OF SWITCHED-RELUCTANCE MOTOR IN ELECTRICAL OIL PUMP

Georgy I. Odnokopylov<sup>1</sup>,  
OGIz@yandex.ru

Ivan A. Rozaev<sup>1</sup>,  
Veazor@tpu.ru

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

**The relevance.** Russian oil and gas industry today is one of the fastest growing in the country. High rates of development suggest introduction of new technologies and significant modernization of technological complexes that make up the production base. Particularly it is necessary to modify the executive motors of fossil fuel extraction and transportation pumps. Reliable and uninterrupted operation of the pump motor is a competitive advantage. To reduce the probable equipment downtime and oil shortage it is considered to use modern switched-reluctance motor as an actuator for oil production pump. Existing developments show the competitive advantages of this type of electric motor when finalizing the control system and applying fault-tolerant control algorithms. Use of sensorless vector control allows improving fault-tolerance and expanding the scope of the switched-reluctance motor. To date this topic has not been reviewed sufficiently deeply in technical literature. Moreover, the mathematical and simulation models of sensorless vector control of a switched-reluctance electric drive in emergency non-phase operation mode have not been previously considered.

**The main aim** of the research is to develop fault-tolerance sensorless vector control algorithms of switched-reluctance electric motor of pump in non-phase operating modes; to ensure control structure switching correctness during phase failure; increase the fault-tolerance of the switched-reluctance electric motor of the pump in emergency operation modes by using fault-tolerant control algorithms under switching the control structure.

**Object:** four-phase switched-reluctance motor of oil production or transportation pump in emergency non-phase operation modes.

**Methods:** mathematical and simulation modeling, programming in the MatLab Simulink.

**Results.** Mathematical and simulation models of a sensorless fault-tolerant four-phase switched-reluctance electric drive in emergency operation mode are developed. A sensorless fault-tolerant control algorithm of a pump with a switched-reluctance motor in emergency operation is received. The characteristics of an oil production pump in an emergency non-phase operation mode of an actuating switched-reluctance electric motor using the fault-tolerance control algorithms were obtained.

### Key words:

Switched-reluctance motor, motor phase failure, fault-tolerant electric drive, fault-tolerant control algorithm, sensorless control.

### REFERENCES

- Larchenko L.V. Neftegazovaya otrasl Rossii: sovremennoe sostoyaniye i napravleniya razvitiya v usloviyakh neopredelennosti [Oil and gas industry of Russia: current state and directions of development under uncertainty]. *Society. Environment. Development*, 2019, no. 1, pp. 9–13.
- Kunina P.S., Velichko E.I., Stepanov M.S., Muzykantova A.V. Problemy analiza tekhnicheskogo sostoyaniya sovremennykh privodov kompressornykh ustanovok magistralnykh gazoprovodov [Problems of analysis of the technical condition of modern drives of compressor installations of gas pipelines]. *Stroitelstvo nefyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*, 2019, no. 3, pp. 56–58.
- Pavlov D.O., Kuznetsov E.M. Bezdatchikovoe opredelenie skorosti v elektroprihode ustanovok elektrosentrobezhnykh nasosov [Sensorless speed detection in the electric drive of electric centrifugal pump installations]. *Aktualnye voprosy energetiki* [Actual issues of power engineering]. Omsk, Omsk State Technical University Publ., 2016. pp. 147–153.
- Odnokopylov G.I., Bukreev V.G., Rozaev I.A. Research of fault-tolerant switched-reluctance motor of electrical oil pump. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 10, pp. 69–81. In Rus.
- Zhang Y., Jiang J. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems. *Annual reviews in control*, 2008, vol. 32, no. 2, pp. 229–252.
- Ptah G.K. Ventilno-induktorny reaktivny elektroprihod sredney i bolshoy moshchnosti: zarubezhny i otechestvenny opyt [Switched Reluctance Drive Medium and High Power: Foreign and Domestic Experience]. *Electrical equipment: network electronic scientific magazine*, 2015, vol. 2, no. 3, pp. 23–33.
- Krishnan R. *Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications*. Industrial electronics series. USA, CRC Press, 2010. 398 p.
- Sheth N.K., Sekharbabu A.R.C., Rajagopal K.R. Effects of interturn fault in phase winding on the performance of multi-phase doubly salient motors. *Journal of magnetism and magnetic materials*, 2006, vol. 304, no. 1, pp. 207–209.
- Aleksandrovskiy S.V., Petrenko Yu.N. Razrabotka matematicheskoy i imitatsionnoy modeli ventilno-induktornogo dvigatelya [Development of mathematical and simulation models of switched-reluctance motor]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh obedineniy SNG*, 2011, vol. 2, pp. 15–22.
- Gerling D., Schramm A. Evaluation and comparison of fault tolerant switched reluctance machines for a specific application. *Proc. of the 9<sup>th</sup> Spanish-Portuguese Congress on Electrical Engineering (9CHLIE)*. Marbella, Spain, 2005. 5 p.
- Kotin D.A., Pankratov V.V. Principles of vector control and algorithms of field orientation in asynchronous synchronous electric drives. *Mechatronics, automatization, control*, 2010, no. 4, pp. 46–51. In Rus.
- Nos O.V., Volkov V.Y., Klan V.A. Vector control for an AC drive with a multilevel frequency converter based on an N-bridge. *Russian Electrical Engineering*, 2019, vol. 90, no. 4, pp. 304–309. In Rus.
- Lee J., Seo J.H., Kikuchi N. Topology optimization of Switched-reluctance motors for the desired torque profile. *Structural and multidisciplinary optimization*, 2010, vol. 42, no. 5, pp. 783–796.
- Nguyen Quang Kkhoa. Issledovanie elektromekhanicheskogo kompleksa: ventilno-induktorny elektroprihod – sentrobezhny nasos [Research of electromechanical complex: switched reluctance

- drive – centrifugal pump]. *Letters of higher educational institutions. Electromechanics*, 2016, no. 4, pp. 55–64.
15. Glazyrin A.S., Kladiyev S.N., Afanasiev K.S., Timoshkin V.V., Slepnev I.G., Polishchuk V.I., Halasz S. Design of full order observer with real time monitoring of load torque for submersible induction motors. *Bulletin of the Tomsk polytechnic university. Geo assets engineering*, 2018, vol. 329, no. 2, pp. 118–126. In Rus.
  16. Nesimi Ertugrul, Adrian D. Cheok. Indirect angle estimation in switched reluctance motor drives using fuzzy logic based motor model. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2000, Iss. 15, no. 6, pp. 1029–1044.
  17. Simani S., Fantuzzi C., Patton R.J.. *Model-based fault diagnosis in dynamic systems using identification techniques*. New York, Springer, 2003. 282 p.
  18. Odnokopylov G.I., Rozaev I.A. Formation of failure matrix and failure-free control algorithm for multi-sectioned Switched-reluctance drive. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2014, vol. 66, no. 1, pp. 1–7.
  19. Odnokopylov G.I., Rozaev I.A. Fault-tolerant control algorithms of switched-reluctance motor drive in open-phase modes. *IFOST 2016: 11<sup>th</sup> International Forum on Strategic Technology*. Novosibirsk, 1–3 June 2016. Novosibirsk^ Novosibirsk State Technical University, 2016. Vol. 2, pp. 140–144.
  20. Odnokopylov G. I., Rozaev I. A. Fault-tolerant control of switched-reluctance drive in emergency modes. *2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON): proceedings*. Omsk, May 21–23, 2015. pp. 1–6.
  21. Odnokopylov G.I., Sarkisov D.Yu. Evaluation of breaking load parameters under shock wave loading for critical constructions of oil and gas sector facilities. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 3, pp. 85–95. In Rus.
  22. Odnokopylov G.I., Shevchuk V.A., Dementyev Yu.N. Application of system analysis for providing reliability of electrical machines in diamond industry. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 5, pp. 131–140. In Rus.
  23. Odnokopylov G.I., Bragin A.D. Mathematical model of brushless DC motor in phase loss operation mode. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 698, pp. 24–29.
  24. Liu Z., Wang J., Song X., Tang J., Yang Y. Torque-ripple minimization for switched reluctance motor based on torque sharing function by fuzzy variable angle strategy. *ICIC express letters*, 2017, vol. 11, no. 1, pp. 161–168.
  25. Bateman C.J., Mecrow B.C., Acarnley P.P., Clothier A.C., Tuftnell N.D. sensorless operation of an ultra-high-speed switched reluctance machine. *IEEE transactions on industry applications*, 2010, vol. 46, no. 6, pp. 2329–2337.
  26. Chavylalov M.V. *Bezdatichikovoe opredelenie polozheniya rotora v sisteme upravleniya ventilno-induktornogo elektroprivoda*. Dis. Dokt. nauk [Sensorless positioning of the rotor in the control system of a switched-reluctance electric drive. Dr. Diss.]. Rostov-on-Don, 2013. 115 p.
  27. Dos Santos F.L.M., Anthonis J., Naclerio F., Van Der Auweraer H., Gyselinck J.J.C., Góes L.C.S. Multiphysics NVH modeling: simulation of a switched reluctance motor for an electric vehicle. *IEEE transactions on industrial electronics*, 2014, vol. 61, no. 1, pp. 469–476.
  28. Diab A.A.Z., Kotin D.A., Pankratov V.V. Speed control of sensorless induction motor drive based on model predictive control. *International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices*. Novosibirsk, 2013. pp. 269–274.
  29. Petrushin A., Tchavychalov M. Improving the accuracy of switched reluctance motor sensorless rotor position estimation. *Journal of engineering and applied sciences*, 2015, vol. 10, no. 4, pp. 80–84.
  30. Polyakov V., Plotnikov I., Postnikov N. Three-loop control system of energy storage device in the frequency-controlled electric drive. *26<sup>th</sup> International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED)*. Moscow, 2019. pp. 1–5.
  31. Vdovin V.V., Kotin D.A., Pankratov V.V. Adaptivnyy algoritm vychisleniya koordinat dlya bezdatichikovogo vektornogo upravleniya mashinami dvoynogo pitaniya [Adaptive coordinate calculation algorithm for the sensorless vector control of motors with dual power supplies]. *Bulletin of higher educational institutions. Electromechanics*, 2013, no. 6, pp. 23–27.
  32. Frolov V.Ya., Zhiligitov R.I. Development of a sensorless vector control system for a permanent magnet synchronous motor in Matlab Simulink. *Notes of the Mining Institute*, 2018, vol. 229, pp. 92–97. In Rus.
  33. Ortega R., Sarr A., Bahri I., Diallo D., Bobtsov A. Adaptive state observers for sensorless control of switched reluctance motors. *International journal of robust and nonlinear control*, 2019, vol. 29, no. 4, pp. 990–1006.
  34. Irimia N.D., Simon A., Livadaru L., Vlasceanu S., Dabija O., Mihai A.M. Study of a 3 phase (6/4) switched reluctance motor control. *Buletinul AGIR*. Iasi, Romania, 2011. pp. 129–134.
  35. Nugayev I.F., Iskuzhin R.V. A complex of mathematical models for the synthesis of process control algorithms in oil wells. *Bulletin of USATU*, 2012, vol. 16, no. 8 (53), pp. 36–44. In Rus.
  36. Senthil Murugan L., Maruthupandi P. Sensorless speed control of 6/4-pole switched reluctance motor with ANFIS and fuzzy-PID-based hybrid observer. *Electrical Engineering*, 2020. DOI: 10.1007/s00202-019-00915-5
  37. Wajdi Z., Jalel K., Habib R. Comparative design and modeling study of single sided linear planner switched reluctance motor. *WSEAS transactions on circuits and systems*, 2014, vol. 13, pp. 37–46.
  38. Bychkov M.G., Krasovskiy A.B. Imitation model of rectifier-inductor electric drive with sensorless control. *Bulletin of Moscow State Technical University. N.E. Bauman*, 2011, no. S2, pp. 5–17. In Rus.
  39. Ganji B., Askari M.H. Analysis and modeling of different topologies for linear switched reluctance motor using finite element method. *AEJ – Alexandria engineering journal*, 2016, vol. 55, no. 3, pp. 2531–2538.
  40. Nos O.V., Starostina L.V., Radel U. The synchronous switching of motor power supply from frequency converter to grid for an ac drives with field-oriented vector control. *18<sup>th</sup> international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, conference proceedings*. Novosibirsk, 2017. pp. 511–515.

Received: 5 May 2020.

#### Information about the authors

**Georgy I. Odnokopylov**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Ivan A. Rozaev**, assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Компьютерная верстка** *О.Ю. Аршинова*  
**Корректурa и перевод на английский язык** *С.В. Жаркова*  
**Дизайн обложки** *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива  
*Валерия Касаткина*

Руководство для авторов и образец оформления статьи: [izvestiya.tpu.ru](http://izvestiya.tpu.ru)

Подписано к печати 29.05.2020. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. 25,59. Уч.-изд. л. 23,14.  
Заказ 73-20. Тираж 500 экз.



**Издательство**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ