



ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

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

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 330, № 1, 2019

Издательство
Томского политехнического университета
2019

**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)
Абуталипова Е.М., д-р техн. наук (Россия)
Полищук В.И., д-р техн. наук (Россия)
Хамитов Р.Н., д-р техн. наук (Россия)
Зюев А.М., д-р техн. наук (Россия)
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, 2019

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 георесурсов, ИТ-специалистов, а также ученых других смежных областей.

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

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

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

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

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

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

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

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

Volume 330, № 1, 2019

**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)
Belozherov V.B., Dr. Sc. (Russia)
Nikitenkov N.N., Dr. Sc. (Russia)
Silkin V.M., PhD (Spain)
Koroteev Yu.M., Dr. Sc. (Russia)
Ulenekov O.N., Dr. Sc. (Russia)
Borisov A.M., Dr. Sc. (Russia)
Korshunov A.V., Dr. Sc. (Russia)
Pestryakov A.N., Dr. Sc. (Russia)
Teipel U., Dsc (Germany)
Jin-Chun Kim, Dsc (South Korea)
Ilyin A.P., Dr. Sc. (Russia)
Zavorin A.S., Dr. Sc. (Russia)
Hanjalic K., Dsc (Netherlands)
Markovich D.M., Dr. Sc. (Russia)
Alekseenko 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;
- Geo Assets Transportation;
- Geo Assets Deep processing;
- Energy-efficient production and conversion of energy based on Geo Assets;
- Safe disposal of Geo Assets and questions Geoecology;
- Geo-engineering of Eurasia and marginal sea.

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 2 potential reviewers who are familiar with the research focus of the article. Final decision on any paper is made by the Editor in Chief.

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

The publication of manuscripts is free of charge.

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

СОДЕРЖАНИЕ

- Россыпи железосодержащих минералов в Сахалинской области
Мелкий В.А., Верхотуров А.А. 6
- Анализ эффективности применения вязкоупругого
поверхностно-активного состава на месторождениях
Западной Сибири
Гумерова Г.Р., Яркеева Н.Р. 19
- Магматизм и эпithermalное Ag-Au оруденение
Красноярского рудного поля Горного Алтая
Гусев А.И., Табакаева Е.М. 26
- Компьютерная модель принятия решений по реконфигурации
структуры технологической системы измельчения руды
Баласанян С.Ш., Геворгян Э.М. 39
- Контроль пропитки – эффективный фактор повышения
надежности электродвигателей горнодобывающей,
строительной и других отраслей промышленности
Смирнов Г.В., Ведяшкин М.В. 51
- Геотермия и оценка нефтегазового потенциала Буреинского
бассейна (Дальний Восток России)
Прохорова П.Н., Развозжаева Е.П., Исаев В.И. 65
- Литолого-петрографические особенности коллекторов
баженовской свиты на юго-востоке Западно-Сибирской
провинции (Томская область)
Недоливко Н.М., Перевертайло Т.Г. 77
- Влияние репрезентативности исходных данных на результаты
моделирования методом двойного крагинга
Шестаков В.В., Степанов Д.Ю. 88
- Оценка состояния припоселковых кедровников Томской области
с использованием данных дистанционного зондирования земли
Пасько О.А., Токарева О.С., Алшаиби А.Д.А.,
Черникова Т.Ю., Кабраль П. 98
- Модель переходных процессов в скважине с частотно-
регулируемым электроцентробежным насосом
Соловьев И.Г., Говорков Д.А., Белашевский С.С., Ведерникова Ю.А. 110
- Новые данные об элементном составе природных вод в районе
распространения Уровской (Кашина-Бека) болезни
(Забайкальский край)
Замана Л.В., Рихванов Л.П., Соктоев Б.Р., Барановская Н.В., Эпова Е.С.,
Солодухина М.А., Михайлова Л.А., Копылова Ю.Г., Хвашчевская А.А. 121
- Оптимизация процесса закачки фиксированных объемов
жидкости в два направления
Бикбулатова Г.И., Галеев А.С., Болтнева Ю.А.,
Ларин П.А., Сулейманов Р.Н., Филимонов О.В. 134
- Условия совместного удаления соединений кремния и
гуминовых веществ из природных вод в присутствии продуктов
термической обработки магнезита
Костикова Л.А., Шиян Л.Н., Мачехина К.И., Коршунев А.В. 145
- Исследование основных режимов работы и элементов
конструкции фотоэлектрических систем для построения
микромощной солнечной электростанции
Хомутов С.О., Полищук В.И., Сташко В.И. 153
- Адаптивная интерпретация результатов
гидродинамических исследований горизонтальных
скважин на прогнозирующих моделях
Сергеев В.Л., Донг Ван Хоанг, Фам Динь Ан 165
- Методика моделирования регионально обособленного
электротехнического комплекса
Архипова О.В., Ковалев В.З., Хамитов Р.Н. 173
- Трехмерная визуализация неблагоприятных природных условий
для корректировки кадастровой стоимости земель
Аврунев Е.И., Гатина Н.В., Козина М.В., Попов В.К. 181
- Исследование характеристик и минерального состава
торфа Томской области применительно
к энергетическому использованию
Ибраева К.Т., Манаев Ю.О., Табакаев Р.Б., Языков Н.А., Заворин А.С. 191
- Резонансные колебания с предельной амплитудой в
вибрационном электромагнитном активаторе
Гаврилин А.Н., Боловин Е.В., Глазырин А.С.,
Кладиев С.Н., Полищук В.И. 201
- Методическое обоснование повышения выработки
запасов нефти месторождений, осложненных
тектоническими нарушениями
Стенькин А.В., Котенев Ю.А., Султанов Ш.Х., Уметбаев В.Г. 214

CONTENTS

- Placer of iron-bearing minerals in the Sakhalin region
Melkiy V.A., Verkhoturov A.A. 6
- Analysis of the efficiency of applying
viscous-elastic surface-active composition
on the fields of Western Siberia
Gumerova G.R., Yarkeeva N.R. 19
- Magmatizm and epithermal Ag-Au ore mineralization
of Krasnoyarsk gold ore field of Gorny Altai
Gusev A.I., Tabakaeva E.M. 26
- Computer model of decision-making on reconfiguration
of the ore grinding technological system structure
Balasanyan S.Sh., Gevorgyan H.M. 39
- Control of impregnation is an effective factor
in increasing the reliability of motors in the mining,
construction and other industries
Smirnov G.V., Vedyashkin M.V. 51
- Geothermy and estimation of hydrocarbon potential
of the bureya basin (Russian Far East)
Prokhorova P.N., Razvozhayeva E.P., Isaev V.I. 65
- Lithological and petrographic characterization
of Bazhenov Suite reservoir rocks in the south-east
of the Western-Siberian province (Tomsk region)
Nedolivko N.M., Perevertaylo T.G. 77
- Influence of initial data representation on the results
of simulation by double kriging method
Shestakov V.V., Stepanov D.Yu. 88
- Assessment of state of cedar forests
in Tomsk region using remote sensing data of the Earth
Pasko O.A., Tokareva O.S., Alshaibi A.J.A.,
Chernikova T.Yu., Cabral P. 98
- Transient processes model of a well with frequency-regulated
electric submersible pump
Solovyev I.G., Govorkov D.A., Belashevsky S.S., Vedernikova Yu.A. 110
- New data on chemical composition of natural waters
in the area of distribution of Urov (Kashina-Beck) disease
(Transbaikal region)
Zamana L.V., Rikhvanov L.P., Soktoev B.R., Baranovskaya N.V., Epova E.S.,
Solodukhina M.A., Mikhailova L.A., Kopylova Yu.G., Khvashchenskaya A.A. 121
- Optimization of pumping fixed volume
of liquid on two directions
Bikbulatova G.I., Galeev A.S., Boltneva Yu.A.,
Larin P.A., Suleymanov R.N., Filimonov O.V. 134
- Conditions of combined sedimentation
of silicon and humic substances from natural waters
in the presence of caustic magnesite
Kostikova L.A., Shiyann L.N., Machekhina K.I., Korshunov A.V. 145
- Study of the basic operation modes
and structural components of photovoltaic systems
to construct a micropower solar power plant
Khomutov S.O., Polishchuk V.I., Stashko V.I. 153
- Adaptive interpretation of the results
of horizontal well production testing
using forecasting models
Sergeev V.L., Dong Van Hoang, Pham Dinh An 165
- Methodology of modeling regionally
isolated electrotechnical complex
Arkhipova O.V., Kovalev V.Z., Khamitov R.N. 173
- 3d visualization of adverse natural conditions
for adjustment of land cadastral value
Avrunev E.I., Gatina N.V., Kozina M.V., Popov V.K. 181
- Research of characteristics
and mineral composition of peat
of the Tomsk region relating to energy use
Ibraeva K.T., Manaev Yu.O., Tabakaev R.B., Yazykov N.A., Zavorin A.S. 191
- Resonant oscillations with a limiting amplitude
in a vibration electromagnetic activator
Gavrilin A.N., Bolovin E.V., Glazyrin A.S.,
Kladiev S.N., Polishchuk V.I. 201
- Methodical substantiation of increasing
production of oil reserves on the fields complicated
by tectonic disturbances
Stenkin A.V., Kotenev Yu.A., Sulnatov S.K., Umetbaev V.G. 214

УДК 550.8:552.1:502.3/7

РОССЫПИ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ МИНЕРАЛОВ В САХАЛИНСКОЙ ОБЛАСТИ

Мелкий Вячеслав Анатольевич¹,
vamelkiy@mail.ru

Верхотуров Алексей Александрович¹,
ussr-91@mail.ru

¹ Сахалинский государственный университет,
Россия, 693023, г. Южно-Сахалинск, ул. Пограничная, 2.

Ю.А. Билибин неоднократно подчеркивал, что для того, чтобы понять картину образования россыпей, необходимо учитывать полный цикл их превращений. Много внимания было уделено в последнее время проблемам поиска древних погребенных россыпей и россыпей сложного строения. Богатые резервы полезных ископаемых в россыпях объясняются множественностью их генетических типов, позволяющих вовлекать в промышленную эксплуатацию новые месторождения.

Актуальность работы обусловлена необходимостью выявления новых источников получения железа, титана и ванадия в условиях сокращения ресурсов минерально-сырьевой базы. Поисковые работы, выполняемые с целью выявления россыпей, наиболее перспективных для разработки, могут проводиться на основании понимания генезиса их формирования.

Цель работы: исследование закономерностей распространения россыпей железистых минералов в пределах Сахалинской области, выявление петрогенетических особенностей преобладающих минералов, определение перспектив освоения месторождений железосодержащего сырья, оценка экономической целесообразности его добычи.

Методы. Исследованы железо-титан-оксидные минералы из различных по кремнекислотности горных пород островодужных вулканогенных комплексов Большой Курильской гряды. Для исследований были подготовлены шлифы горных пород, отобрана магнитная фракция из протолочек. Шлифы пород изучались под поляризационным микроскопом. Порошок протолочек горных пород и мономинеральных фракций исследовался посредством химических аналитических методов (гравиметрического, титриметрического, спектрофотометрического, рентгенофлуоресцентного, масс-спектрометрического с индуктивно-связанной плазмой).

Результаты. Исследованы закономерности формирования железистых россыпей и определены их основные типы. На побережьях Дальнего Востока России встречаются два типа россыпей с различными условиями питания. Одна из них – Курило-Камчатская провинция собственно титаномагнетитовых россыпей – расположена на территории Сахалинской области. На островах Курильской дуги преобладают современные пляжевые россыпи и дюнные отложения низкой террасы. Главная роль в обеспечении минералами россыпей этого типа принадлежит туфопесчанникам, пемзам и пемзово-шлаковым пирокластическим толщам. Кристаллы железосодержащих минералов в горных породах вулканогенных комплексов имеют довольно разнообразные размеры: от мелких, пылеватых до крупных хорошо выраженных кристаллов, размерами более 1–2 мм. Химический состав титаномагнетитов различных вулканических комплексов изменяется в зависимости от кремнекислотности пород. Продуктивные породы характеризуются повышенным содержанием железа, титана и ванадия. Прибрежно-морские, а также древние погребенные россыпи содержат значительные объемы железосодержащих минералов. Изучение технологических схем переработки железосодержащего минерального сырья показало, что некоторые из них позволят провести его переработку с получением востребованных конечных продуктов. При определенных экономических условиях разработка россыпей может быть целесообразной.

Ключевые слова:

Металлические полезные ископаемые, титаномагнетитовые россыпи, континентальная окраина, Сахалинская область, петрогенезис, железистые минералы, титан, ванадий, акцессорные элементы-примеси, экономическая эффективность.

Введение

Практически все железосодержащие минералы (за исключением гидроокислов) обладают повышенной плотностью, а потому способны накапливаться в россыпях [1]. Эти минералы зачастую составляют основную массу «черного шлиха» (например, пирит и гематит, магнетит в золотых россыпях, магнетит и перовскит в редкометалльных россыпях карбонатитового комплекса, магнетит и титаномагнетит во многих комплексных прибрежно-морских россыпях). При этом только титаномагнетит может рассматриваться в качестве ведущего россыпеобразующего минерала, формирующего самостоятельные промышленные месторождения.

Титаномагнетитовые россыпи, или так называемые «железистые пески», за редким исключением, относятся к прибрежно-морским россыпям (ПМР), которые отличаются относительной однородностью и простотой минерального состава. В

иностранный геологической литературе для них часто применяется термин «черные пески», хотя иногда он употребляется и для обозначения всех типов темных песков вулканического происхождения. Железистые пески стали широко известны в XIX в. в связи с добычей из них золота [2].

Промышленным минералом железистых россыпей является титаномагнетит – комплексное сырье на железо и титан; полезную примесь в титаномагнетитах ПМР составляет также ванадий [3]. В связи с наличием технологических сложностей извлечения титана из титаномагнетитовых концентратов россыпей из них, в первую очередь, получают железо и ванадий.

Распространение россыпных месторождений железистых песков

Наиболее крупные и лучше всего изученные месторождения железистых песков расположены

в Новой Зеландии (Уонгануи, Мокау). При этом около 98 % их потенциальных запасов сосредоточено в отмелях и в дюнах западного побережья Северного острова на участке Уонгануи–Муривай. Запасы отдельных россыпей превышают 200–250 млн т рудного концентрата при среднем содержании в нем до 70 % титаномагнетита.

Другая, менее богатая, провинция развития отложений с содержанием в железо-титан-оксидах железа 23–60 % и диоксида титана – 10–12 % находится в Японии, на берегах Хонсю (Ома, Чикагава), Хоккайдо (р-н Саппоро), Кюсю (Фукуока) [4, 5]. К этой группе можно отнести россыпи с высокой концентрацией минералов железа на Курильских островах и Камчатском полуострове.

Третье по значению в мире место распространения ПМР с железосодержащими химическими соединениями – Индонезия, где внушительные образования данного типа встречаются на юге Явы (Силакеп, Джокьякарта, Джампанг-Кулон), Южного Флореса, Бали, Суматры. В Океании аналогичные объекты распространены на Гибридах, Соломоновых (Ранонг и Бугенвиль) и других островах. Крупнейшие россыпи занимают прибрежную зону Филиппин – о. Лусон (более 200), более мелкие сосредоточены на Минданао, Палаване, Нагресе и Лейте [6, 7].

Обработка титаномагнетитовых и магнетитовых ПМР периодически возобновляется в связи с добычей золота близ г. Лос-Анжелеса (США). Другие, более бедные, скопления россыпного материала известны в пределах Алеутской дуги на Кадьяке. Менее значительные залежи железо-титан-оксидных минералов обнаружены также в Карибском бассейне, в Африке – в Марокко и в Мозамбике, в Европе – в Португалии, Италии, Болгарии (г. Бургас).

Общие сведения о формировании железистых россыпей и их основных типах

В большинстве случаев наблюдается четкая взаимосвязь железосодержащих титаномагнетитовых россыпей с вулканогенно-осадочными комплексами областей андезитового магматизма активных континентальных окраин [8, 9].

Железистые ПМР формируются из разрушенного пирокластического материала, выносимого реками и малыми водотоками, либо поступают непосредственно в зону пляжа в результате абразии морских берегов. В волноприбойной зоне происходит перераспределение и сепарация материала. Следующая стадия метаморфоз с отложениями – их переход в террасовые и дюнные россыпи при подъеме суши, либо в подводные – при затоплении древних береговых линий при подъеме уровня моря.

Генетическая позиция титаномагнетитовых россыпей в минералогическом плане – следствие двух факторов: а) миграционных свойств самого минерала (довольно высокая химическая стойкость и абразивная устойчивость при плотности 5–5,6 г/см³), обуславливающих возможность его

концентрации в высокоэнергетических условиях волноприбойной зоны окраинных морей; б) региональной позиции коренных источников, тяготеющих к континентальным окраинам. Именно тип коренного источника определяет важнейшие черты минерального состава железистых россыпей, что подтверждается при ситовом анализе состава концентратов. В свою очередь в зависимости от минерального состава выбираются рациональные схемы обогащения россыпного материала.

В.П. Петелин выделил прибрежно-морские россыпи в качестве самостоятельного класса [10]. При этом были обособлены три типа железистых пляжевых россыпей, которые имеют разнообразные источники питания и позволяют получить концентрат определенного минерального и химического состава:

- титаномагнетитовые ванадиеносные россыпи андезитового пояса, относительно низкотитанистые (8–10 % TiO_2 и до 0,5 % V_2O_5 в титаномагнетите) – месторождения Курил, Камчатки в России, Новой Зеландии, Японии.
- титаномагнетитсодержащие – смешанного комплекса – западное побережье Америки, Суматра, в России – Приморье.
- титаномагнетитовые – океанических островов, высокотитанистые (до 14 % TiO_2 в титаномагнетите), с низким содержанием ванадия (0,16 % V_2O_5) – острова Гавайские и Океании.

Объекты исследования: титаномагнетитовые россыпи в Сахалинской области

Наиболее обширной областью развития титаномагнетитовых россыпей в России является побережье Дальневосточных морей, где они распространены на огромной территории от Камчатки до юга Приморья. На территории Сахалинской области расположена Курило-Камчатская провинция собственно титаномагнетитовых россыпей, образованных при дезинтеграции туфогенных пород островодужного комплекса. На ее побережьях встречаются два типа россыпей с различными условиями питания. Главную роль в питании россыпей провинции играют туфопесчаники, пемзы и пемзово-шлаковые пирокластические толщи, которые наряду с лавами слагают конусы стратовулканов, а также имеют широкое распространение в виде пелловых отложений [11].

Как правило, петрографические особенности размываемых пород определяют их россыпеобразующие свойства. Так, преобладание вулканитов среднего и основного состава порфировой структуры служит надежным критерием для выделения наиболее вероятных коренных источников железистых ПМР. Тонкозернистые афанитовые разновидности пород также подвержены более быстрому высвобождению титаномагнетита, нежели порфировые лавы [12–14].

На о-вах Курильской дуги преобладают современные пляжевые россыпи и дюнные россыпи низкой террасы. На юге западного побережья Камчат-

ки все россыпи связаны только с древними береговыми линиями, а на восточном побережье в питании россыпей важную роль играют промежуточные коллекторы – мощные (до 2000 м) песчано-галечные осадки аллювиального и прибрежно-морского генезиса; по данным Л.Б. Хершберга, не исключено также присутствие погребенных титаномагнетитовых ПМР.

Результаты исследования и их обсуждение

Железо-титан-оксидные минералы являются широко распространенными рудными минералами среди акцессориев в коренных источниках россыпей – породах островодужных комплексов. Среди природных оксидов выделяются минералы серий твердых растворов окислов $\text{FeO-Fe}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ [15, 16]. По составу Fe-Ti-оксиды разделяются на три серии: титаномагнетитовую, гематитовую и псевдобрукситовую [17]. Содержание V в минералах хорошо коррелируется с содержанием Ti.

Нами были исследованы железо-титан-оксидные минералы из различных по кремнекислотности и специфике магматических пород типичных островодужных комплексов Большой Курильской гряды (БКГ).

В базальтах и андезитобазальтах раннемиоценового вулканического комплекса БКГ среди акцессориев преобладает титаномагнетит. Иногда он является существенной составляющей основной массы обломков лавобрекчий (до 4 %). Размер зерен достигает 0,1 мм. Форма их изометричная, кубическая, ромбоэдрическая, нередко скопления зерен.

В базальтах с невысокой кремнекислотностью (<50 % SiO_2) зерна титаномагнетитов встречаются в основной массе, форма их неправильная, размеры не превышают 150–300 мкм. С повышением кремнекислотности до 53 % и выше кристаллы титаномагнетитов приобретают более ровные очертания и правильную изометричную форму. Состав зерен, как правило, гомогенный. Наличие структур распада отмечается в крупных изометричных зернах. Ильменитовые ламеллы обычно очень редкие и тонкие (до 1 мкм). Отмечаются включения плагиоклазов в кристаллах титаномагнетита.

Железо-титан-оксиды в базальтах позднемиоценового комплекса представлены мелкими точечными выделениями титаномагнетита размером до 0,02 мм в основной массе породы, а также мелкими скелетными образованиями магнетита. В двупироксеновых базальтах кроме вкраплений титаномагнетита в основной массе отмечаются зерна размером 0,2–0,3 мм неправильной формы с неровными очертаниями. Содержание Fe-Ti-оксидных минералов в базальтах не превышает 1 %. С повышением кремнекислотности до 53 % количество титаномагнетита увеличивается до 3–4 %, он распространён равномерно в виде зерен размерами от 0,1 до 0,16 мм, разнообразной формы – неправильной, октаэдрической, изометричной, с зазубренными очертаниями, иногда встречаются скопления зерен и их сростки.

Железо-титан-оксидные минералы базальтов и андезитобазальтов плиоценового структурно-формационного комплекса представляет преимущественно магнетит. Кристаллы раннего магнетита в основной массе имеют изометричную, приближенную к округлой форму (размером 0,2×0,4 мм), реже – октаэдрическую. Некоторые зерна имеют причудливо изрезанные очертания, несут следы резорбции. К ранним образованиям относятся и включения титаномагнетита в кристаллах P1 и Amf размером до 0,1 мм. Крупные кристаллы титаномагнетита с неровными очертаниями содержат включения P1, Pх. Часто они образуют скопления и сростки.

В пироксенах базальтов включения титаномагнетита редки, размер их не превышает 0,2 мм. Во многих образцах пироксен-плагиоклазовых базальтов ферриты-оксиды отсутствуют вовсе, иногда в основной массе наблюдаются скелетные выделения титаномагнетита. Поздние мелкозернистые зерна распространены в основной массе равномерно в отличие от крупных зерен, приуроченных к участкам с преобладанием фенокристаллов. Форма мелких зерен остроугольная, прямоугольная, ромбовидная, неправильная. Преобладают размеры от 0,01 до 0,03 мм. Иногда кристаллы образуют сростки.

Базальты плейстоцен-четвертичного вулканического комплекса наиболее распространены в Западной зоне Большой Курильской гряды. Особое внимание при изучении было уделено характерным для этой зоны базальтам вулкана Алайд, в которых железо-титан-оксидные минералы представлены преимущественно титаномагнетитом, изредка встречаются хромшпинелиды. Титаномагнетитов в основной массе содержится до 5–6 % от объема породы. Размер их зерен не превышает 0,1 мм. Форма их преимущественно правильная, нередко скопления зерен.

В андезитах раннемиоценового комплекса титаномагнетит представлен несколькими генерациями. В цементе конгломерато-брекчий отдельные зерна размером до 0,3 мм и их скопления имеют прямоугольную, изометричную или неправильную форму, волнистые или слабо изрезанные очертания. В основной массе обломков содержатся редкие вкрапления титаномагнетита (до 4,5–6,0 %), довольно мелкие ромбовидные, изометричной формы, размером до 0,02 мм. Во вкраплениях плагиоклаза и клинопироксена мелкие зерна титаномагнетита достигают величины 0,1 мм.

Титаномагнетиты андезитов позднемиоценового комплекса преимущественно гомогенные, имеют внутри крупных кристаллов включения P1 и Pх. Иногда это крупные и редкие включения, в некоторых случаях отмечается их приуроченность к центру зерен. Силикаты заполняют трещины в титаномагнетитах. В основной витрофировой массе андезитов магнетиты редки.

В вулканических образованиях плиоценового комплекса, отличающихся слабой дифференциро-

ванностью и постоянством состава, титаномагнетит не имеет большого разнообразия как форм выделения, так и химического состава. Кристаллы титаномагнетита имеют ровные очертания, изометричную либо октаэдрическую форму. Состав зерен гомогенный. Пластины структур распада очень тонкие и едва различимы при увеличении в 500 раз лишь в некоторых кристаллах, что свидетельствует о хорошей сохранности кристаллов. Изредка встречаются небольшие включения силикатов.

В андезитах плиоценового комплекса титаномагнетит равномерно распределен в основной массе в мелких зернах размером до 0,1 мм. В гломеропорфировых сростках зерна титаномагнетита несколько крупнее (0,1–0,5 мм).

В андезитобазальтах плейстоцен-четвертичного комплекса Fe-Ti-оксиды представлены магнетитом, титаномагнетитом, изредка магнезиоферритом. Их общее количество не превышает 7 % объема породы. Зерна довольно мелкие и не превышают размером 0,02 мм. Форма их чаще неправильная, в породе присутствует много сростаний.

В андезитах и дацитах кальдерных вулканов плейстоцен-четвертичного комплекса ферриты-оксиды представлены титаномагнетитами и ильменитами. Под микроскопом наблюдается существенная неоднородность состава. Присутствуют многочисленные ильменитовые ламмели в магнетите различной толщины, в составе ильменита также присутствуют включения магнетита и гематита. Иногда наблюдаются игольчатые включения в ламмелях, представленные, по всей видимости, псевдобрукитом или рутилом. Проанализировать состав включений не удалось.

Андезиты четвертичных внутрикальдерных стратовулканов хорошо изучены на примере пород кальдеры Медвежьей. Они являются наиболее характерными представителями пород плейстоцен-четвертичного комплекса в целом. Для исследования были отобраны железо-титан-оксидные минералы из образцов, любезно предоставленных В.Ф. Остапенко. Внешний облик кристаллов титаномагнетита довольно разнообразен. Форма кристаллов изменяется от неправильной до изометричной и хорошо ограненной. Кристаллы неправильной формы имеют волнистые очертания, реакционную кайму, прорастания силикатов на значительную глубину по трещинам. Во многих зернах обнаружены включения силикатов. Внутреннее строение изменяется от гомогенного до изобилующего пластинками распада различной толщины – от едва различимых при больших увеличениях до очень крупных.

Формы выделения кристаллов титаномагнетита бывают разными в зависимости от различия условий охлаждения лавовых потоков. В лавовом потоке вулкана Атсонупури, вошедшем перед застыванием в воду, отмечены мелкие скелетные образования титаномагнетита.

В раннемиоценовых туфах основного и среднего состава Fe-Ti-оксиды в основной массе встреча-

ются редко, размеры их не превышают 0,25 мм в поперечнике, представлены титаномагнетитом. В некоторых зернах наблюдается сростание титаномагнетита с силикатами. Размеры отдельных зерен в скоплениях достигают 1 мм. Форма их неправильная. Иногда по периферии минералы оконтуриваются тонкой пленкой гидроокислов железа. Содержание титаномагнетита в основных и средних туфах раннемиоценового комплекса изменяется от 2 до 5 %. В породах отмечается несколько его разновидностей:

- 1) В составе эффузивного материала в базисе обломков андезитобазальтов встречаются кристаллы титаномагнетита изометричной, округлой формы с волнистыми или зубчатими очертаниями размерами 0,1–0,16 мм. В обломках андезитов вкрапленники титаномагнетита ассоциируют с темноцветными минералами. Кристаллы в пироксене изометричны, с ровными очертаниями, часто октаэдрического габитуса, размером до 0,16 мм. Иногда вокруг зерен Rх образуются скопления титаномагнетитовых кристаллов величиной до 0,2 мм. В основной массе эффузивных обломков, как правило, распылен мелкий (размером 0,01–0,02 мм) титаномагнетит. Некоторые крупные зерна содержат мелкие (до 0,01 мм) минералы-узники плагиоклаза, реже – пироксена.
- 2) Среди обломков минералов в основной массе пироксены распространены меньше, чем плагиоклаз. Обычно они содержат включения титаномагнетита размером до 0,1 мм.
- 3) Значительное количество железо-титан-оксидных минералов наблюдается в цементирующей стекловатой массе. Преобладают мелкие (до 0,1 мм) зерна. В андезитодацитовых туфах, в цементе без какой-либо закономерности располагаются сравнительно крупные (0,2–0,3 мм) зерна титаномагнетита, иногда они образуют скопления, в некоторых случаях вокруг обломков кристаллов пироксена. Форма вкрапленников разнообразная, чаще неправильная, с волнистыми очертаниями, встречаются включения плагиоклаза и пироксена.
- 4) В порах и трещинах обломков пород, выполненных палагонитом или кальцитом, окаймленных свежим стеклом, наблюдаются кристаллы магнетита октаэдрического и кубического габитуса, размерами до 0,1 мм, приуроченные к зонам стеклянноточечки.

В туфах основного и среднего состава плиоценового комплекса Fe-Ti-оксиды, естественно, имеют несколько генераций:

- 1) В основной стекловатой массе распространены мелкие зерна, которые концентрируются вокруг микролитов и вкрапленников Rх, образуют сростки магнетитовых зерен, а также скопления сростков.
- 2) В обломках кристаллов P1 и Rх содержатся мелкие включения магнетита размерами до 0,02 мм.

- 3) В основной массе обломков базальта содержатся крупные зерна титаномагнетита размерами до 0,25 мм.
- 4) В основной массе обломков андезитов содержатся мелкие (до 0,01 мм), пылеватые включения титаномагнетита.

В породах раннемиоценового комплекса нами обнаружены самостоятельные зерна ильменитов и гематитов. Состав титаномагнетитов обычно гомогенный. Встречаемые в них пластины структур распада очень тонкие и едва различимы при увеличении в 500 раз в некоторых кристаллах.

В породах вулканических комплексов БКГ минералы гемоильменитовой серии твердых растворов окислов встречаются значительно реже, чем титаномагнетиты. Крайние члены ряда в чистом виде встречаются исключительно редко. При высоких температурах наблюдается значительная растворимость гематита и ильменита. Кроме того, при наличии даже небольшого окисления ульвошпинель быстро переходит в ильменит. Часто образуется мирмецит из магнетита и ильменита.

Во многих зернах титаномагнетита из андезитов внутрикальдерных стратовулканов наблюдаются изменения его структуры от гомогенной до изобилующей пластинками распада различной толщины – от едва различимых до очень крупных.

Ильменит встречается в породах как в виде самостоятельных зерен в основной массе, включений во вкрапленниках, так и в качестве пластинок распада твердых растворов в титаномагнетитах и имеет различный химический состав.

Гематит в вулканиках образует псевдоморфозы по магнетиту.

В андезите позднемиоценового комплекса исследовался магнетит с ильменитовыми пластинками распада. Наличие тонких ильменитовых ламмелей (до 1 мкм) также отмечено в андезитах позднемиоцен-плейстоценовой фазы вулканизма. В андезито-дацитах комплекса встречаются равномерно распределенные в витрофировой, флюидальной основной массе сферические и таблитчатые образования (до 0,06 мм) лейкоксенизированного ильменита.

Среди ферритов-оксидов в дацитах раннемиоценового комплекса преобладает титаномагнетит. Его зерна имеют ровные, реже зазубренные очертания (размер колеблется в пределах 0,08–0,25 мм). Закономерностей в распределении по объему не наблюдается. Количество железо-титан-оксидных минералов в породе не превышает 1–2 %. В риолитах их количество увеличивается в местах скопления вкрапленников. Иногда титаномагнетиты ассоциируют с кристаллами сфена. В риодацитах мыса Столбчатого по всему объему породы равномерно распределены скопления кристаллов P1, Crx и титаномагнетита. По морфологии минералы в скоплениях идентичны минералам вкрапленников. Наблюдаемые скопления можно объяснить наличием кристаллизационной дифференциации магматического расплава.

Fe-Ti-оксиды в дацитах и риодацитах раннемиоценового комплекса в основном ассоциируют с темноцветными минералами и плагиоклазом. Как правило, их размеры не превышают 0,1 мм. Мелкодисперсный титаномагнетит распылен в основной массе породы.

В дацитах раннемиоценового комплекса титаномагнетиты встречаются также в виде относительно крупных (>0,4 мм) включений в пироксенах, а также очень мелко распылены в базисе породы, иногда образуют скопления. Они изобилуют тонкими пластинками структур распада.

В дацитах и риодацитах позднемиоценового комплекса размеры титаномагнетитов во вкрапленниках невелики (до 0,2 мм), а в основной массе распространена мелкая магнетитовая «сыпь».

В дацитах плейстоцен-четвертичного комплекса железо-титан-оксидные минералы представлены большим видовым разнообразием. В некоторых образцах содержится лишь небольшое количество магнетита, вкрапленного в силикатные минералы. В других, кристаллизующихся на более поздних стадиях, образуются каркасные титаномагнетиты с прорастанием ламмелей ильменита. В некоторых зернах титаномагнетита ламмели едва различимы при больших увеличениях, в других – образуют мощные прорастания, иногда включающие игольчатые включения высокотитанистых фаз твердых растворов окислов.

В дацитах и риолитах, отобранных в кальдере вулкана Головнина, пемзовых отложениях Ветрового перешейка, а также с экструзивного купола вулкана Менделеева, железо-титан-оксидные минералы представлены в основном титаномагнетитами и ильменитами. Очертания кристаллов ровные. Величина зерен 0,02–0,03 мм. Практически все титаномагнетиты кислых пород имеют гомогенный состав с крупными редкими вкрапленниками силикатов. Иногда по всему зерну распространены включения силикатов. В дацитах вулкана Головнина встречен титаномагнетит со структурами распада различной толщины.

Ильмениты были выделены для анализов также из дацитов и риолитов комплекса. Преимущественно это мелкие (до 0,06 мм), таблитчатые кристаллы, распределенные в основной массе пород.

Титаномагнетиты в кислых туфах раннемиоценового комплекса очень мелкие (менее 0,01 мм), рассредоточены преимущественно в основной массе породы. В основной массе обломков зерна титаномагнетита крупные (до 0,2 мм), гомогенные, с четкими краями, в основной массе андезитов – мелкие, с тонкими пластинками структур распада, многочисленными включениями силикатов, как сферической, так и неправильной формы, с трещинами, заполненными силикатной массой.

В кислых туфах титаномагнетит часто встречается в плагиоклазах в качестве включений неправильной формы с резорбционными контурами размером 0,08×0,2 мм, а также в виде изометричной формы включений в Pх размером до 0,1 мм. В ос-

новой массе породы форма кристаллов титаномагнетита неправильная, изометричная, размерами до 0,25 мм. Титаномагнетит, ассоциирующий с вкрапленниками плагиоклаза и пироксена в гломеропорфировых сростках, часто имеет неправильную форму.

Химический состав железо-титан-оксидных минералов

Химический состав титаномагнетитов в россыпях идентичен составу таковых в породах коренных источников россыпей (таблица). Более подробную информацию о химическом составе титаномагнетитов в породах БКГ можно получить в наших работах [3, 13, 14].

Анализ элементов-примесей в титаномагнетитах проводился спектральным способом в лаборатории спектрально-химических методов ДВГИ ДВО РАН по методике, разработанной Т.В. Ланковой [18].

Природные хромшпинелиды, представленные твердыми растворами магнезиальных и железистых разностей хромита, шпинели, титаномагнетит и ульвошпинель, – типичные продукты эндогенного минералообразования, связанные главным образом с основными и ультраосновными породами. Они являются акцессорными минералами для большинства базальтов и некоторых более кислых пород, вплоть до гранитоидов. Будучи устойчивыми к гипергенным процессам, хромшпинелиды хорошо сохраняются в коре выветривания и могут переотлагаться в пляжевые и донные отложения [19, 20], которые со временем превращаются в обломочные и обломочно-осадочные породы (от гравелитов до глин). Второстепенное значение имеют хромшпинелиды в прибрежно-морских и дельтовых песках, которые на Курилах встречаются исключительно редко.

Титаномагнетиты преобладают в россыпях и составляют от 10–15 до 70–90 %, в среднем 20 %. Размер зерен обычно не превышает 0,25 мм. Поверхность граней минералов покрыта кавернами и выбоинами. Почти все зерна имеют тонкую оболочку из вулканического стекла толщиной в сотые и тысячные доли миллиметров.

Особенностью титаномагнетитовых минералов островодужных россыпей является присутствие в них значительного количества титана в качестве изоморфной примеси, входящей в состав кристаллической решетки. Повышенное содержание титана приводит к образованию в кристаллах титаномагнетита структур распада – ильменитовых ламелей. Самостоятельные гемоильменитовые зерна имеют пластинчатую или таблитчатую форму. Их размеры 0,1–0,2 мм.

В большинстве случаев в них содержится от 7 до 11 % TiO_2 . В некоторых минералах наблюдается повышенное содержание Al_2O_3 (8,19 % в обр. 631д) и MgO (5,26 % в том же образце). Обычно содержание Al_2O_3 и MgO находится в пределах 1–2 %, MnO – от 0,5 до 1,5 %.

Таблица 1. Химический состав титаномагнетитов из прибрежно-морских россыпей Большой Курильской гряды (окислы и Ti в %, микроэлементы в г/т) [13]

Table 1. Chemical composition of titanomagnetites from coastal-marine placers of the Great Kuril ridge (oxides and Ti, %, trace elements, g/t) [13]

| Проба/Sample | 632б | 632г | 626г | 631д | ПР-1 | 615г | РО-9 | 634в |
|---|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|
| Хим. элементы и окислы Elements and oxides | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| TiO_2 | н.о. | 7,20 | н.о. | 8,19 | н.о. | 8,86 | н.о. | 11,83 |
| Al_2O_3 | н.о. | 1,80 | н.о. | 1,71 | н.о. | 1,77 | н.о. | 1,29 |
| Fe_2O_3 | н.о. | 51,19 | н.о. | 44,38 | н.о. | 44,09 | н.о. | 43,71 |
| FeO | н.о. | 36,24 | н.о. | 38,35 | н.о. | 40,75 | н.о. | 39,39 |
| MnO | н.о. | 0,92 | н.о. | 1,04 | н.о. | 0,74 | н.о. | 0,57 |
| MgO | н.о. | 1,52 | н.о. | 5,26 | н.о. | 1,45 | н.о. | 1,37 |
| Cr_2O_3 | н.о. | 0,08 | н.о. | 0,12 | н.о. | 0,04 | н.о. | 0,01 |
| Сумма | | 98,95 | | 99,05 | | 97,70 | | 98,17 |
| Cr | 140 | 250 | 100 | 300 | 48 | 93 | 76 | 300 |
| Mn | 3500 | 4800 | 3400 | 3400 | 3400 | 4700 | 3700 | 4200 |
| V | 2400 | 2700 | 2300 | 3000 | 2200 | 3000 | 2200 | 3500 |
| Ti | 4,7 | 5,5 | 5,4 | 4,2 | 4,0 | 4,5 | 3,3 | 6,0 |
| Co | 120 | 210 | 140 | 130 | 120 | 180 | 160 | 210 |
| Ni | 24 | 37 | 22 | 60 | 23 | 26 | 23 | 47 |
| Zr | 100 | 87 | 95 | 57 | 64 | 72 | 100 | 72 |
| Zn | 630 | 910 | 910 | 480 | 480 | 500 | 370 | 710 |
| Cu | 23 | 43 | 19 | 65 | 48 | 50 | 42 | 55 |
| Sn | 30 | 50 | 21 | 26 | 14 | 25 | 21 | 50 |

Примечание: 1 – пляж у м. Водопадного (о. Кунашир); 2 – там же; 3 – пляж севернее п. Южно-Курильск; 4 – пляж в бухте Парусной (о. Итуруп), 5 – перешеек Ветровой (о. Итуруп), 6 – севернее устья р. Серной (о. Итуруп), 7 – прибрежная россыпь рейда Открытого (о. Уруп), 8 – пляж в 300 м южнее м. Четверикова (о. Кунашир). н.о. – элемент не определялся.

Additional notice: 1 – beach near Vodopadny cape (Kunashir island); 2 – ibid; 3 – beach to the north from Yuzhno-Kurilsk village; 4 – beach in the Parusnaya Bay (Iturup island), 5 – Isthmus Vetrovoy (Iturup island), 6 – to the north from mouth of the river Sernaya (Iturup island), 7 – Coastal placer of the Otkryty roadstead (Urup island), 8 – beach in 300 m to the south of Chetverikova cape (Kunashir island). н.о. – this element has not been defined.

По результатам спектрального химического анализа можно относительно достоверно оценивать среднее содержание микроэлементов в титаномагнетитовых россыпях. В среднем они содержат (г/т): Cr от 50 до 300; Mn – 3400–4800; V – 2200–3500; Co – 120–210; Ni – 23–60; Zr – 57–100; Zn – 480–910; Cu – 23–65; Sn – 14–50.

Химический состав минералов изменяется даже в пределах одной россыпи, особенно в отношении полезных компонентов. По данным анализа бороздовых проб, отобранных на Ручарском месторождении (о. Итуруп), содержание железа в песках колеблется от 14 до 46 %, двуокиси титана – от 1,6 до 8 %, пятиокиси ванадия 0,03 до 0,08 %.

Перспективы освоения месторождений сырья, содержащего железо, титан, ванадий

В результате вулканических процессов при формировании островодужных комплексов на земную поверхность были выведены эффузивные и

пирокластические породы, массовый источник титаномагнетата, Fe-Ti-V минерализации.

Нетрудно заметить, что пирокластические и эффузивные породы меловых, третичных и четвертичных вулканитов островных и окраинных поясов – исходный источник питания промежуточных коллекторов и конечных россыпей. Вулканы играют роль дробильных установок, производя туфы и туффиты, пемзы, песфиты и псаммиты. Содержание свободного обломочного и кристаллического сросткового титаномагнетита колеблется в них от 1 до 6 %.

Продуктивные породы петрохимически характеризуются повышенным содержанием железа (>15 % FeO+Fe₂O₃), титана (>1 % окиси титана), пятиокси ванадия. Базальты, андезитобазальты и андезитовые лавы также содержат вкрапленный титаномагнетит гравитационной (>0,1 мм) размерности в количествах 1–5 %, т. е. 25–300 кг/м³. Абразивные клифы, вырабатываемые в таких породах трансгрессирующим морем, поставляют рудный материал для «черных песков».

Объемы вулканитов Курил, Камчатки, Охотско-Чукотского вулканического пояса составляют млн км³, и каждый км³ породы по численным оценкам заключает 50 тыс. т титаномагнетита [12].

В период с 1986 по 1994 гг. свойства железотитан-оксидных минералов Курильских островов, а также возможности их переработки изучались в

лаборатории петрологии и геохимии Института морской геологии и геофизики ДВО РАН [13].

В 1992 г. Сахалинской ГРЭ проведено геологическое доизучение месторождений, в 1992–94 гг. АО «Дальморгеология» выполнены ревизионно-оценочные работы с целью изучения технологических свойств песков прибрежно-морских россыпей о. Итуруп [21].

По оценке А.Г. Лапшина запасы песка категории С2 в западной части наиболее крупного Ручарского месторождения, отнесенные к забалансовым при среднем содержании в них железа – 12,83 % и TiO₂ – 2,11 %, по действующим условиям можно отнести к балансовым. Запасы Ручарского месторождения по песку по этим данным превысили по категориям С1 и С2 30 000 тыс. т.

Суммарные запасы категории С2 Рейдовского месторождения составят, в таком случае, по пескам – 30 102 тыс. т, по железу – 4 685,1 тыс. т, TiO₂ – 804,3 тыс. т. [22].

Рейдовское месторождение (рисунок) рекомендовано для детальной разведки, Ветровое месторождение – для разведочных работ при условии вовлечения в эксплуатацию Ручарского и Рейдовского месторождений [23].

Обогащение титаномагнетитового концентрата из прибрежно-морских россыпей позволяет свести к минимуму самую дорогостоящую операцию переработки сырья – дробление – которая неизбежна



Рисунок. Пляжевая Рейдовская россыпь. На заднем плане вулканы Богдан Хмельницкий и Чирип (о. Итуруп, Курильские острова)

Figure. Beach of Reydovskaya placer. Bohdan Khmelnytsky and Chirip volcanoes are on the background (Iturup island, Kuril Islands)

при его извлечении из коренных пород [24, 25]. Выявлено, что дробление пород до крупности 0,074 мм приводит к тому, что производство титаномагнетитового концентрата на Качканарском ГОКе в 3–4 раза дороже добычи аналогичного концентрата на Курильских островах.

Первые технологические испытания титаномагнетитовых песков в России были проведены в 1970 г., когда в заливе Простор (о. Итуруп) была отобрана технологическая проба титаномагнетитового концентрата массой 500 т из песков с содержанием железа 8 %. Концентрат, полученный при помощи магнитной сепарации, содержал 48,6–53,0 % Fe и имел рабочую влажность 1,45–2,10 % [26].

В 1993 г. в НИПИ «Уралмеханобр» под руководством Г.В. Зайцева были выполнены технологические испытания титаномагнетитовых песков с Ручарского месторождения. Был получен концентрат проб черных и серых песков с массовой долей железа – 57,8–58,1 %, диоксида титана – 10,0–10,1 % и пентаоксида ванадия – 0,048 %. Доизмельчение концентрата руды производилось в шаровых мельницах. Для получения однородной крупности применялись механические классификаторы. Измельченный продукт подавался на магнитные сепараторы.

В 1993 г. институтом ГИРЕДМЕТ из Ручарских песков получен титаномагнет-ильменитовый концентрат с содержанием TiO_2 на уровне 23–24 %.

Для титаномагнетитовых концентратов могут применяться различные схемы переработки. При доменной плавке получают шлаки с содержанием около 10 % TiO_2 . Ванадий переходит большей частью в чугун (до 80 %), откуда он извлекается в шлак в конвертерах при продувке чугуна кислородом. Шлаки с содержанием 18–20 % V_2O_5 являются сырьем для производства феррованадия. Доменный передел концентратов при содержании более 4 % TiO_2 образует титанистые шлаки с содержанием более 10 % TiO_2 , которые делаются густыми и вязкими из-за появления тугоплавких карбонитридов титана, препятствующих нормальному процессу прохождения плавки. Выходом из положения является применение шихтовки с беститанистыми концентратами магнетитовых руд, а также плавка с добавлением магниезиальных флюсов [26].

Опытные работы металлургов по переработке титаномагнетитового сырья показали, что в промышленных масштабах могут применяться следующие методы: доменный передел, одностадийная электроплавка, плавка двухстадийным методом по схеме трубчатая печь – электропечь, метод прямого восстановления железа – Крупп-Ренн процесс, а также гидрометаллургический метод извлечения ванадия [27].

Наиболее полное комплексное извлечение компонентов из концентрата возможно при прямой электроплавке, когда любое содержание титана в шлаках не оказывает негативного влияния на работу печи. Чем выше содержание титана в шлаках, тем проще и дешевле извлечение из них титана.

Ванадий при плавке переходит в чугун, из которого может быть без труда извлечен. Двухстадийный метод плавки получает все большее распространение [28, 29]. Этим методом в настоящее время перерабатываются титаномагнетитовые концентраты железистых песков в Новой Зеландии [30].

Несмотря на успешные результаты технологических испытаний титаномагнетитовых песков в «Уралмеханобре» (Екатеринбург) под руководством Г.В. Зайцева еще в 1993 г. [27], выполненную технико-экономическую оценку перспективы получения железо-ванадиевых концентратов и рекомендации по широкомасштабному освоению титаномагнетитовых россыпей, перспективы их разработки остаются еще достаточно неопределенными из-за трудностей, связанных со сложностями транспортировки продукта с Курильских островов к металлургическим комбинатам. Следует заметить, что техника и технологии переработки сырья со времени проведенных исследований ушли далеко вперед [31–39].

Испытания проб титаномагнетитовых песков Ручарского месторождения показали, что в них содержится незначительное количество редкоземельных элементов (табл. 2). Таким образом, ценность сырья увеличивается только за счет относительно высокого содержания V_2O_5 – 0,49 %.

Таблица 2. Содержание редкоземельных элементов в пробах титаномагнетитовых песков Ручарского месторождения

Table 2. Content of Rare-Earth elements in Samples of titanomagnetite sands of Rucharsky deposit

| Элемент Element | Содержание Content, % | Метод анализа Method of analysis |
|-----------------------------|--------------------------|-------------------------------------|
| Скандий/Scandium (Sc) | 0,0011–0,009 | AES, MS |
| Иттрий/Yttrium (Y) | 0,0037–0,0038 | MS |
| Лантан/Lanthanum (La) | 0,00057–0,0006 | |
| Церий/Cerium (Ce) | 0,0018–0,0019 | |
| Празеодим/Praseodymium (Pr) | 0,0003–0,00033 | |
| Неодим/Neodymium (Nd) | 0,0019–0,0021 | |
| Самарий/Samarium (Sm) | 0,0006–0,00069 | |
| Европий/Europium (Eu) | 0,00008 | |
| Гадолиний/Gadolinium (Gd) | 0,00081–0,00082 | |
| Тербий/Terbium (Tb) | 0,00013 | |
| Диспрозий/Dysprosium (Dy) | 0,00072–0,00078 | |
| Гольмий/Holmium (Ho) | 0,00015–0,00016 | |
| Эрбий/Erbium (Er) | 0,00040 | |
| Тулий/Thulium (Tm) | 0,00006 | |
| Иттербий/Ytterbium (Yb) | 0,00036–0,00042 | |
| Лютеций/Lutetium (Lu) | 0,000052–0,00006 | |

Примечание: Испытания химического состава выполнены в Аналитическом сертификационном испытательном центре Всероссийского научно-исследовательского института минерального сырья им. Н.М. Федоровского. Методы анализа: масс-спектральный с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS); атомно-эмиссионный с индуктивно-связанной плазмой (ICP-AES).

Notes: Tests of Chemical composition were performed by Analytical certification test center of the All-Russian scientific-research institute of Mineral resources named after N.M. Fedorovsky. Methods of analysis: mass spectral with inductively coupled plasma (ICP-MS); atomic emission with inductively coupled plasma (ICP-AES).

Разведанные запасы месторождений на Курильских островах категорий C1+C2, по данным

Сахалинской геологоразведочной экспедиции, составляют: по пескам 65552 тыс. т, общему железу – 9824 тыс. т, диоксиду титана – 1584 тыс. т, прогнозные ресурсы на 15 россыпях оцениваются по пескам в 94488 тыс. т, железу общему – 13107 тыс. т, диоксиду титана – 1650 тыс. т [40].

Заключение

Основываясь на опыте формирования современного производственно-территориального комплек-

са на территории Сахалинской области, который сложился в результате привлечения инвестиций для интенсивной разработки месторождений минерального сырья, разведанных в период масштабных комплексных исследований, можно предположить, что в ближайшей перспективе инвестирование в доразведку, совершенствование технологий обогащения и промышленной переработки позволит организовать на островах рентабельное освоение россыпей железосодержащих минералов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Билибин Ю.А. Основы геологии россыпей. – М.; Л.: ГОНТИ. Гл. редакция горно-топлив. и геол.-развед. литературы. Тип. «Рабоч. Москва», 1938. – 505 с.
2. Stanaway K.J. Heavy Mineral Placers // *Mining Engineering*. – 1992 April. – V. 44. – P. 352–358.
3. Россыпные месторождения России и других стран СНГ (минералогия, промышленные типы, стратегия развития минерально-сырьевой базы) / Н.Г. Патык-Кара, Б.И. Беневольский, Л.З. Быховский, Л.Б. Зубков, А.А. Кременецкий, Е.В. Матвеева, В.А. Мелкий, В.Е. Минорин, А.Г. Мочалов, Н.М. Риндзюнская, Б.В. Рыжов, Л.В. Спорыхина, Е.А. Черемисина / отв. ред. Н.П. Лавёров, Н.Г. Патык-Кара. – М.: Научный мир, 1997. – 479 с.
4. Айнемер А.И., Коншин Г.И. Россыпи шельфовых зон Мирового океана. – Л.: Недра, 1982. – 263 с.
5. Kholodov V.N., Nedumov R.I., Golubovskaya E.V. Facies types of Sedimentary iron ore deposits and their geochemical features: Communication 1. Facies groups of Sedimentary ores, their Lithology, and Genesis // *Lithology and Mineral Resources*. – 2012. – V. 47. – № 6. – P. 447–472.
6. Минералогия и геохимия россыпей / отв. ред. Н.А. Шило, Н.Г. Патык-Кара. – М.: Наука, 1992. – 246 с.
7. Патык-Кара Н.Г. Минералогия россыпей: типы россыпных провинций. – М.: Учреждение Российской академии наук Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ РАН), 2008. – 528 с.
8. S'edin V.T., Piskunov Yu.G., Melkiy V.A. Titanium-magnetite sands of the Kuril islands // *Abst. Intern. Conference on the Seas of Japan and Okhotsk (Nakhodka, Sept. 1989)*. – Vladivostok: Publishing house of FEB of Academy Science of the USSR, 1989. – P. 76–77.
9. Мелкий В.А. Петромагнетизм пород базальтоидного вулканического комплекса острова Итуруп // *Актуальные вопросы геологии, геофизики и биологии (Материалы XVI конференции молодых ученых ИМГиГ)*. – Южно-Сахалинск, Изд-во ИМГиГ, 1990. – С. 41–50.
10. Петелин В.П. Основные типы пляжевых концентратов тяжелых минералов бассейна Тихого океана // *Океанология*. – 1964. – Т. 4. – Вып. 6. – С. 1052–1058.
11. Павлидис Ю.А. Некоторые особенности образования современных прибрежных отложений в пределах вулканического архипелага. На примере Курильских островов. – М: Наука, 1968. – 112 с.
12. Кутюлин В.А., Прусевич А.А. Геологические предпосылки для поисков титаномагнетитовых россыпей Татарского пролива. – Новосибирск: Изд-во Института геологии и геофизики СО АН СССР, 1984. – 152 с.
13. Мелкий В.А. Петрогенезис железо-титан-оксидных минералов в вулканических комплексах Большой Курильской гряды // Серия «Монографии ученых «Сахалинского государственного университета». – Южно-Сахалинск: Изд-во СахГУ, 2010. – 143 с.
14. Мелкий В.А. Петрогенетическая информативность железо-титан-оксидных минералов вулканических комплексов Большой Курильской гряды: дис.... канд. геол.-минерал. наук. – М., 1995. – 270 с.
15. Spenser K.J., Lindsley D.H. A solution model for coexisting iron-titanium oxides // *Amer. Miner.* – 1981. – V. 66. – № 11/12. – P. 1189–1202.
16. Solid-liquid phase equilibria of Fe-Cr-Al alloys and spinels / J.W. McMurray, R. Hu, S.V. Ushakov, D. Shin, A. Navrotsky // *Journal of Nuclear Materials*. – 2017. – V. 492. – P. 128–133.
17. Buddington A.F. Lindsley D.H. Iron-titanium oxide minerals and synthetic equivalents // *Journal of Petrology*. – 1964. – № 5. – P. 310–357.
18. Парагенезисы микроэлементов магнетита / С.А. Щека, А.Г. Пятков, А.А. Вржосек, Г.Б. Левашев, Р.А. Октябрьский // *Геохимия*. – 1978. – № 5. – С. 719–728.
19. Савичев О.Г., Домаренко В.А., Перегудина Е.В., Нгуен В.Л., Шалдыбин М.В., Канаки А.В. Минералого-геохимические особенности донных отложений малых рек в междуречье рек Ло и Кау (Северный Вьетнам) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328. – № 9. – С. 102–113.
20. Hou B., Keeling J., Van Gosen B.S. Geological and exploration models of beach placer deposits, integrated from case-studies of Southern Australia // *Ore Geology Reviews*. – 2017. – № 80. – P. 437–459.
21. Ревизионно-оценочные работы с целью изучения технологических свойств ильменит-магнетитовых песков итурупской группы прибрежно-морских россыпей в 1992–1994 гг. / Л.Б. Хершберг, Б.И. Вачаев, Е.М. Печникова, В.В. Хитров. – Партизанск: Дальморгеология, 1994. – 62 с.
22. Полезные ископаемые Сахалинской области / Р.Н. Гордина, Н.С. Макарова, Т.С. Разорителива, Л.Ф. Тузова, А.С. Шепелев / под. ред. А.М. Меренкова, Н.В. Галушка, В.Е. Горетого, В.И. Высочина, В.В. Медведева, Т.С. Разорителивой, А.С. Чибисова, Л.М. Чумакова. – Южно-Сахалинск: Сахалинское книжное издательство, 2002. – 120 с.
23. Мелкий В.А. и др. Экспертиза готовности существующих материалов геологического и технологического характера для постановки запасов Ручарского и Рейдовского месторождений ильменит-магнетитовых песков на государственный баланс. Отчет по договору 1-01-07-05. – Новокузнецк: ОАО «Евразурда», 2005. – 36 с.
24. Sanford L.P. Modeling a dynamically varying mixed sediment bed with erosion, deposition, bioturbation, consolidation, and armoring // *Comput. Geosci.* – 2008. – № 34. – P. 1263–1283.
25. Yoshikawa S., Nemoto K. The role of summer monsoon-typhoons in the formation of nearshore coarse-grained ripples, depression, and sand-ridge systems along the Shimizu coast, Suruga Bay facing the Pacific Ocean, Japan // *Marine Geology*. – 2014. – V. 353. – P. 84–98.
26. Резниченко В.А., Шабалин Л.И. Титаномагнетиты: месторождения, металлургия, химическая технология. – М.: Наука, 1986. – 295 с.

27. Зайцев Г.В. и др. Техничко-экономическая оценка технологии получения железо-ванадиевых концентратов и разработка рекомендации по снижению эксплуатационных затрат. – Екатеринбург, НИПИ «Уралмеханобр», 1994. – 93 с.
28. Gupta C.K., Krishnamurthy N. Extractive metallurgy of Vanadium (Process Metallurgy). – Netherlands: Elsevier Science Publishers B.V., 1992. – 690 p.
29. Gupta C.K. Chemical Metallurgy: Principles and Practice. – Weinheim: WILEY-VCH, 2003. 811 p.
30. Thomson S., Tin W. The Story of Corrugated iron in New Zealand. – Wellington: Steele Roberts, 2005. – 107 p.
31. Зайцев Г.В. Современные направления развития техники и технологии производства высококачественного железорудного концентрата с высокими технико-экономическими показателями // Стройка: Региональное издание. – 2006. – № 9. URL: <http://library.stroit.ru/articles/concentrat/index.html> (дата обращения: 11.03.2018).
32. Рощин В.Е., Асанов А.В., Рощин А.В. Возможности двухстадийной переработки концентратов титаномагнетитовых руд // Электрометаллургия. – 2010. – № 6. – С. 15–25.
33. Rapid selective extraction of V (V) from leaching solution using annular centrifugal contactors and stripping for NH_4VO_3 / X. Jing, J. Wang, H. Cao, P. Ning, Z. Sun // Separation and Purification Technology. – 2017. – V. 187. – P. 407–414.
34. Beneficiation studies of a difficult to treat iron ore using conventional and microwave roasting / S.S. Rath, N. Dhawan, D.S. Rao, B. Das, B.K. Mishra // Powder Technology. – 2016. – V. 301. – P. 1016–1024.
35. Смирнов Л.А., Кушнарев А.В. Современное состояние и перспективы титаномагнетитового ванадийсодержащего сырья в России // Черная металлургия. – 2013. – № 5 (1361). – С. 3–21.
36. Beneficiation of an iron ore fines by magnetization roasting and magnetic separation / J. Yu, Yu. Han, Ya. Li, P. Gao // International Journal of Mineral Processing. – 10 November 2017. – V. 168. – P. 102–108.
37. Asynchronous extraction of vanadium and chromium from vanadium slag by stepwise sodium roasting–water leaching / Li Hong-Yi, Fang Hai-Xing, Wang Kang, Zhou W. et al. // Hydrometallurgy. – 2015. – V. 156. – P. 124–135.
38. Application of ferrous pyrometallurgy to the beneficiation of rare earth bearing iron ores – a review / N. Faris, R. Ram, J. Tardio, S. Bhargava, M.I. Pownceby // Minerals Engineering. – 2017. – V. 110. – P. 20–30.
39. Comparative study of alkali roasting and leaching of chromite ores and titaniferous minerals / S. Parirenyatwa, L. Escudero-Castejon, S. Sanchez-Segado, Y. Hara, A. Jha – Hydrometallurgy. – 2016. – Volume 165. – Part 1. – P. 213–226.
40. Евсеев В.Ф., Речкин А.Н., Лапшин А.Г. Недр Сахалинской области / под ред. А.В. Тарасова. – Южно-Сахалинск: ООО «Изд-во Сахалин – Приамурские ведомости», 2013. – 120 с.

Поступила 18.04.2018 г.

Информация об авторах

Мелкий В.А., доктор технических наук, заведующий кафедрой геологии и нефтегазового дела, директор Технического нефтегазового института Сахалинского государственного университета.

Верхотуров А.А., кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры геологии и нефтегазового дела Технического нефтегазового института Сахалинского государственного университета.

UDC 550.8:552.1:502.3/7

PLACER OF IRON-BEARING MINERALS IN THE SAKHALIN REGION

Vyacheslav A. Melkiy¹,
vamelkiy@mail.ru

Alexey A. Verkhoturov¹,
ussr-91@mail.ru

¹ Sakhalin State University,
2, Pogranichnaya street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693023, Russia.

Yuriy A. Bilibin has repeatedly stressed that in order to understand the picture of the formation of placers, you need to know the full cycle of their transformations. Much attention has been paid in recent years to the problems of finding ancient buried placers and placers complex structure. The rich reserves of minerals in placers are explained by the multiplicity of their genetic types, which allow involving new deposits in commercial exploitation.

The relevance of the work is caused by the need to identify new sources of iron, titanium and vanadium in terms of reducing the resources of the mineral resource base. Exploration works performed to identify placers, the most promising for development, can be carried out on the basis of the awareness of the genesis of their formation.

The main aim of the research is to study the laws of distribution patterns of placers of ferrous minerals within the Sakhalin region, identify the petrogenetic features of the prevailing minerals, define the prospects of exploration of deposits of iron-containing raw materials, assess the economic expediency of their extraction.

The methods. We have researched iron-titanium-oxide minerals from different silicic-acidic rocks of island-arc volcanogenic complexes of Great Kuril String of islands. Thin sections of samples of rock and magnetic fraction of crushed samples were prepared. The thin sections of the rocks were studied under a polarizing microscope. Crushed samples of rocks and their monomineral fractions were studied by means of chemical analytical methods (gravimetric, titrometric, spectrophotometric, X-ray fluorescence, mass spectrometry with inductively coupled plasma).

The results. We have completed studies of the patterns of formation of ferruginous placers and identified their main types. There are two types of placers with different conditions of alimentation zone of minerals on the coasts of the Russian Far East. One of them – Kuril-Kamchatka province of placers actually titanomagnetite – is located on the territory of the Sakhalin region. The beach placers and dune deposits of low terraces dominate on the Islands of the Kuril Arc. The tuff-sandstone, pumice, and pumice-scoria pyroclastic deposits play the main role in delivering the minerals in placers of this type. Crystals of iron-containing minerals in rocks of volcanogenic complexes have rather different sizes: from small, dusty to large well-expressed crystals, more than 1–2 mm in size. The chemical composition of titanomagnetites of different volcanic complexes varies depending on silica acidity of rocks. Productive rocks are characterized by high content of iron, titanium and vanadium. Coastal-marine, as well as ancient buried placers contain significant amounts of iron-containing minerals. Studying of technological schemes of processing of iron-containing mineral raw materials showed that some of them would allow carrying out their processing with receiving the highly sought final products. Under certain economic conditions, the development of placers may be appropriate.

Key words:

Metalic natural resources, placers of titanomagnetite, continental margin, Sakhalin region, petrogenesis, ferrous minerals, titanium, vanadium, accessory elements-impurities, economic efficiency.

REFERENCES

1. Bilibin Yu.A. *Osnovy geologii rossyey* [Foundations of Geology of Placers]. Moscow, Leningrad, GONTI, Working Moscow, 1938. 505 p.
2. Stanaway K.J. Heavy Mineral Placers. *Mining Engineering*, April 1992, vol. 44, pp. 352–358.
3. Patyk-Kara N.G., Benevolsky B.I., Bykhovsky L.Z., Zubkov L.B., Kremenetsky A.A., Matveeva E.V., Melkiy V.A., Minorin V.E., Mochalov A.G., Rindzyunskaya N.M., Ryzhov B.V., Sporykhina L.V., Cheremisina E.A. *Rossynye mestorozhdeniya Rossii i drugikh stran SNG (minerageniya, promyshlennyye tipy, strategiya razvitiya mineralno-syrevooy bazy)* [Placer deposits of Russia and other countries of CIS (mineralogy, industrial types, strategy of development of mineral resource base)]. Eds. N.P. Laverov, N.G. Patyk-Kara. Moscow, Nauchny mir Publ., 1997. 479 p.
4. Aynemer A.I., Konshin G.I. *Rossyie shelfovykh zon Mirovogo okeana* [Placers of shelf zones of World ocean]. Leningrad, Nedra Publ., 1982. 263 p.
5. Kholodov V.N., Nedumov R.I., Golubovskaya E.V. Facies types of Sedimentary iron ore deposits and their Geochemical features: Communication 1. Facies groups of Sedimentary ores, their Lithology, and Genesis. *Lithology and Mineral Resources*, 2012, vol. 47, no. 6, pp. 447–472.
6. *Mineralogiya i geokhimiya rossyey* [Mineralogy and Geochemistry of placers]. Eds. N.A. Shilo, N.G. Patyk-Kara. Moscow, Nauka Publ., 1992. 246 p.
7. Patyk-Kara N.G. *Minerageniya rossyey: tipy rossypanykh provintsiy* [Mineral deposits of placers: types of placer provinces.]. Moscow, Establishment of Russian Academy of Sciences Institute of Geology of Ore deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry (IGEM RAS), 2008. 528 p.
8. S'edin V.T., Piskunov Yu.G., Melkiy V.A. Titanium-magnetite sands of the Kuril islands. *Abst. Intern. Conference on the Seas of Japan and Okhotsk*. Nakhodka, Sept. 1989. Vladivostok FEB of Academy Science of the USSR Publ. house, 1989, pp. 76–77.
9. Melkiy V.A. Petromagnetizm porod bazaltoidnogo vulkanicheskogo kompleksa ostrova Iturup [Petromagnetism of rocks of the basaltic volcanic complex of Iturup island]. *Aktualnye voprosy geologii, geofiziki i biologii. Materialy XVI konferentsii molodykh uchenykh IMGiG* [Actual problems of Geology, Geophysics and Biology. Proc. of the XVI conference of young scientists of IMGiG]. Yuzhno-Sakhalinsk, IMGiG Publ., 1990. pp. 41–50.

10. Petelin V.P. Basic types of beach concentrates of heavy minerals of the Pacific basin. *Oceanology*, 1964, vol. 4, Iss. 6, pp. 1052–1058. In Rus.
11. Pavlidis Yu.A. *Nekotorye osobennosti obrazovaniya sovremennykh pribrezhnykh otlozheniy v predelakh vulkanicheskogo arkhipelaga. Na primere Kurilskikh ostrovov* [Some features of formation of modern coastal sediments within the boundaries of the volcanic archipelago. On the example of the Kuril Islands]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 112 p.
12. Kutolin V.A., Prusevich A.A. *Geologicheskie predposylki dlya poiskov titanomagnetitovykh rossypey Tatarskogo proлива* [Geological background for search of titanomagnetite placers of the Tatar Strait]. Novosibirsk, Institute Geology and Geophysics SB Academy Science of the USSR Publ. house, 1984. 152 p.
13. Melkiy V.A. *Petrogenesis zhelezo-titan-oksidsnykh mineralov v vulkanicheskikh kompleksakh Bolshoy Kurilskoy gryady. Seriya «Monografii uchenykh «Sakhalinskogo gosudarstvennogo universiteta»»* [Petrogenesis of iron-titanium-oxide minerals in volcanic complexes of the Great Kuril ridge. Series «Monographs of Scientists "Sakhalin State University"»]. Yuzhno-Sakhalinsk, SakGu Publ., 2010. 143 p.
14. Melkiy V.A. *Petrogeneticheskaya informativnost zhelezo-titan-oksidsnykh mineralov vulkanicheskikh kompleksov Bolshoy Kurilskoy gryady*. Dis. Kand. nauk [Petrogenetic informativeness of iron-titanium-oxide minerals of Volcanic complexes of the Great Kuril Ridge. Cand. Diss.]. Moscow, MGU M.V. Lomonosov, 1995. 270 p.
15. Spenser K.J., Lindsley D.H. A solution model for coexisting iron-titanium oxides. *Amer. Miner.*, 1981, vol. 66, no. 11/12, pp. 1189–1202.
16. McMurray J.W., Hu R., Ushakov S.V., Shin D., Navrotsky A. Solid-liquid phase equilibria of Fe-Cr-Al alloys and spinels. *Journal of Nuclear Materials*, 2017, vol. 492, pp. 128–133.
17. Buddington A.F., Lindsley D.H. Iron-titanium oxide minerals and synthetic equivalents. *Journal of Petrology*, 1964, no. 5, pp. 310–357.
18. Shcheka S.A., Pyatkov A.G., Vrzhosek A.A., Levashev G.B., Oktyabrskiy R.A. *Paragenезisы mikroelementov magnetita* [Paragenesis of the trace elements in magnetite]. *Geochemistry*, 1978, no. 5, pp. 719–728.
19. Savichev O.G., Domarenko V.A., Peregodina E.V., Nguyen Van Luyen, Shaldybin M.V., Kanaki A.V. Mineral geochemical features of the Minor river sediments in the interfluvial area of the Lo and Kau rivers (Northern Vietnam). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 9, pp. 102–113. In Rus.
20. Hou B., Keeling J., Van Gosen B.S. Geological and exploration models of beach placer deposits, integrated from case-studies of Southern Australia. *Ore Geology Reviews*, 2017, no. 80, pp. 437–459.
21. Khershberg L.B., Vachaev B.I., Pechnikova E.M., Khitrov V.V. *Revizionno-otsenochnye raboty s tselyu izucheniya tekhnologicheskikh svoystv ilmenit-magnetitovykh peskov iturupskoy grupy pribrezhno-morskikh rossypey v 1992–1994 gg.* [Audit and evaluation work to study the technological properties of ilmenite-magnetite sands of the Iturup group of coastal and marine placers in 1992–1994]. Partizansk, Dalmorgeologiya Publ., 1994. 62 p.
22. Gordina R.N., Makarova N.S., Razoriteleva T.S., Tuzova L.F., Shepelev A.S. *Poleznye iskopaemye Sakhalinskoy oblasti* [Useful minerals of the Sakhalin Region]. Eds. A.M. Merenkov, N.V. Galushka, V.E. Goretoy, V.I. Vysochin, V.V. Medvedev, T.S. Razoriteleva, A.S. Chibisov, L.M. Chumakov. Yuzhno-Sakhalinsk, Sakhalin book Publ. house, 2002. 120 p.
23. Melkiy V.A. *Ekspertiza gotovnosti sushchestvuyushchikh materialov geologicheskogo i tekhnologicheskogo kharaktera dlya postanovki zapasov Rucharskogo i Reydovskogo mestorozhdeniy ilmenit-magnetitovykh peskov na gosudarstvenny balans* [Expert examination of readiness of existing case materials of geological and technological nature for production of reserves Rucharskoe and Reydovskoe deposits of ilmenite-magnetite sands on the state balance]. The agreement report 1-01-07-05. Novokuznetsk, JSC «Eurasruda», 2005. 36 p.
24. Sanford L.P. Modeling a dynamically varying mixed sediment bed with erosion, deposition, bioturbation, consolidation, and armoring. *Comput. Geosci.*, 2008, No. 34, pp. 1263–1283.
25. Yoshikawa S., Nemoto K. The role of summer monsoon-typhoons in the formation of nearshore coarse-grained ripples, depression, and sand-ridge systems along the Shimizu coast, Suruga Bay facing the Pacific Ocean, Japan. *Marine Geology*, 2014, vol. 353, pp. 84–98.
26. Reznichenko V.A., Shabalin L.I. *Titanomagnetity: mestorozhdeniya, metallurgiya, khimicheskaya tekhnologiya* [Titanomagnetites: deposits, metallurgy, chemical engineering]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 295 p.
27. Zaytsev G.V. *Tekhniko-ekonomicheskaya otsenka tekhnologii polucheniya zhelezo-vanadievyykh kontsentratsiy i razrabotka rekomendatsiy po snizheniyu ekspluatatsionnykh zatrat* [Technical and economic assessment of technology for producing iron-vanadium concentrates and development of recommendations to reduce operating costs]. Ekaterinburg, Uralmekhanoobr Research Institute Publ., 1994. 93 p.
28. Gupta C.K., Krishnamurthy N. *Extractive metallurgy of Vanadium (Process Metallurgy)*. Netherlands, Elsevier Science Publishers B.V., 1992. 690 p.
29. Gupta C.K. *Chemical Metallurgy: Principles and Practice*. Weinheim, WILEY-VCH, 2003. 811 p.
30. Thomson S., Tin W. *The Story of Corrugated iron in New Zealand*. Wellington, Steele Roberts, 2005. 107 p.
31. Zaytsev G. V. *Sovremennye napravleniya razvitiya tekhniki i tekhnologii proizvodstva vysokokachestvennogo zhelezorudnogo kontsentrata s vysokimi tekhniko-ekonomicheskimi pokazatelyami* [Modern trends in developing the equipment and technologies for production of high-quality iron ore concentrate with high technical and economic reading]. *Construction: Regional edition*, 2006, no. 9. Available at: <http://library.stroit.ru/articles/concentrat/index.html> (accessed: 11 March 2018).
32. Roshchin V. E., Asanov A. V., Roshchin A. V. Possibilities of two-stage processing titanium-magnetite ore concentrates. *Russian metallurgy (Metally)*, 2010, no. 6, pp. 15–25. In Rus.
33. Jing X., Wang J., Cao H., Ning P., Sun Z. Rapid selective extraction of V (V) from leaching solution using annular centrifugal contactors and stripping for NH_4VO_3 . *Separation and Purification Technology*, 2017, vol. 187, pp. 407–414.
34. Rath S.S., Dhawan N., Rao D.S., Das B., Mishra B.K. Beneficiation studies of a difficult to treat iron ore using conventional and microwave roasting. *Powder Technology*, 2016, vol. 301, pp. 1016–1024.
35. Smirnov L.A., Kushnarev A.V. *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy titanomagnetitovogo vanadiysoderzhashchego syr'ya v Rossii* [Current state and prospects of titanium-magnetite vanadium-containing raw materials in Russia]. *Chernaya metallurgiya*, 2013, no. 5 (1361), pp. 3–21.
36. Yu J., Han Yu., Li Ya., Gao P. Beneficiation of an iron ore fines by magnetization roasting and magnetic separation. *International Journal of Mineral Processing*, 10 November 2017, vol. 168, pp. 102–108.
37. Li Hong-Yi, Fang Hai-Xing, Wang Kang, Zhou W. Asynchronous extraction of vanadium and chromium from vanadium slag by stepwise sodium roasting–water leaching. *Hydrometallurgy*, 2015, vol. 156, pp. 124–135.
38. Faris N., Ram R., Tardio J., Bhargava S., Pownceby M.I. Application of ferrous pyrometallurgy to the beneficiation of rare earth bearing iron ores – a review. *Minerals Engineering*, 2017, vol. 110, pp. 20–30.

39. Parirenyatwa S., Escudero-Castejon L., Sanchez-Segado S., Hara Y., Jha A. Comparative study of alkali roasting and leaching of chromite ores and titaniferous minerals. *Hydrometallurgy*, 2016, vol. 165, P. 1, pp. 213–226.
40. Evseev V.F., Rechkin A.N., Lapshin A.G. *Nedra Sakhalinskoy oblasti* [Bowels of the earth of the Sakhalin region]. Ed. by A.V. Tarasov. Yuzhno-Sakhalinsk, Sakhalin – Priamurskie vedomosti Publ., 2013. 120 p.

Received: 18 April 2018.

Information about the authors

Vyacheslav A. Melkiy, Dr. Sc., director, Oil and Gas Technical Institute of Sakhalin State University.

Alexey A. Verkhoturov, Cand. Sc., senior lecturer, Sakhalin State University.

УДК 622.276.6

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЯЗКОУПРУГОГО ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНОГО СОСТАВА НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Гумерова Гульнур Рашитовна¹,
gumgul@yandex.ru

Яркеева Наталья Расатовна¹,
yarkeevan@yandex.ru

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

Актуальность исследования определена тем, что современное состояние многих нефтяных месторождений характеризуется массовым их вступлением в позднюю стадию разработки. Скважинная продукция сопровождается увеличением обводненности скважин при сохранении достаточного количества остаточных извлекаемых запасов нефти. При воздействии на пласт заводнением не все пропластки вовлекаются в разработку. Причинами являются неоднородность пласта, как по вертикали, так и по laterали, высокое соотношение вязкостей добываемой нефти и нагнетаемой воды. При этом процессы в пласте также сопровождаются преждевременным прорывом воды и, следовательно, снижением коэффициента нефтеотдачи. В связи с этим многие нефтяные компании уделяют большое внимание использованию методов регулирования фильтрационных потоков. Одной из таких эффективных технологий, с потокоотклоняющим действием, является применение сшитых полимерных составов. Их преимущество: более высокая вязкость раствора, чем у обычного полимера, создание высокого фактора остаточного сопротивления и способность проникать на более дальние расстояния от ствола нагнетательной скважины.

Цель: оценка технологической эффективности от закачки вязкоупругого поверхностно-активного состава на одном из месторождений Западной Сибири.

Объектом исследования является участок пласта с неовлекаемыми в разработку запасами и высокой обводненностью.

Методы исследования основаны на анализе работы участка проведения обработки, построении карт, оценки запасов.

Результаты. Расчитана эффективность обработки нагнетательной скважины на основе интегральной характеристики вытеснения и результатов промысловых геофизических исследований. Выявлено, что технология использования вязкоупругого поверхностно-активного состава успешно была применена и может быть в дальнейшем использована на других месторождениях Западной Сибири.

Ключевые слова:

Выравнивание профиля приемистости, сшитый полимерный состав, полиакриламид, сшиватель, неоднородность пласта.

Введение

В настоящее время осуществляются как «классические» технологии применения сшитых полимерных составов (СПС) (раствор полиакриламида со сшивателем), так и различные их модификации. Выбор марок полимеров определяется особенностями технологий их применения, геолого-физическими условиями залегания пластов, свойствами растворителя, сшивающего агента – все это уточняется для условий каждого объекта [1–3].

При заводнении продуктивных пластов одной из эффективных является технология ВУПАС (вязкоупругий поверхностно-активный состав) – на основе полиакриламида (марок Seurvey R1, DP 9–8177, FP-107, AN-132, Praestrol) и комплексных поверхностно-активных веществ (Катол-22А, Нефтенол-К, Нефтенол-ВВД). При этом устойчивый гель образуется непосредственно в пласте. Для образования СПС используется сшивающий агент – ацетат хрома, который позволяет изменять диапазон времени гелеобразования в различных пределах и эффективно направлять фильтрационные потоки. Известно, что по месторождениям Мегионской группы наибольшее снижение попутно добываемой воды и самые продолжительные эффекты от обработок наблюдаются

при использовании технологии ВУПАС, в том числе на участках скважин с трещиной ГРП (гидравлического разрыва пласта) [4]. Также стоит заметить, что именно эта технология, по сравнению с ГОС (гелеобразующий состав), ООС (осадкообразующий состав), наиболее эффективна в низкопроницаемых зонах пласта (проницаемость менее 0,2 Д), из-за больших размеров молекул раствора. Это приводит к кольматации призабойной зоны пласта и механическому разрушению молекул полимера.

При закачке стандартного СПС снижение проницаемости в низкопроницаемых пропластках незначительно, так как гель в большей степени воздействует на высокопроницаемые пропластки [5]. При использовании технологии ВУПАС поверхностно-активное вещество (ПАВ) воздействует в большей степени на низкопроницаемые интервалы пласта. За счет гидрофобизации пород после закачки ПАВ проницаемость по воде увеличивается значительно. Следовательно, повышается эффективность перераспределения потоков воды [6–10].

Основная часть

Применение технологии ВУПАС осуществляется на Аганском, Ватинском, Западно-Усть-Балык-

ском, Северо-Покурском, Мегионском, Узунском месторождениях, в основном в неоднородных пластах АВ₁³, АВ₂, БВ₁₀. Анализ применения ВУПАС проведем на примере одного из этих месторождений. В разрезе слагающих пород многопластового месторождения выделены несколько продуктивных объектов: пласты группы АВ нижнеалымской подсвиты и ванденской, БВ – мегионской свиты нижнего мела, ЮВ – васюганской свиты верхней юры.

Пласт АВ₁³ представлен сложно построенной толщей пород, которая именуется как «рябчиковые». Для таких залежей характерно отсутствие общей закономерности изменения коэффициента нефтенасыщенности по высоте залежи, отмечающейся для всех залежей Западной Сибири с обычной литолого-коллекторской характеристикой.

В связи с этим в пределах пласта АВ₁³ выделено лишь три нефтенасыщенных залежи, несмотря на то, что пласт имеет достаточно пологие формы залегания и площадное распространение с отсутствием участков полной глинизации пород-коллекторов.

Промышленная эксплуатация объекта АВ₁³ в 1997–2007 гг. осуществлялась на естественном режиме. С августа 2008 г. начали вводить нагнетательные скважины для организации системы поддержания пластового давления. Объект разрабатывается системой горизонтальных добывающих скважин с расстоянием между скважинами 400 м, обеспечивающим оптимальную выработку запасов.

В июне 2015 г., с целью повышения нефтеотдачи пластов, была проведена обработка (рис. 1) нагнетательной скважины 1 на объекте АВ₁³ с применением технологии ВУПАС.

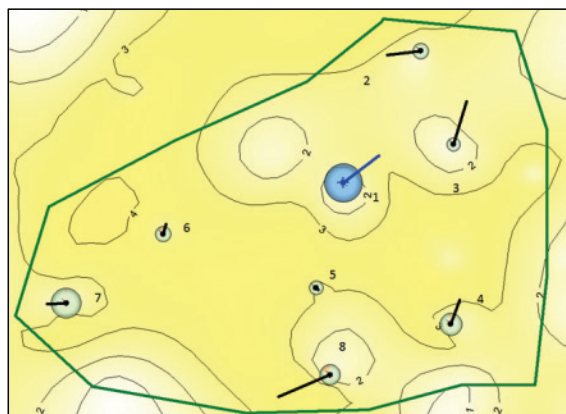


Рис. 1. Обрабатываемый участок скважин на карте остаточных нефтенасыщенных толщин

Fig. 1. Processed section of wells on the map of residual oil-saturated thicknesses

Участок воздействия характеризуется большим темпом обводнения добываемой продукции, по сравнению со средней величиной по пласту, наличием остаточных извлекаемых запасов, повышенной послойной неоднородностью и расчлененностью. Перечисленные параметры благоприятствуют применению СПС [11–17]. Также скважины выбранного участка – 1, 2, 4, 7, 8 – характеризуются искусственной трещиноватостью после проведения ГРП.

По выбранному участку были оценены остаточные запасы по карте остаточных нефтенасыщенных толщин и накопленной добыче. Также на основе характеристики вытеснения по истории добычи нефти и жидкости построена зависимость водо-нефтяного фактора от накопленной добычи нефти ($ВНФ=f(Q_n)$), по которой определяют оста-

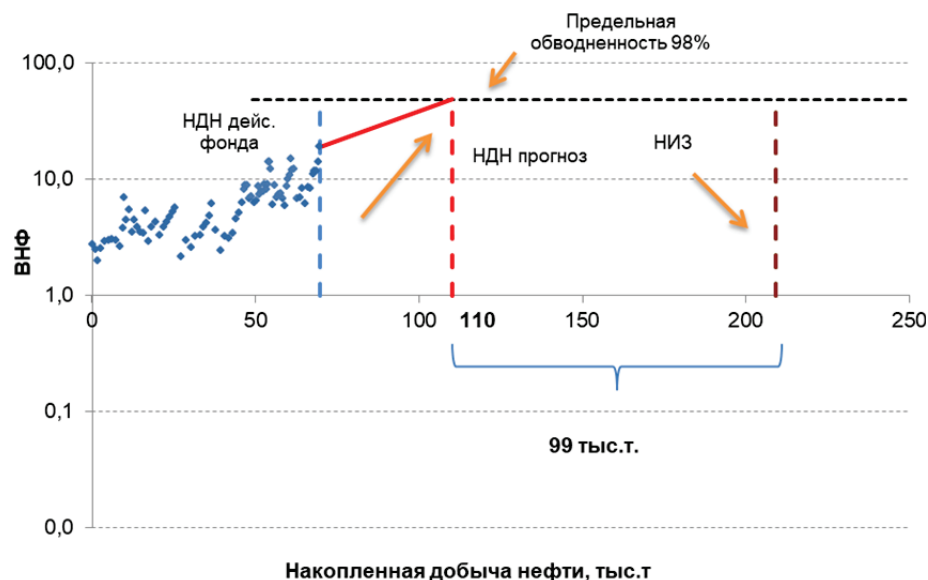


Рис. 2. График выработки запасов

Fig. 2. Plot of reserve recovery

точные извлекаемые запасы и характер выработки запасов (рис. 2) [18].

На рис. 2 строится линия тренда до рентабельной обводненности на прямолинейном участке добычи, соответствующая постоянному фонду скважин, и определяется прогнозная накопленная добыча нефти, которую можно извлечь при существующей системе разработки. Видно, что прогнозная накопленная добыча нефти составит примерно 110 тыс. т, т. е. примерно 99 тыс. т нефти не будет вовлечено в разработку.

Дебиты нефти и жидкости, а также обводненность данного участка на июнь 2015 г., перед выравниванием профиля приемистости (ВПП), приведены в таблице.

Таблица. Показатели разработки реагирующих скважин до ВПП

Table. Parameters of producing oil wells development before the equalization profile log (EPL)

| Тип скважины Well type | № скв. Well no. | Дебит нефти, т/сут Oil-production rate, ton/day | Дебит жидкости, м ³ /сут Liquid rate, cubic meter/day | Обводненность, % Water cut, p.c |
|-----------------------------|--------------------|--|---|---------------------------------------|
| Добывающая Producing oil | 2 | 0,2 | 9 | 97 |
| | 3 | 1,08 | 21 | 94 |
| | 4 | 2,48 | 48 | 94 |
| | 5 | 0,74 | 12 | 93 |
| | 6 | 2,7 | 25 | 85 |
| | 7 | 1,46 | 85 | 98 |
| | 8 | 9,2 | 43 | 75 |

Из таблицы видно, что скважины 2 и 7 достигли предельного обводнения 98 %, в скважинах 3–5 обводненность в пределах 94 %, а в 6 и 8 – самая низкая в пределах участка, 85 и 75 % соответственно.

До ВПП с начала 2015 г. резко упали дебиты нефти, обводненность при этом увеличилась. Связано это с перекрытием нефтенасыщенных пропластков, что привело к поступлению в скважины воды из более высокопроницаемых участков пласта.

В июне 2015 г. было закачено 150 м³ раствора по технологии ВУПАС, динамика основных показателей разработки участка, после воздействия, показана на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что добывающие скважины среагировали на обработку скв. 1 в сентябре 2015. Как результат – снижение и стабилизация обводнения на уровне 97 %. Это свидетельствует о положительном эффекте от обработки.

Также эффективность проведенной закачки в пласт раствора полиакриламида, сшивателя и комплексного ПАВ подтверждена промысловыми геофизическими исследованиями – при определении профиля поглощения водонагнетательной скважины до и после обработки на скв. 1. В ходе работы была выполнена запись механической расходомерии в интервале детальных исследований на режиме закачки при $P_{зак}=147$ атм (рис. 4).

По комплексу проведенных исследований отмечается уход закачиваемой жидкости в проектный перфорированный интервал пласта АВ₁³. Вид-

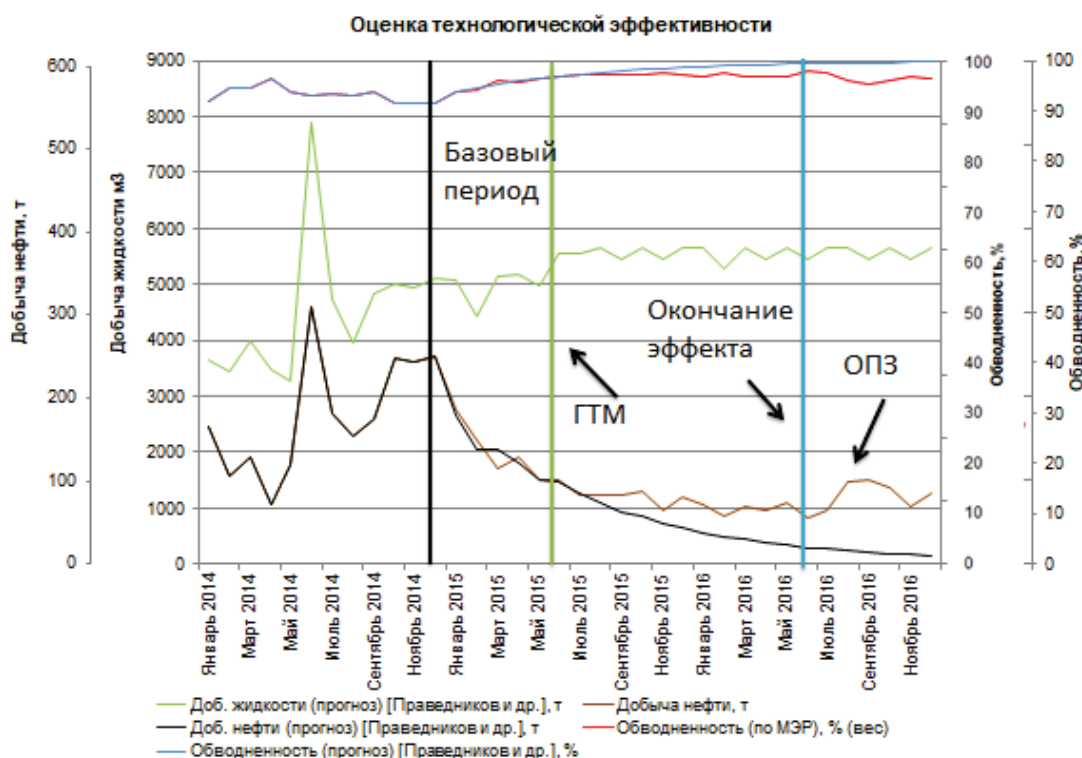


Рис. 3. Основные показатели разработки участка

Fig. 3. Main parameters of reservoir development

но, что интервалы пласта на глубинах 1818–1819, 1819,8–1820,6 м отключились, а на глубинах 1820,6–1821,8 и 1822,8–1823,6 м расход жидкости увеличился с 57 до 65 % и с 11 до 26 % соответственно. Также можно отметить, что после ВПП в работу включились интервалы пласта на глубинах 1823,6–1824,2 и 1826–1827 м, что привело к увеличению добычи нефти из этих пропластков. При этом также можно отметить, что заколонные перетоки отсутствуют, а эксплуатационная колонна и колонна насосно-компрессорной трубы в интервале исследований герметичны.

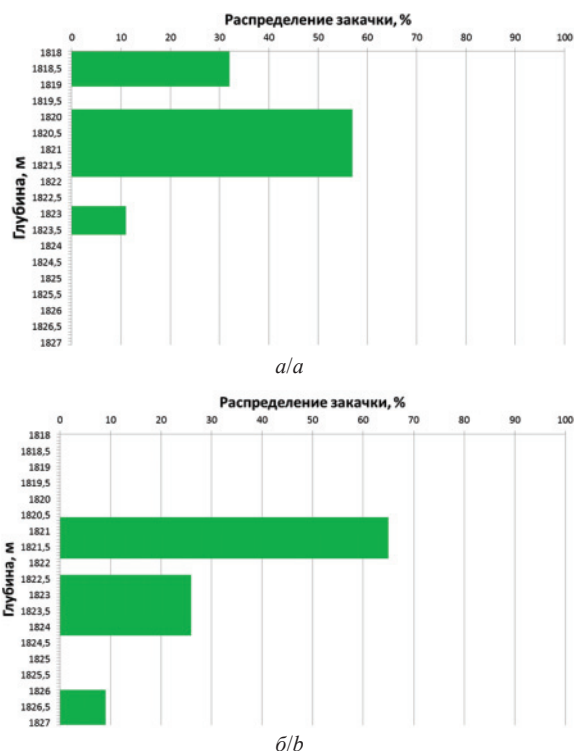


Рис. 4. Результаты исследований профиля поглощения скв. 1: а) до ВПП; б) после ВПП

Fig. 4. Results of research of the well № 1 absorption profile: а) before EPL; б) after EPL

Расчет эффективности геолого-технического мероприятия проводился по характеристикам вытеснения – по интегральной модели с помощью метода Праведникова и др.:

$$Q_i = a + b \cdot Q_{\text{ж}}^{1-1/c},$$

где $Q_{\text{н}}$ – накопленная добыча нефти; $Q_{\text{ж}}$ – накопленная добыча жидкости; a, b, c – параметрические коэффициенты.

Преимуществом интегрального метода (когда рассматриваются суммарные показатели всех скважин участка воздействия) является возможность учета интерференции скважин и уменьшение влияния погрешностей замеров. Изначально для определения расчетов одним из методов на пяти моделях были построены кривые характеристик вытеснения. Наибольшим коэффициентом корреляции по построенным зависимостям характеризуется модель Праведникова и др.

За базовый период (динамика технологических показателей без применения технологии) было выбрано семь месяцев, произведена математическая обработка фактических промысловых данных разработки (рис. 3) [19, 20].

По исходным данным – $Q_{\text{н}}$, $Q_{\text{ж}}$ участка до ВПП – была построена зависимость, по которой определена линия тренда, уравнение зависимости и параметрические коэффициенты. При экстраполяции результатов, для прогноза эффекта от ВПП, был принят постоянный отбор жидкости, определен базовый тренд поведения дебита нефти. Эффективность метода увеличения нефтеотдачи была определена путем сравнения фактической и прогнозной прямой [21–25]. Дополнительная добыча нефти при этом на 01.06.2016 г. составила 588,66 т, эффект от ВПП составил 10 месяцев с учетом того, что реакция добывающих скважин произошла через три месяца. При расчете технологической эффективности ВПП скважины 2, 6 и 8 были исключены, так как с декабря 2015 г. скв. 2 и 6 находятся в бездействии, а в скв. 8 провели обработку предзабойной зоны.

Выводы

Полученные результаты позволяют говорить об успешности применения технологии ВУПАС (модифицированного СПС): снижение отборов добываемой воды, увеличение добычи нефти и коэффициента вытеснения неоднородных терригенных коллекторов, которые характеризуются высокой обводненностью продукции, неравномерной выработкой запасов и значительными остаточными извлекаемыми запасами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Земцов Ю.В., Баранов В.А., Гордеев А.О. Обзор физико-химических МУН, применяемых в Западной Сибири, и эффективности их использования в различных геолого-физических условиях // Нефть. Газ. Новации. – 2015. – № 7. – С. 11–12.
2. Химченко П.В. Алгоритм внедрения технологии полимерного заводнения от лаборатории до реализации на новых и выработанных месторождениях // Нефть. Газ. Новации. – 2017. – № 8. – С. 30–43.
3. Реализация нового подхода к размещению гелевых составов в обводненных высокопроницаемых изолированных пластах / Р.И. Магзянов, Т.А. Исмагилов, В.П. Захаров, С.А. Вежин, С.В. Захаров // Нефтяное хозяйство. – 2011. – № 6. – С. 25–29.
4. Жуков Р.Ю. Обоснование применения технологий по выравниванию профиля приемистости на поздней стадии разработки нефтяных месторождений (на примере месторождений Среднего Приобья): автореф. дис.... канд. техн. наук. – М., 2013. – 24 с.
5. Полимерное заводнение на опытном участке Самотлорского месторождения. Обоснование эксперимента и предварительные результаты / В.В. Литвин, М.В. Самойлов, С.А. Власов, Я.М. Каган, Б.М. Кудряшов // Бурение и нефть. – 2009. – № 3, 4. – С. 52–54.
6. Kang X.D., Zhang J. Offshore Heavy Oil Polymer Flooding Test in JZW Area // SPE Heavy Oil Conference. – Canada, Calgary, Alberta, 2013. – P. 1–8.
7. Optimized polymer enhanced foam flooding for ordinary heavy oil reservoir after cross-linked polymer flooding / Chen Sun, Jian Hou, Guangming Pan, Zhizeng Xia // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2016. – V. 6. – № 4. – P. 777–785.
8. Changhong Gao, Jing Shi, Fangjian Zhao. Successful polymer flooding and surfactant-polymer flooding projects at Shengli Oilfield from 1992 to 2012 // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2014. – V. 4. – № 1. – P. 1–8.
9. Sheng J.J., Leonhardt B., Azri N. Status of polymer-flooding technology // Journal of Canadian Petroleum Technology. – 2015. – V. 54. – P. 116–126.
10. Injection parameters optimization of cross-linked polymer microspheres and polymer composite flooding system / J. Yang, X. Xie, J. Zhang, X. Zheng, Z. Wei // Petroleum Exploration and Development. – 2014. – V. 41. – № 6. – P. 794–797.
11. Fan Liu, Hanqiao Jiang, Xuelin Wu. Improved Approach to Evaluating the Hydrodynamic Performance of Polymers in the Early Stage of Polymer Flooding // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. – 2016. – V. 52. – № 1. – P. 95–102.
12. Guijiang Wang Xiaoling, Yi Xin Fang Feng Baoguo, Jing Jian Ouyang. Synthesis and study of a new copolymer for polymer flooding in high-temperature, high-salinity reservoirs // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. – 2012. – V. 48. – № 1. – P. 112–119.
13. Experimental study on the mechanism of enhancing oil recovery by polymer – surfactant binary flooding / Weidong Liu, Litao Luo, Guangzhi Liao, Luo Zuo, Yunyun Wei, Wei Jiang // Petroleum Exploration and Development. – 2017. – V. 44. – № 4. – P. 636–643.
14. Hadi Saboorian-Jooybari, Morteza Dejam, Zhangxin Chen. Heavy oil polymer flooding from laboratory core floods to pilot tests and field applications: Half-century studies // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2016. – V. 14. – P. 85–100.
15. Опыт применения гелеобразующей композиции «Геопан-М» на месторождениях ОАО «Удмуртнефть» / Д.О. Первозицкий, А.М. Белых, Е.В. Вакатова, Т.А. Исмагилов, И.М. Ганиев // Инженерная практика. – 2015. – № 6–7. – С. 34–37.
16. Обоснование и разработка технологии полимерного заводнения в слоисто-неоднородном пласте для повышения эффективности извлечения запасов / К.В. Стрижнев, А.А. Громан, М.И. Кузьмин, Е.А. Румянцева // Нефтяное хозяйство. – 2011. – № 12. – С. 34–37.
17. Гумерова Г.Р., Яркиева Н.Р. Технология применения шитых полимерных составов // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. – 2017. – № 2. – С. 63–79.
18. Исследование выработки запасов нефти из послонно неоднородного по проницаемости пласта с применением полимерного заводнения / И.В. Владимиров, М.Н. Шаймарданов, Е.В. Задорожный, С.И. Хазов, Р.А. Гнилицкий // Нефтепромысловое дело. – 2012. – № 9. – С. 5–12.
19. Толстоногов А.А. Оценка эффективности геолого-технических мероприятий в области нефтедобычи // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11–1. – С. 150–154.
20. Нуртдинов А.Р., Яркиева Н.Р. Применение циклического заводнения как МУН и анализ его эффективности на примере месторождения Западной Сибири // Нефть и газ–2017: сб. тез. 71-й Междунар. Молодежной науч. конф. – М., 18–20 апреля 2017. – М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2017. – Т. 1. – С. 317.
21. Обоснование выбора объекта под полимерное воздействие на примере пластов АВ1(3) и АВ2–3 Самотлорского месторождения / Н.И. Хисамутдинов, М.Н. Шаймарданов, В.В. Литвин, С.И. Хазов // Нефтепромысловое дело. – 2012. – № 11. – С. 54–59.
22. Телков В.П., Ким С.В., Мостаджеран М.Г. Повышение эффективности вытеснения высоковязких нефтей полимерными растворами // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXI Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 130-летию со дня рождения профессора М.И. Кучина. – Томск, 3–7 апреля 2017. – Томск: Изд-во ТПУ, 2017. – Т. 2. – С. 148–150.
23. 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-174402-MS, SPE Canada Heavy Oil Technical Conference. – Calgary, Alberta, Canada, 12–14 June 2015. – P. 1–26.
24. Разработка состава для технологии ПАВ-полимерного заводнения применительно к условиям месторождения Белый Тигр / Л.А. Магадова, В.Б. Губанов, Фан Ву Ань, К.А. Довгий // Промышленный сервис. – 2016. – № 3. – С. 21–25.
25. Алтунина Л.К., Кувшинов В.А. Увеличения нефтеотдачи месторождений на поздней стадии разработки физико-химическими методами // Нефтепромысловая химия. – 2013. – № 8. – С. 18–25.

Поступила 20.04.2018 г.

Информация об авторах

Гумерова Г.Р., студент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газонефтяных месторождений Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Яркиева Н.Р., кандидат технических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газонефтяных месторождений Уфимского государственного нефтяного технического университета.

UDC 622.276.6

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF APPLYING VISCOUS-ELASTIC SURFACE-ACTIVE COMPOSITION ON THE FIELDS OF WESTERN SIBERIA

Gulnur R. Gumerova¹,
gumgul@yandex.ru

Natalya R. Yarkeeva¹,
yarkeevan@yandex.ru

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

The relevance of the research consists in the fact that the current state of many oil fields is characterized by their mass entry into the late stage of development, well production of which is accompanied by increase in water cut of wells while maintaining a sufficient number of residual recoverable oil reserves. Not all streaks are involved in development when exposed to reservoir flooding. The reasons are the heterogeneity of formation, both vertically and laterally, high ratio of the viscosity of the extracted oil and pumped water. At the same time, the processes in the reservoir are accompanied as well by a premature breakthrough of water and, consequently, decrease in the oil recovery coefficient. In this regard, many oil companies pay great attention to the use of filtration flows regulating methods. One of the most effective technologies with a flow-reducing effect is the use of cross-linked polymer compounds. Their advantage is a higher viscosity of a solution than that of a conventional polymer, the creation of a high residual resistance factor and the ability to penetrate deeper from water-injection well.

The aim of the study is to assess the technological effectiveness injection of viscous-elastic surface-active composition at one of the fields in Western Siberia.

Object of research is a section of the reservoir, with uninvolved oil reserves and high water cut.

The research methods include the analysis of the processing site, mapping, inventory estimation.

Results. The authors have calculated the efficiency of processing the injection well based on the integrated characteristic of displacement and by the results of field geophysical researches; and revealed that the technology of using viscous-elastic surface-active structure was effectively applied and can be used further on other fields of Western Siberia.

Key words:

Alignment of injectivity profile, crosslinked polymer structure, polyacrylamide, stapler, reservoir heterogeneity.

REFERENCES

- Zemtsov Yu.V., Baranov V.A., Gordeev A.O. Obzor fiziko-khimicheskikh MUN, primenyayemykh v Zapadnoy Sibiri, i effektivnosti ikh ispolzovaniya v razlichnykh geologo-fizicheskikh usloviyakh [Overview of the physicochemical MUN used in Western Siberia, and the effectiveness of their use in various geological and physical conditions]. *Neft. Gaz. Novatsii*, 2015, no. 7, pp. 11–12.
- Khimchenko P.V. Algorithm in Using Polymer Flooding Procedure from Lab to Field Application on Green-fields and Brown-fields. *Neft. Gaz. Novatsii*, 2017, no. 8, pp. 30–43. In Rus.
- Magzyanov R.I., Ismagilov T.A., Zakharov V.P., Vezhnin S.A., Zakharov S.V. Realization of new method of gel placement in watered high permeable formation. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2011, no. 6, pp. 25–29. In Rus.
- Zhukov R.Yu. *Obosnovaniye primeneniya tekhnologiy po vyrovnivaniyu profilya priemistosti na pozdney stadii razrabotki neftnykh mestorozhdeniy (na primere mestorozhdeniy Srednego Priobya)*. Avtoreferat Kand. nauk. [Substantiation of application of technologies for equalizing the injectivity profile at the late stage of development of oil fields. Cand. Dis. Abstract]. Moscow, 2013. 24 p.
- Litvin V.V., Samoylov M.V., Vlasov S.A., Kagan Ya.M., Kudryashov B.M. Polimernoe zavodnenie na opytnom uchastke Samotlorskogo mestorozhdeniya. Obosnovaniye eksperimenta i predvaritelnye rezultaty [Polymer flooding in the pilot plot of the Samotlor field. Justification of the experiment and preliminary results]. *Burenie i neft*, 2009, no. 3, 4, pp. 52–54.
- Kang X.D., Zhang J. Offshore Heavy Oil Polymer Flooding Test in JZW Area. *SPE Heavy Oil Conference*. Canada, Calgary, Alberta, 2013. pp. 1–8.
- Chen Sun, Jian Hou, Guangming Pan, Zhizeng Xia. Optimized polymer enhanced foam flooding for ordinary heavy oil reservoir after cross-linked polymer flooding. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2016, vol. 6, no. 4, pp. 777–785.
- Changhong Gao, Jing Shi, Fangjian Zhao. Successful polymer flooding and surfactant-polymer flooding projects at Shengli Oilfield from 1992 to 2012. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2014, vol. 4, no. 1, pp. 1–8.
- Sheng J.J., Leonhardt B., Azri N. Status of polymer-flooding technology. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2015, vol. 54, pp. 116–126.
- Yang J., Xie X., Zhang J., Zheng X., Wei Z. Injection parameters optimization of cross-linked polymer microspheres and polymer composite flooding system. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, vol. 41, no. 6, pp. 794–797.
- Fan Liu, Hanqiao Jiang, Xuelin Wu. Improved Approach to Evaluating the Hydrodynamic Performance of Polymers in the Early Stage of Polymer Flooding. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 2016, vol. 52, no. 1, pp. 95–102.
- Guijiang Wang Xiaoling, Yi Xin Fang Feng Baoguo, Jing Jian Ouyang. Synthesis and study of a new copolymer for polymer flooding in high-temperature, high-salinity reservoirs. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 2012, vol. 48, no. 1, pp. 112–119.
- Weidong Liu, Litao Luo, Guangzhi Liao, Luo Zuo, Yunyun Wei, Wei Jiang. Experimental study on the mechanism of enhancing oil recovery by polymer – surfactant binary flooding. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, vol. 44, no. 4, pp. 636–643.
- Saboorian-Jooybari H., Dejam M., Chen Zh. Heavy oil polymer flooding from laboratory core floods to pilot tests and field applications: Half-century studies. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2016, vol. 14, pp. 85–100.
- Perevoshchikov D.O., Belykh A.M., Vakotova E.V., Ismagilov T.A., Ganiev I.M. Opyt primeneniya geleobrazuyushchey

- kompozitsii «Geopan-M» na mestorozhdeniyakh OAO «Udmurtneft» [Experience of using the gel-forming composition «Geopan-M» in the fields of LLC «Udmurtneft»]. *Inzhenernaya praktika*, 2015. no. 6–7, pp. 34–37.
16. Strizhnev K.V., Groman A.A., Kuzmin M.I., Rummyantseva E.A. Substantiation and development of polymer flooding technology in heterogeneous stratum for increasing the efficiency of extraction. *Neftyanoe hozyaystvo*, 2011, no. 12, pp. 34–37. In Rus.
 17. Gumerova G.R., Yarkeeva N.R. Technology of application of crosslinked polymeric compositions. *Neftgazovoe delo: ehlektron. nauch. Zhurn*, 2017, no. 2, pp. 63–79. In Rus. Available at: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/2_2017/ogbus_2_2017_p63-79_GumerovaGR_ru.pdf (accessed 15 April 2018).
 18. Vladimirov I.V., Shaymardanov M.N., Zadorozhny E.V., Khazov S.I., Gnilitzky R.A. Issledovanie vyrabotki zapasov nefi iz posloyno neodnorodnogo po pronitsaemosti plasta s primeneniem polimernogo zavodneniya [Investigation of development of oil reserves from layers of a reservoir heterogeneous in permeability using polymer flooding]. *Neftepromyslovoe delo*, 2012, no. 9, pp. 5–12.
 19. Tolstonogov A.A. Evaluation of geological and engineering activities in oil. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2014, no. 11, pp. 150–154. In Rus.
 20. Nurtdinov A.R., Yarkeeva N.R. Primenenie tsiklicheskogo zavodneniya kak MUN i analiz ego effektivnosti na primere mestorozhdeniya Zapadnoy Sibiri [Application of cyclic waterflooding as an EOR and analysis of its efficiency on the example of the West Siberian oil field]. *Neft i gaz-2017: sb. tez. 71-y Mezhdunar. Molodezhnoy nauch. konf* [Oil and gas-2017: collection of articles. 71th International Youth Scientific Conference]. Moscow, April 18–20, 2017. Moscow, the Russian State University of Oil and Gas (NIU), 2017. 317 p.
 21. Khisamutdinov N.I., Shaymardanov M.N., Litvin V.V., Khazov S.I. Substantiation of an object selection to be subject to polymer effect with the example of AB1(3) and AB2–3 formations of Samotlor oil field. *Neftepromyslovoe delo*, 2012, no. 11, pp. 54–59. In Rus.
 22. Telkov V.P., Kim S.V., Mostadzheran M.G. Povyshenie effektivnosti vytesneniya vysokovyazkikh neftey polimernymi rastvorami [Improving the efficiency of extrusion of highly viscous oils with polymer solutions]. *Problemy geologii i osvoeniya nedr: trudy XXI Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni akademika M.A. Usova studentov i molodykh uchenykh, posvyashchennogo 130-letiyu so dnya rozhdeniya professora M.I. Kuchina* [Problems of geology and subsoil development: works of the XXI International Symposium named after academician M.A. Usov students and young scientists dedicated to the 130th anniversary of the birth of Professor M.I. Kuchin]. Tomsk, TPU Publ. house, 2017. Vol. 2, pp. 148–150.
 23. 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-174402-MS, SPE Canada Heavy Oil Technical Conference*. Calgary, Alberta, Canada, 12–14 June 2015. pp. 1–26.
 24. Magadova L.A., Gubanov V.B., Fan Vu An, Dovgij K.A. Composition development for surfactant-polymer flooding technology related to white tiger oilfield conditions. *Promyshlenny servis*, 2016, no. 3, pp. 21–25. In Rus.
 25. Altunina L.K., Kuvshinov V.A. Uvelicheniya nefteotdachi mestorozhdeniy na pozdney stadii razrabotki fiziko-khimicheskimi metodami [Increased oil recovery deposits at a late stage of development by physicochemical by methods]. *Neftepromyslovaya khimiya*, 2013, no. 8, pp. 18–25.

Received: 20 April 2018.

Information about the authors

Gulnur R. Gumerova, student, Ufa State Petroleum Technological University.

Natalya R. Yarkeeva, Dr. Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technological University.

УДК 552.11:553.3/4:550.4:551.2

МАГМАТИЗМ И ЭПИТЕРМАЛЬНОЕ Ag-Au ОРУДЕНЕНИЕ КРАСНОЯРСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ ГОРНОГО АЛТАЯ

Гусев Анатолий Иванович¹,

anzerg@mail.ru

Табакаева Евгения Михайловна¹,

tabakaeva16@mail.ru

¹ Алтайский государственный гуманитарно-педагогический университет имени В.М. Шукшина, Россия, 659333, г. Бийск, ул. Владимира Короленко, 53.

Актуальность исследования определяется необходимостью освещения новых данных по петрологии, геохимии субвулканических пород и эпитеpмальному Ag-Au оруденению Красноярского рудного поля Горного Алтая. С субвулканическими штоками гранитоидов пространственно и парагенетически связаны различные типы оруденения: меди, кобальта, мышьяка, вольфрама и золота. Впервые для Горного Алтая исследован высоко-серный тип Ag-Au оруденения.

Цель исследования: изучить петрологические, геохимические особенности пород и оруденения Красноярского месторождения с использованием экспериментальных диаграмм, позволяющих выявлять генетические проблемы и физико-химические особенности петро-рудогенезиса.

Методы исследования включали изучение состава горных пород с применением лазерно-абляционного анализа методом индуктивно-связанной плазмы на спектрометре «ОПТИМА&4300» с высокой чувствительностью определения элементов в Лаборатории Института минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов (г. Москва). Изотопный состав серы и кислорода определен на масс-спектрометре МИ 1201В в той же лаборатории.

Результаты. Главными рудогенерирующими объектами в Красноярском рудном поле являются субвулканические штоки гранитоидов среднего девона коргонского комплекса, которые относятся к пералюминиевому типу с варьирующими характеристиками по магнию и железу. В породах проявлен тетрадный эффект фракционирования P3Э W-типа. Концентрации Au и Ag в породах увеличиваются с уменьшением величины тетрадного эффекта фракционирования P3Э W-типа. Глубинный магматический очаг эволюционировал в сторону повышения его уровня с формированием резко кислотно-серных характеристик и формированием околорудных аргиллизитов. Оруденение Красноярского месторождения представлено серией сближенных кварцевых жил, с образованием своеобразного линейного штокверка. Руды сформированы в три стадии: существенно сульфидную, теллуридную и пострудную. Основные рудные минералы: пирит, галенит, сфалерит, тетраэдрит, теннантит, электрум, тетрадимит, редко – алтаит, гессит, энаргит, люцит. Основные жильные минералы: кварц, кальцит, хлорит, сидерит, каолинит, монтмориллонит, иллит. Концентрации золота в рудах варьируют от 0,5 до 29,6 г/т, серебра – от 15 до 5000 г/т. Соотношение Ag/Au в рудах варьирует от 135 до 150 и позволяет относить Красноярское месторождение к Ag-Au типу. Температуры гомогенизации газозо-жидких включений в кварце разных генераций от стадии к стадии снижались от 265 до 175 °С. Фугитивность серы снижалась от первой стадии (–10–11) ко второй (–15–16), f_{Te_2} повышалась от (–15) до (–10) и f_{O_2} от (–39,5) до (–37). Изотопы серы и кислорода свидетельствуют о магматогенном источнике серы и метеорном – кислорода.

Ключевые слова:

Геохимия, петрология, гранитоиды, штоки, тетрадный эффект фракционирования P3Э, жилы, свинец, медь, золото, серебро, фугитивность S_2 , O_2 , Te_2 .

Введение

Эпитеpмальное Ag-Au оруденение занимает значительной объём в добыче серебра и золота, составляя для золота более 17 %, для серебра более 6 % мировой добычи [1]. На Алтае такой тип оруденения также получил распространение. Одним из интереснейших объектов, который обрабатывается в настоящее время, является Суричское месторождение, расположенное на западе Алтайского края. Оно относится к низко-серному (low sulfidation) типу [2]. Красноярское месторождение относится к другому типу эпитеpмальных систем – высоко-серному (high-sulfidation). К этому типу относятся такие известные гигантские Ag-Au месторождения, как Голдфилд (Невада, США), Лепанто (Филиппины), Иватто (Япония). Развитие сырьевой базы золота и серебра на Алтае весьма актуально, и изучение Красноярского месторождения обеспечит новый тип эпитеpмальных Ag-Au и порфиновых Cu-Au систем региона.

Субвулканические породы

Красноярского рудного поля

В пределах Красноярского рудного поля среди вулканитов коргонской свиты ($\lambda D_2 krg_2$) выявлены два небольших субвулканических штока, сложенных преимущественно плагиогранит-порфирами и плагиолейкогранит-порфирами (рис. 1). Западное субвулканическое тело имеет размеры 500×200 м, восточное – 450×100 м. Они имеют субсогласное залегание, и в их экзоконтактовых частях локализуются проявления меди, свинца и Красноярское месторождение золота. Штоки и проявления меди, свинца, цинка, урана, мышьяка, вольфрама контролируются зонами субширотных разломов сбросо-сдвиговой кинематики. Породы указанных штокообразных тел характеризуются плохой гомогенизацией и неравномерной раскристаллизацией слагающих их минералов. Нередки шпильки темноцветных минералов удлиненной овальной формы размерами от 1,5 до 2,5 см. Как

правило, породы имеют порфировую структуру с размерами вкрапленников кварца и полевого шпата от 1,5 до 2,5 мм, а также микрографическую структуру основной ткани породы. В краевой фации нередки переходы в фельзиты и фельзит-порфиры. В краевой части более крупного западного штока отмечены также фрагменты гранодиорит-порфиров размерами от 1,5 до 3,2 м в поперечнике.

Преобладающие плагиогранит-порфиры и плагиолейкогранит-порфиры сложены альбитом, олигоклазом (55–65 %), кварцем (30–44 %), иногда присутствует биотит, мусковит и наложенный слабо-решетчатый микроклин (до 6 %). Во вкрапленниках плагиоклаз преобладает над кварцем. Акцессорные минералы представлены сфеном, апатитом, магнетитом, цирконом, редко – монацитом, ильменитом, турмалином. Химический состав субвулканических пород характеризуется высокой натриевостью ($\text{Na}_2\text{O}=4,2\text{--}6,55\%$), глиноземистостью (индекс Шенда=1,06–1,08) и низкой калиевостью ($\text{K}_2\text{O}=0,3\text{--}1,17\%$). Низкое уран-ториевое отношение (менее 1) в породах указывает на сравнительно неизменённый состав пород с отсутствием наложенных вторичных процессов. Из микро-

элементов повышенными концентрациями отличаются Sc, Zr, Au, Ag, сумма РЗЭ, а в некоторых породах – Pd и Pt (табл. 1). Наблюдается некоторая деплегированность пород высоко-зарядными элементами Nb, Ti, Ta, а также элементами с большим ионным радиусом (K, Rb, Cs, Pb). По нормированным отношениям к хондриту (La/Yb_N и La/Sm_N) можно заключить о значительном дифференцированном типе распределения РЗЭ в породах. В целом субвулканические образования характеризуются повышенными концентрациями и мантийных, и коровых элементов, указывая на мантийно-коровое взаимодействие при их генерации. Отношение Eu/Eu^* в породных типах менее 1, что ниже хондритовых значений. Сумма РЗЭ в них варьирует в значительных пределах от 144,1 до 349,2 и в целом указывает на обогащённость лантаноидами.

На канонических диаграммах фигуративные точки составов пород локализируются в поле пералюминиевых разностей, а также магнезиальных и железистых разновидностей со значительными вариациями соотношений железа и магния в породах (рис. 2).

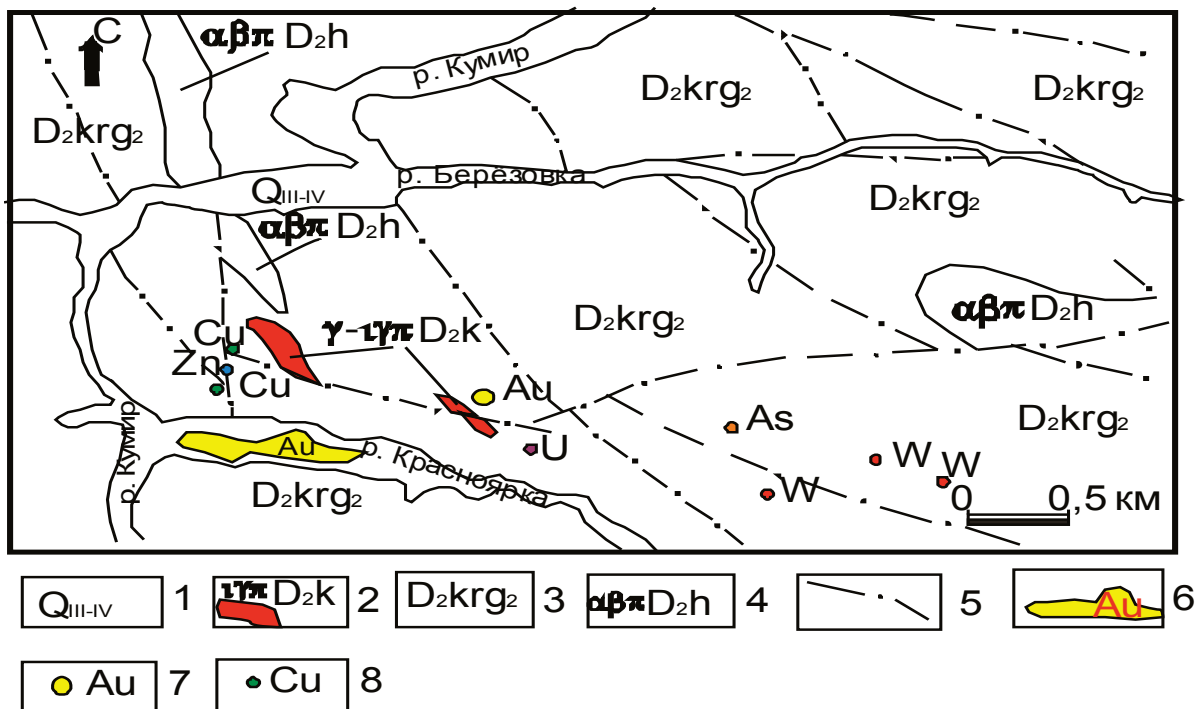


Рис. 1. Схематическая карта полезных ископаемых Красноярского рудного поля (составлена авторами с учётом данных В.В. Миронова): 1 – современные аллювиальные образования; 2 – субвулканические плагиогранит-порфиры и плагиолейкогранит-порфиры коргонского комплекса; 3 – туфы, лавы, игнимбриты риолитов коргонской свиты; 4 – андезибазальтовые порфиры холзунской свиты; 5 – разломы; 6 – Красноярская россыпь золота; 7 – Красноярское месторождение золота; 8 – проявления (меди, свинца, цинка, мышьяка, урана, вольфрама)

Fig. 1. Schematic map of mineral resources of Krasnoyarsk ore field (composed by the authors considering the data of V.V. Mironov): 1 are the modern alluvial deposits; 2 are the subvolcanic plagiograniteporphyres and plagiocogranite-porphyres of Korgon complex; 3 are the tuffs, lava, ignimbrites of rhyolites of Korgonsk suite; 4 are the basaltic andesite porphyrites of Kholzunskaia suite; 5 are the faults; 6 is the Krasnoyarsk placer of gold; 7 is the Krasnoyarsk deposit of gold; 8 are the manifestations (copper, lead, zinc, arsenic, uranium, tungsten)

Таблица 1. Содержания оксидов (масс. %) и микроэлементов (г/т) в субвулканических породах коргонского комплекса Красноярского рудного поля

Table 1. Contents of oxides (wt. %) and microelements (ppm) in subvolcanic rocks of Korgonsk complex of Krasnoyarsk ore field

| Компоненты Components | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|--------------------------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| SiO ₂ | 65,6 | 70,2 | 72,2 | 73,11 | 73,71 | 73,82 | 74,08 | 74,23 | 75,9 |
| TiO ₂ | 0,77 | 0,69 | 0,43 | 0,42 | 0,51 | 0,49 | 0,44 | 0,38 | 0,23 |
| Al ₂ O ₃ | 13,6 | 13,8 | 14,7 | 13,74 | 12,9 | 13,75 | 14,3 | 14,2 | 13,5 |
| Fe ₂ O ₃ | 4,6 | 2,9 | 1,45 | 1,1 | 1,06 | 0,85 | 1,56 | 1,4 | 1,59 |
| FeO | 2,9 | 1,9 | 1,03 | 0,94 | 0,99 | 0,5 | 0,9 | 0,8 | 1,1 |
| MnO | 0,16 | 0,13 | 0,14 | 0,14 | 0,15 | 0,14 | 0,13 | 0,13 | 0,13 |
| MgO | 0,9 | 1,55 | 0,97 | 0,67 | 1,23 | 0,63 | 1,24 | 0,97 | 0,63 |
| CaO | 1,2 | 0,47 | 1,6 | 2,6 | 1,03 | 1,95 | 0,34 | 0,6 | 0,12 |
| Na ₂ O | 5,95 | 4,2 | 5,65 | 5,15 | 5,04 | 6,55 | 5,5 | 5,6 | 6,25 |
| K ₂ O | 0,7 | 2,4 | 0,73 | 1,17 | 0,74 | 0,43 | 0,7 | 0,75 | 0,3 |
| P ₂ O ₅ | 0,15 | 0,12 | 0,1 | 0,09 | 0,1 | 0,08 | 0,06 | 0,06 | 0,03 |
| П.П.П. LOI | 0,9 | 1,2 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,4 | 0,3 |
| Сумма Sum | 99,8 | 99,8 | 99,4 | 100,1 | 100,1 | 100,3 | 99,9 | 100,2 | 100,4 |
| V | 9,0 | 8,5 | 1,5 | 2,0 | 1,6 | 1,8 | 1,7 | 0,2 | 8,0 |
| Cr | 4,1 | 2,6 | 1,5 | 1,0 | 1,4 | 1,6 | 2,0 | 2,5 | 2,2 |
| Ba | 424 | 256 | 185 | 400 | 120 | 118 | 70 | 19 | 170 |
| Ni | 5,8 | 2,6 | 1,9 | 1,7 | 1,5 | 1,6 | 1,3 | 1,4 | 2,0 |
| Co | 4,8 | 1,9 | 1,8 | 1,6 | 1,4 | 1,7 | 1,1 | 1,0 | 3,0 |
| Cu | 10,8 | 2,6 | 2,5 | 2,2 | 2,1 | 1,9 | 0,9 | 0,4 | 9,0 |
| Zn | 18,3 | 9,2 | 3,6 | 3,2 | 3,0 | 2,6 | 0,9 | 0,3 | 9,1 |
| Pb | 8,9 | 7,9 | 7,1 | 7,0 | 6,3 | 5,5 | 4,4 | 3,4 | 3,5 |
| Sn | 2,1 | 2,8 | 1,2 | 1,3 | 1,1 | 1,0 | 0,9 | 1,1 | 2,0 |
| Sc | 76 | 53 | 55 | 58 | 72 | 70 | 76 | 75 | 9,9 |
| Sr | 245 | 256 | 260 | 270 | 210 | 220 | 115 | 97 | 12,5 |
| Zr | 163 | 176 | 180 | 200 | 198 | 165 | 180 | 156 | 181 |
| Nb | 13,8 | 12,9 | 10 | 10,1 | 10,3 | 9,5 | 9,8 | 9,7 | 9,2 |
| Y | 30,4 | 30,6 | 29,2 | 35,8 | 35,3 | 33,1 | 31,9 | 28,8 | 35,5 |
| Yb | 3,7 | 2,3 | 5,2 | 5,0 | 5,1 | 4,9 | 4,9 | 4,9 | 5,2 |
| U | 2,2 | 1,8 | 1,1 | 1,0 | 0,9 | 1,2 | 1,3 | 1,2 | 2 |
| Th | 7,9 | 9,5 | 10,1 | 11,2 | 9,7 | 12,1 | 13,2 | 13,1 | 8,5 |
| Li | 0,9 | 2,9 | 2,5 | 2,61 | 2,58 | 2,14 | 1,95 | 0,77 | 3,2 |
| Be | 6,5 | 5,7 | 5,5 | 1,7 | 0,6 | 11,1 | 15,5 | 11,4 | 10,8 |
| W | 1,8 | 2,6 | 1,0 | 1,2 | 1,3 | 1,2 | 1,3 | 0,8 | 1,6 |
| Mo | 1,6 | 1,8 | 0,9 | 1,1 | 1,3 | 0,8 | 0,7 | 1,0 | 2,1 |
| Rb | 34 | 46 | 24 | 45 | 30 | 15 | 21 | 19 | 11,0 |
| Cs | 4,1 | 2,3 | 3,5 | 3,5 | 4,1 | 4,2 | 4,8 | 4,2 | 8,4 |
| Ga | 15,9 | 14,8 | 15,1 | 14,2 | 19,3 | 17 | 16,3 | 17,2 | 16,3 |
| La | 22,4 | 23,5 | 95 | 97,2 | 99 | 98 | 94 | 100,6 | 101,3 |
| Ce | 45,5 | 43,7 | 115 | 118 | 114,2 | 116 | 113 | 117 | 118 |
| Pr | 4,1 | 4,8 | 5,5 | 5,6 | 5,7 | 6,0 | 4,9 | 5,8 | 6,1 |
| Nd | 17,8 | 18,3 | 49,7 | 50,0 | 50,6 | 50,9 | 49,8 | 51,8 | 52,1 |
| Sm | 3,9 | 5,4 | 9,9 | 10,1 | 10,3 | 10,2 | 9,7 | 10,1 | 11,9 |
| Eu | 1,45 | 0,96 | 1,3 | 1,5 | 1,4 | 1,6 | 1,62 | 1,55 | 1,5 |
| Gd | 6,2 | 5,9 | 7,3 | 7,2 | 7,5 | 7,4 | 7,3 | 7,56 | 7,6 |
| Tb | 0,9 | 0,74 | 1,1 | 1,2 | 1,25 | 1,32 | 1,18 | 1,32 | 1,4 |
| Dy | 1,1 | 0,9 | 0,8 | 0,9 | 0,85 | 0,91 | 0,64 | 0,6 | 0,7 |
| Ho | 3,5 | 3,4 | 3,5 | 3,6 | 3,4 | 3,7 | 3,6 | 3,8 | 4,0 |
| Er | 0,8 | 0,73 | 0,7 | 0,66 | 0,7 | 0,8 | 0,83 | 0,8 | 0,9 |
| Tm | 2,1 | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,2 | 2,0 | 2,3 | 2,5 |
| Lu | 0,29 | 0,35 | 0,3 | 0,33 | 0,4 | 0,41 | 0,37 | 0,4 | 0,45 |
| Hf | 4,97 | 3,9 | 6,2 | 6,1 | 6,3 | 6,8 | 6,5 | 5,8 | 6,0 |
| Ta | 0,55 | 0,65 | 0,5 | 0,52 | 0,54 | 0,6 | 0,63 | 0,62 | 0,7 |
| Au | 0,01 | 0,01 | 0,04 | 0,05 | 0,05 | 0,07 | 0,1 | 0,09 | 0,08 |
| Ag | 3,1 | 3,5 | 6,8 | 8,1 | 8,2 | 10,3 | 11,6 | 11,1 | 10,3 |
| Sb | 0,15 | 0,11 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,18 | 0,2 | 0,25 | 0,19 |
| Ge | 1,6 | 1,1 | 1,2 | 1 | 1,1 | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1,6 |

Окончание табл. 1

Table 1

| Компоненты Components | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-----------------------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|
| Ru | – | <0,002 | – | <0,002 | <0,002 | <0,002 | – | <0,002 | <0,002 |
| Rh | – | <0,002 | – | <0,002 | <0,002 | <0,002 | – | <0,002 | <0,002 |
| Pd | 0,006 | 0,0067 | – | 0,0059 | 0,0034 | 0,0056 | 0,007 | <0,002 | <0,002 |
| Ir | – | <0,002 | – | <0,002 | <0,002 | <0,002 | – | <0,002 | <0,002 |
| Pt | 0,007 | <0,002 | – | 0,0051 | <0,002 | <0,002 | 0,007 | <0,002 | <0,002 |
| ΣREE | 144,1 | 144,6 | 326,6 | 339,3 | 330,9 | 337,4 | 325,7 | 337,3 | 349,2 |
| La/YbN | 3,99 | 6,72 | 12,1 | 12,75 | 12,76 | 13,18 | 12,5 | 13,68 | 12,78 |
| La/SmN | 3,52 | 2,7 | 5,9 | 5,9 | 5,8 | 5,9 | 5,9 | 6,1 | 5,2 |
| Eu/Eu* | 0,91 | 0,52 | 0,45 | 0,52 | 0,47 | 0,54 | 0,57 | 0,53 | 0,46 |
| U/Th | 0,28 | 0,19 | 0,10 | 0,089 | 0,093 | 0,099 | 0,09 | 0,092 | 0,23 |

Примечание. П.П.П. – потери при прокаливании; N – элементы нормированы по [3]. Eu*=(Sm_N+Gd_N)/2. Субвулканические породы Красноярского рудного поля: 1 – гранодиорит-порфир; 2, 3 – плагиогранит-порфиры, 4–9 – плагиолейкогранит-порфиры.

Note. LOI – loss on ignition. N – elements normalized after [3]. Eu*=(Sm_N+Gd_N)/2. Subvolcanic rocks of Krasnoyarsk ore field: 1 – granodiorite-porphyre; 2, 3 – plagiogranite-porphyre; 4–9 – plagiogranite-porphyres.

Таблица 2. Отношения элементов и ТЭФ РЗЭ в породах Красноярских штоков

Table 2. Ratio of elements and tetrad effect of REE fractionation (TEF REE) in rocks of Krasnoyarskii stocks

| Отношения элементов и значения ТЭФ Ratios of elements and meanings of TEF | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | Отношения в хондритах Ratios in chondrites |
|---|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|--|
| Y/Ho | 8,7 | 9,0 | 8,3 | 10,0 | 10,3 | 8,9 | 8,6 | 7,4 | 8,7 | 29,0 |
| Zr/Hf | 32,8 | 45,1 | 29,0 | 32,8 | 31,4 | 24,3 | 27,7 | 26,9 | 30,2 | 36,0 |
| La/Nb | 1,6 | 1,8 | 9,5 | 9,6 | 9,6 | 10,3 | 9,6 | 10,3 | 10,9 | 30,75 |
| La/Ta | 40,7 | 36,2 | 190 | 186 | 183 | 163 | 149 | 161 | 144 | 17,57 |
| Sr/Eu | 170 | 267 | 200 | 180 | 150 | 137 | 71 | 62 | 8,3 | 100,5 |
| Eu/Eu* | 0,91 | 0,52 | 0,45 | 0,52 | 0,47 | 0,54 | 0,57 | 0,53 | 0,46 | 1,0 |
| Sr/Y | 8,1 | 8,4 | 8,9 | 7,5 | 6,0 | 6,7 | 3,7 | 3,5 | 0,4 | 4,62 |
| TE _{1,3} | 0,6 | 0,59 | 0,36 | 0,37 | 0,365 | 0,38 | 0,33 | 0,34 | 0,36 | – |

Примечание. TE_{1,3} – тетрадный эффект фракционирования РЗЭ (среднее между первой и третьей тетрадами) по В. Ирбер [6]; Eu*=(Sm_N+Gd_N)/2. Значения в хондритах приняты по [3]. Субвулканические породы Красноярского рудного поля: 1 – гранодиорит-порфир; 2, 3 – плагиогранит-порфиры, 4–9 – плагиолейкогранит-порфиры.

Note. TE_{1,3} – tetrad effect of REE fractionation (average between the first and the third tetrads) after V. Irber [6]; Eu*=(Sm_N+Gd_N)/2. Values in chondrites are taken after [3]. Subvolcanic rocks of Krasnoyarsk ore field: 1 – granodiorite-porphyre; 2, 3 – plagiogranite-porphyre; 4–9 – plagiogranite-porphyres.

В субвулканических породах штоков проявлен тетрадный эффект фракционирования редкоземельных элементов W-типа, варьирующий от 0,33 до 0,6 (граничное значение менее 0,9) (табл. 2). В табл. 2 приведены также характерные

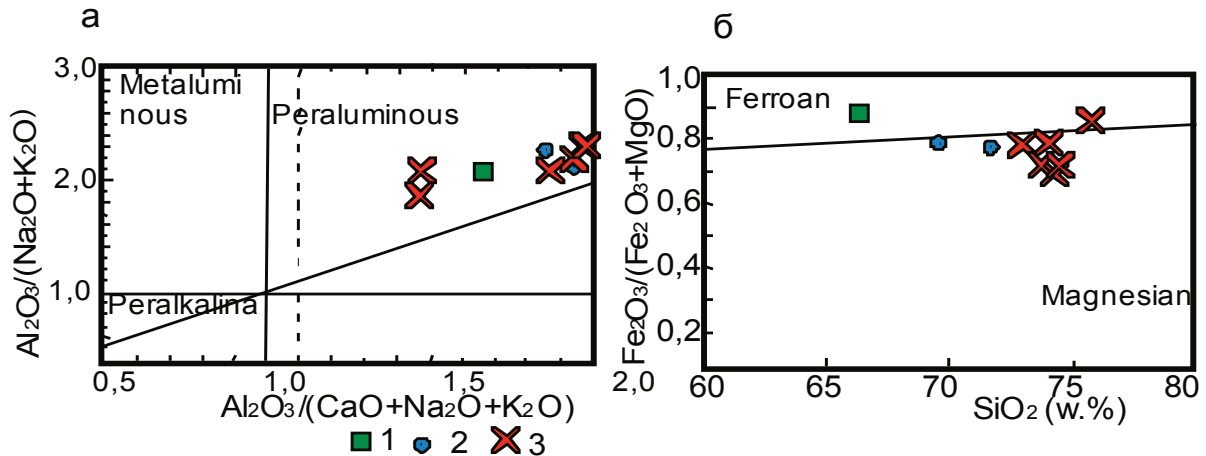


Рис. 2. Классификационные диаграммы: а) диаграмма $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O) - Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$ по [4]; б) диаграмма $Fe_2O_3/(Fe_2O_3+MgO) - SiO_2$ по [5] для субвулканических пород коргонского комплекса Красноярского рудного поля: 1 – гранодиорит-порфиры, 2 – плагиогранит-порфиры, 3 – плагиолейкогранит-порфиры

Fig. 2. Classification plots: а) plot $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)$ vs. $Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$ after [4]; б) plot $Fe_2O_3/(Fe_2O_3+MgO)$ vs. SiO_2 after [5] for subvolcanic rocks of Korgon complex of Krasnoyarsk ore field: 1 – granodiorite-porphyre; 2 – plagiogranite-porphyre; 3 – plagioclearite-porphyres

отношения элементов и сравнение с таковыми в хондритах. Следует отметить, что некоторые отношения элементов в породах устойчиво ниже хондритовых (Y/No , La/Nb , Eu/Eu^*), а другие дают разброс значений и выше, и ниже хондритовых (La/Ta , Zr/Hf , Sr/Eu , Sr/Y). Это свидетельствует о резком изменении содержания элементов в породах, вызванных различными причинами (мантийными и коровыми процессами, мантийно-коровым взаимодействием).

На диаграмме соотношений $Au-TE_{1,3}$ в породах субвулканического комплекса наблюдается увеличение ТЭФ РЗЭ W-типа с уменьшением концентраций золота (рис. 3). Содержания золота повсеместно ниже хондритовых значений. Следовательно, золото как мантийный элемент в процессе генерации риолитов и субвулканических образований претерпело значительные трансформации в сторону значительных снижений концентраций металлов в породах.

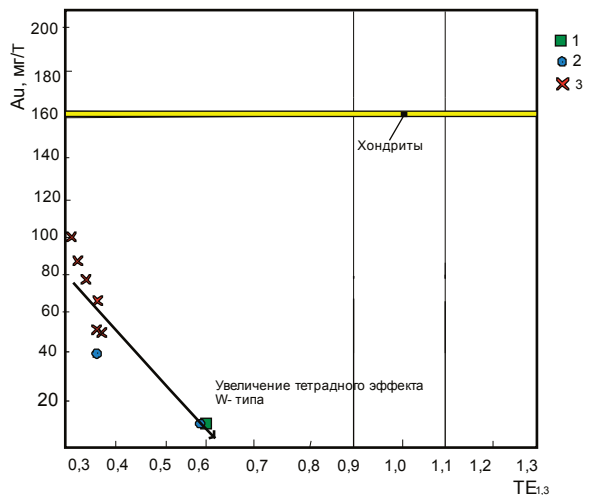


Рис. 3. Диаграмма $Au-TE_{1,3}$ по [7] для пород субвулканического комплекса Красноярского рудного поля. Желтое поле показывает концентрации золота в магматических породах по [8]; содержания золота в хондритах по [9]. Условные обозначения – на рис. 2

Fig. 3. Plot Au vs. $TE_{1,3}$ after [7] for rocks of subvolcanic complex of Krasnoyarsk ore field. Yellow field shows gold concentration in magmatic rocks after [8]; gold content in chondrites is after [9]. Legend is in the Fig. 2

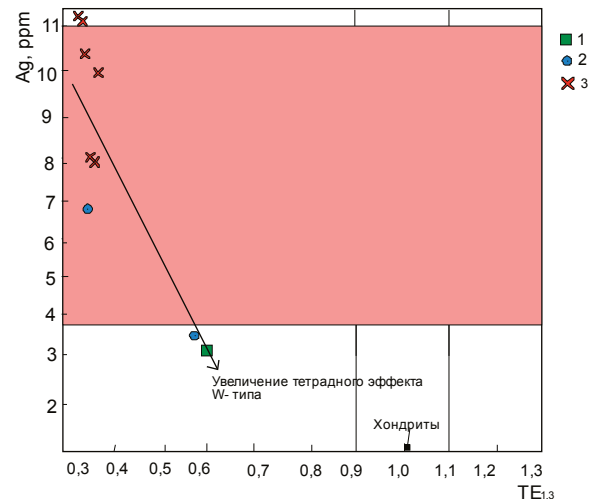


Рис. 4. Диаграмма $Ag-TE_{1,3}$ для пород субвулканического комплекса Красноярского рудного поля. Розовое поле показывает вариации концентраций серебра в магматических породах по [8]; содержания серебра в хондритах по [9]. Условные обозначения – на рис. 2

Fig. 4. Plot Ag vs. $TE_{1,3}$ for rocks of subvolcanic complex of Krasnoyarsk ore field. The pink field shows silver concentration in magmatic rocks after [8]; silver content in chondrites is after [9]. Legend is in the Fig. 2

Совершенно иная картина на такой же диаграмме наблюдается для серебра. Концентрации его в субвулканических породах выше, чем в хондритах, и тренд увеличения величин ТЭФ РЗЭ значительно круче, чем для золота, хотя тенденция снижения концентраций серебра с увеличением значений ТЭФ РЗЭ сохраняется (рис. 4).

Оруденение Красноярского рудного поля

Оруденение контролируется зоной смятия и дробления риолитовых порфиров коргонской свиты широтной и субширотной ориентировок. В отдельных тектонических швах зоны смятия выявляется сбросо-сдвиговая кинематика. Она контролирует размещение субвулканических тел, кварцевых жил и метасоматитов Красноярского месторождения и ряда проявлений Cu, Zn, Co, As, W. Простираение жил СЗЗ (азимуты 280–290°), падение на ЮЮЗ под углами 55–70°. Красноярское месторождение представляет собой своеобразный линейный штокверк из сближенных кварцевых жил и мелких прожилков между ними. Известно семь наиболее крупных жил, из которых наибольший интерес представляет жила № 1 (главная).

Жила № 1 имеет азимут падения 200° под углом 60°; прослежена по простираению канавами с поверхности на 1000 м и разведана на глубину до 100 м двумя штольнями длиной 75 и 200 м. Мощность жилы меняется от первых сантиметров до 3,6 м. Сопровождается аргиллизитами в виде окремнения с иллитом, монтмориллонитом и каолинитом в виде гнезд. Местами кварц ноздреватый. Главные гипогенные минералы (галенит, халькопирит, блёклые руды, энаргит, сфалерит) и гипергенные (церуссит, малахит, азурит, редко ковеллин) развиты как в кварце жил, так и в их зальбандах. Их количество и соотношение меняется в широких пределах – от редкой рассеянной вкрапленности до массивных руд. Выделяются восточная (богатая) и западная (бедная) части жилы № 1. В восточной части наблюдаются наиболее богатые сливные руды, где помимо преобладающего галенита присутствуют теннантит, тетраэдрит, энаргит. В рудах установлены содержания (%): Pb – от 0,5 до 60,2; Sb – от 1,5 до 10; Cu – от 0,8 до 8,8; Zn – от 0,04 до 0,17; Ag и Au (по штольне № 1) – до 5000 и 29,6 г/т, соответственно (по канавам до 3497 и 27,2 г/т, соответственно). Кроме этого, в повышенных содержаниях в рудах присутствуют Mo, Cd и As. Редко отмечаются повышенные концентрации ртути и висмута. В западном направлении жила выклинивается, в восточном направлении её следует прослеживать. Подсчёт запасов свинца категорий В+С₁ до глубины 130 м даёт цифру 1725 т. Средняя мощность рудного тела по месторождению составляет около 1 м (99 см), среднее содержание свинца – 3,4 %. Баранчинским рудоуправлением запасы Au категорий В+С₁+С₂ оценены в 63,2 кг (по категории С₁ они составляли 140,2 кг) при среднем содержании 2,72 г/т и средней мощности тела 87 см. По состоянию на

01.01.1956 г. запасы отнесены к забалансовым в количестве 280,4 кг (С₁=140,2 кг+С₂=140,2 кг). На остальные металлы подсчёт запасов не проводился.

Жила № 2 расположена в 4 м к северу от жилы № 1. Она представлена серией прожилков мощностью 2–3 см из кварца, хлорита, иллита, монтмориллонита и кальцита с примазками малахита, и азурита с азимутом падения 180–200°, углами падения 70–80°. Общая мощность жильной зоны варьирует от 1 до 3 м. Содержания Au – 0,2–0,4 г/т, Ag – 8,9–20,8 г/т, Pb – 0,2–0,45 %, Sb – 0,03–0,07 %. Жильная зона сопровождается аргиллизитами.

Жила № 3 расположена в 3 м севернее жилы № 2. Она преимущественно кварцевая с примесью кальцита, хлорита, сидерита мощностью 1–4 м с азимутом падения 205°, углом падения 80°. Содержания Au от 0,5 до 11,6 г/т, Ag – от 12 до 491,8 г/т, Pb – от 1,6 до 9,54 %, Sb – от 0,3 до 1,17 %. Кедровской партией вскрыта в 10 м восточнее при мощности 15 см с незначительным содержанием сульфидов Pb, Cu.

Жилы № 4, 5 расположены соответственно в 30 м севернее и в 65 м южнее жилы № 1 (р-н канавы № 1) в коренном залегании в обнажениях. Канавами не вскрывались, не прослеживались и не опробовались как безрудные (Котларов). Жилой № 5 могут являться прожилки безрудного кварца мощностью до 10–15 см, пересечённые К-1000 в её начале в 45 м южнее жилы № 1.

Жила № 6 кварц-сидеритового состава с хлоритом, иллитом, монтмориллонитом и вкрапленностью пирита расположена в 220 м южнее жилы № 1 по левому борту ключа Аммональный. Мощность её 40 см, азимут падения 160°, углы падения 65–70°. Прослежена в ЮЗ направлении на 90 м. По химическим анализам значимые содержания Pb, Cu, Au и Ag отсутствуют (в лучшем случае «следы»).

Жила № 7 расположена в 190 м ниже (южнее) по склону от жилы № 1 на водоразделе ручьёв Аммональный и Зайков. Залегание её субгоризонтальное (падение под углами 5–10° на ЮЮЗ). Мощность 10–20 см, прослежена по простираению на 11,2 м, на всём протяжении содержит крупнокристаллический галенит, теннантит, тетраэдрит, редко энаргит, а также халькопирит, пирит, малахит и азурит, образующие гнезда размером до 10–20 см и более, вплоть до сливных массивных руд, аналогичных наблюдаемым в восточной части жилы № 1. Мощные аргиллизиты развиты в висячем боку жилы. Содержания золота составляют от 0,5 до 8,9 г/т, серебра – от 15 до 127 г/т. В канавах установлено, что жила взброшена (северный край опущен по отношению к южному примерно на 1 м) разломом субширотного простираения крутого южного падения. В 15 м северо-западнее канавой вскрыта также субгоризонтальная жила мощностью 10 см с гнездами галенита. Задириковая проба показала содержания Pb – 15,1 %, Cu –

2,35 %, Zn – 0,1 %. Жила подсечена двумя канавами и прослежена по простираению в свалах от правого борта ручья Аммональный до русла ручья Зайков. Магистральной канавой К-1000 длиной 141 м на водоразделе ручьёв Аммональный–Зайков жила № 1 пересечена под острым углом в интервале ПК56–59 при истинной мощности около 1 м, где она представлена зоной 0,6–0,7 м сливных полиметаллических руд, в лежачем боку зона ожелезнённой кварцевой сыпучки сильно ноздреватого кварца, глинистых минералов иллит-монтмориллонитового ряда также отвечает околорудным аргиллизитам. По жиле отобрано три бороздовые пробы, показавшие содержания: Ag – 2268–6673 г/т, Au – 26–43,8 г/т, Pb – до 15,9 %, Cu – до 7,25 %, Zn – 0,2 %, As, Sb – >1 %, Bi – 0,06 %, Cd – 0,03.

В 400 м западнее и в 250 м гипсометрически ниже жила № 1 подсечена канавой К-1003 в правом борту ручья Аммональный. Здесь её мощность составляет 3 м. В ноздреватом кварце вкрапленность пирита, галенита и блёклых руд рассеянная не более 1–3 %, максимальные содержания Ag – 123 г/т, Au – 3,04 г/т. Далее в западном направлении жила прослежена в отвалах старых канав и в виде обломков на склоне с содержаниями Au от 0,92 до 6,5 г/т, Ag от 2,5 до 126 г/т. В восточном направ-

лении от канавы К-1000 жила также прослеживается вначале по канавам, затем по обломкам в делювии с убыванием степени минерализации и, соответственно, содержаниями золота от 0,28 до 7,86 г/т, серебра от 25 до 235 г/т, что связано с увеличением уровня эрозийного среза жилы.

На площади рудного поля кроме коренного оруденения известно пять россыпей золота, частично отработанных до 1950 г.: Красноярская, Кумирская, Щербноухинская, Кытминская, Татарская.

Минеральный состав руд Красноярского месторождения

По текстурным взаимоотношениям (пересечениям прожилков и дроблению) в составе эндогенных руд выделяются три стадии минерализации. Первые две стадии можно рассматривать рудными, а третью стадию – пострудной. Типоморфной ассоциацией руд месторождения является теннантит-тетраэдрит-энаргит-люционитовая, указывающая на значительную сернистость сульфидов, что характерно для высокосерных эпitherмальных систем [10, 11]. Минеральный состав и последовательность минералообразования в рудах при визуальном изучении, а также исследованиях в шлифах и аншлифах представлены в табл. 3

Таблица 3. Парагенетическая схема последовательности минералообразования

Table 3. Paragenetic scheme of mineral forming sequence

| Минералы/ Minerals | Эндогенные стадии/Endogenetic stages | | | Гипергенез / Gipergeneses |
|--------------------------------|--------------------------------------|----------------------|----------------------|------------------------------|
| | 1 стадия/ 1 stage | 2 стадия/ 2 stage | 3 стадия/ 3 stage | |
| Кварц/Quartz | | | | |
| Кальцит/Calcite | | | | |
| Сидерит/Siderite | | | | |
| Пирит/Pyrrite | | | | |
| Галенит/Galenite | | | | |
| Сфалерит/Sphalerite | | | | |
| Халькопирит/Chalcopyrite | | | | |
| Теннантит/Tennantite | | | | |
| Тетраэдрит/Tetrahedrite | | | | |
| Энаргит/Enargite | | | | |
| Люционит/Luzonite | | | | |
| Электрум/Electrum | | | | |
| Аргентит/Argentite | | | | |
| Гессит/Hessite | | | | |
| Тетрадимит/Tetrademite | | | | |
| Алтаит/Altaite | | | | |
| Иллит/Illite | | | | |
| Монтмориллонит/Montmorillonite | | | | |
| Каолинит/Kaolinite | | | | |
| Хлорит/Chlorite | | | | |
| Церуссит/Cerussite | | | | |
| Гематит/Hematite | | | | |
| Малахит/Malachite | | | | |
| Азурит/Azurite | | | | |
| Ковеллин/Covellite | | | | |
| Ярозит/Jarosite | | | | |

Электрум тесно ассоциирует с теллуридами и имеет пробность 617–624 ‰. В качестве примесей, кроме серебра, присутствуют медь и мышьяк. Размеры выделений электрума варьируют от 0,005 до 1,6 мм.

По отношениям Ag/Au руды Красноярского месторождения следует относить к Ag-Au объектам [12], так как в них это отношение превышает 10 и достигает 135–150.

Физико-химические особенности рудного процесса

Температуры гомогенизации первичных газо-жидких включений в кварце 1, 2 и 3 генераций снижались от 255 к 245 °C и 180 °C, соответственно. Солёность растворов также снижалась от 6–7 вес. % NaCl до 0,5–1 вес. % NaCl. Это свидетельствует о процессах смешения ювенильных растворов на поздних этапах становления гидротермальной системы. Некоторые термобарометрические и изотопные данные приведены в табл. 4.

Таблица 4. Термобарогеохимические и изотопные данные исследований минералов Красноярского месторождения

Table 4. Thermobarogeochemical and isotopic data of Krasnoyarsk deposit minerals research

| Минерал Mineral | n | $T_{\text{гом}}/T_{\text{ном}}$, °C | Солёность, мас. % экв. NaCl Salinity, eq. wt. % NaCl | $\delta^{34}\text{S}$, ‰ | $\delta^{34}\text{S}$, ‰ SMOW |
|---------------------|---|---|---|---------------------------|-----------------------------------|
| Кварц 1 Quartz 1 | 2 | 265–250 | 6,0–7,0 | – | 15,8–16,2 |
| Кварц 2 Quartz 2 | | 250–245 | 2,0–1,8 | – | 17,0–18,8 |
| Кварц 3 Quartz 3 | | 175–185 | 0,5–1,0 | – | – |
| Пирит 1 Pyrite 1 | 2 | – | – | (–3,5)–(–1,7) | – |
| Пирит 2 Pyrite 2 | | – | – | (–1,5)–(+5,5) | – |

Примечание. n – число проб; SMOW – среднее содержание в морской воде.

Note. n is the number of samples; SMOW (Standard Mean Ocean Water) is the average content in sea water.

Существенно сфалерит-теннантит-галенитовые руды с хлоритом восточной части зоны № 1 формировались из хлоридно-натриевых слабо концентрированных (7,0–6,0 мас. % экв. NaCl) растворов при температуре 260–255 °C. Согласно хлоритовому термометру в полиметаллических рудах хлорит формировался при температурах 255–250 °C. Содержания тяжёлого изотопа серы в пирите отвечает магматогенному источнику, а кислорода – метеорным водам.

Для оценки зависимостей температур и фугитивности серы (fS_2) при кристаллизации руд Красноярского месторождения были использованы фазовые взаимоотношения и изменения состава минералов в системе Fe-Zn-S [13]. Предварительно в составе сфалерита 1 генерации содержание FeS определено в количестве 0,5–8,4 мол. %, а в составе сфалерита 2 генерации – 1–5,7 мол. %. На основании этих данных изменение фугитивности серы

можно отразить на диаграмме (рис. 5). С понижением температуры кристаллизации минеральных парагенезисов происходило снижение фугитивности серы. Для первой стадии фугитивность серы составляет (–10–11), а для второй стадии (–15–16).

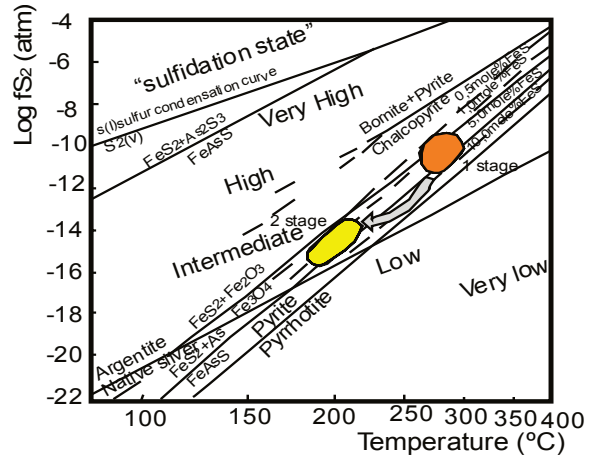


Рис. 5. Диаграмма $\text{Log}fS_2$ – температура для рудной минерализации Красноярского месторождения. Изоплеты FeS содержания для сфалерита рассчитаны с использованием уравнений по [13]. Оранжевое поле – приблизительные оценки фугитивности серы и температурные условия для 1 стадии, жёлтое поле – для 2 стадии

Fig. 5. Plot $\text{Log}fS_2$ vs. temperature for ore mineralization for Krasnoyarsk deposit. Isoleths of FeS content for sphalerite are calculated using the equations after [13]. Orange field is the approximate estimates of sulfur fugacity and temperature for 1st stage, yellow field – for 2nd stage

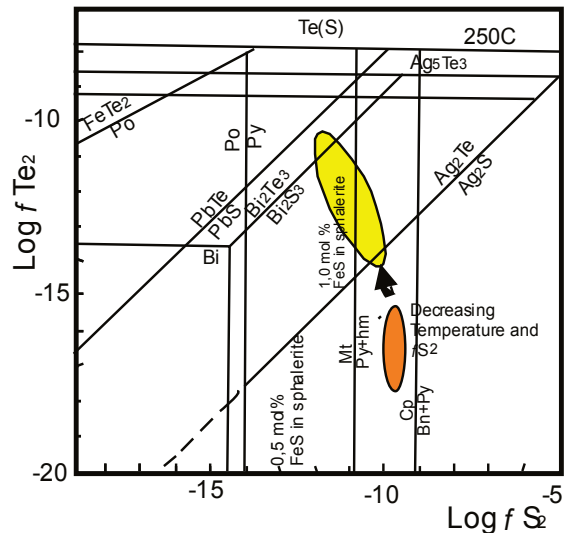


Рис. 6. Диаграмма $\text{Log}fTe_2$ – $\text{Log}fS_2$ для руд Красноярского месторождения. Диаграмма показывает равновесие между теллуридами и сульфидами для руд Красноярского месторождения при 250 °C в условиях газового насыщения по [14]. Оранжевое поле – для сульфидной ассоциации, жёлтое поле – для теллуридной ассоциации руд Красноярского месторождения

Fig. 6. Plot $\text{Log}fTe_2$ vs. $\text{Log}fS_2$ for ores of Krasnoyarsk deposit. The plot shows the equilibria between tellurides and sulfides for ores of Krasnoyarsk deposit at 250 °C in condition of vapor saturation after [14]. Orange field is for sulfide association, yellow – for telluride association of Krasnoyarsk deposit ores

Условия отложения минералов теллуридного парагенезиса могут быть также определены с использованием равновесий между сульфидами и теллуридами. Вариации фугитивностей f_{Te_2} и S_2 в условиях равновесия теллуриды-сульфиды при 250 °C по [14] показаны на рис. 6.

Сульфидная ассоциация минералов была отложена при температуре 250 °C при фугитивности f_{S_2} от -10,5 до -9,5 и фугитивности f_{Te_2} менее -15. Теллуридный парагенезис отлагался при значениях $\log f_{S_2}$ в диапазоне от -12 до -10 и фугитивности f_{Te_2} от -14 до -10.

Оценка фугитивности кислорода и pH среды может быть проведена в комбинации с фазовыми взаимоотношениями в системе Fe-O-S. Учитывая определённые молекулярные количества FeS в сфалерите и ассоциации глинистых минералов – иллита и каолинита, построена диаграмма $\text{Log}f_{O_2}$ – pH (рис. 7). Фугитивность кислорода оценена в пределах от -39,5 до -37. При этом она увеличивалась при отложении энаргита, теннангита и теллуридов. pH варьировала от 4 до 5,4.

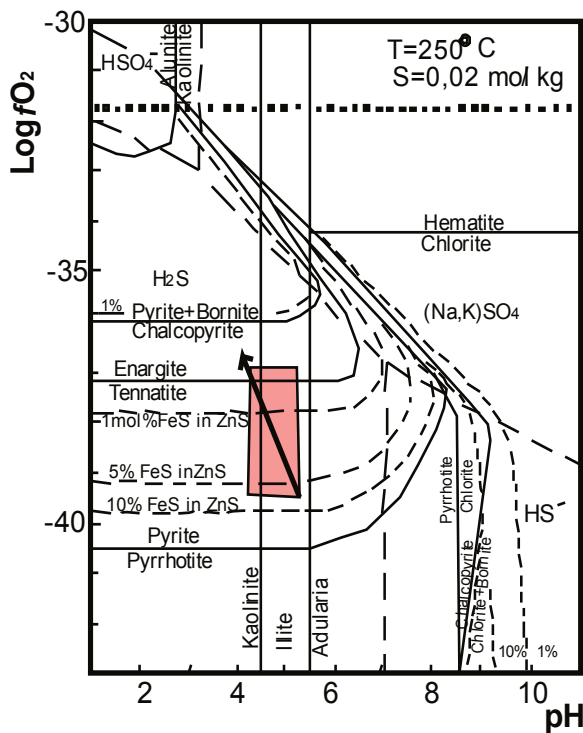


Рис. 7. Диаграмма $\text{Log}f_{O_2}$ – pH для руд Красноярского месторождения. Значения pH и f_{O_2} первичных рудных флюидов модифицированы по [15]. Стрелкой показано изменение состояния рудных флюидов от нейтральных к слабо кислотным. Розовым цветом показано поле стабильности для различных минералов с мол. % FeS в сфалерите при $T=250$ °C, $\Sigma S=0,02$ мол/кг

Fig. 7. Plot $\text{Log}f_{O_2}$ vs. pH for ores of Krasnoyarsk deposit. Values of pH and f_{O_2} of primary ore fluids modified after [15]. Arrow shows the ore fluid state changing from neutral to slightly acidic. Pink colour shows stability field for different minerals with mol. % FeS in sphalerite at $T=250$ °C, $\Sigma S=0,02$ mol/kg

Интерпретация результатов

В настоящее время предполагается три главных процесса, приводящих к образованию и дифференциации риолитового материала в вулканогенных поясах с эпitherмальным оруденением: кристаллизационное фракционирование [16, 17], частичное плавление континентальной коры [18, 19] и термогравитационная диффузия, при которой химическое фракционирование достигалось при полном расплавлении [20].

Популярная модель термодиффузии в жидкой среде, предложенная В. Хилдретом [20], способна объяснить различие интерпретаций образования риолитов, в том числе и субвулканических кислых образований, в различных районах. Она раскрывает механизм обогащения совместимыми сидерофильными элементами (такими как Y, Sc и Mn) и несовместимыми элементами, характерной особенностью которых является несовместимость с любой системой и прежде всего с системой кристалл-жидкость. По указанным параметрам к Красноярской магмо-рудно-метасоматической системе может быть применима именно модель термодиффузии. Она также даёт объяснение механизмам фракционирования тяжёлых редкоземельных элементов относительно лёгких без привлечения фракционирования циркона или апатита. Модель помогает понять процесс обогащения флюидной фазы магматитов благородными элементами. Главные летучие компоненты в большинстве магм представлены H_2O , CO_2 и S_2 или H_2S [21]. В субвулканических породах проявлен тетрадный эффект фракционирования РЗЭ W-типа и его величины негативно коррелируются с содержаниями золота и серебра в породах.

Однако модель термодиффузии для условий Красноярской магмо-рудно-метасоматической системы была генерирована в результате процессов смешения базальтового источника и корового материала, что подтверждается анализом соотношений La/Nb и Ce/Y (рис. 8).

Известно, что высоко-серные эпitherмальные золото-серебряные месторождения характеризуются наличием в рудах энаргита и люционита [21, 23, 24], как это имеет место и в рудах Красноярского месторождения. Установлено, что высоко-серные эпitherмальные Au-Cu месторождения развиваются в обстановках, где летучие компоненты поднимаются вверх очень быстро из глубинного магматического источника и не взаимодействуют с вмещающими породами и окружающими водами на глубине, становясь очень горячими кислотными гидротермальными флюидами, которые только на эпitherмальных близ-поверхностных уровнях взаимодействуют с вмещающими породами [25]. Прогрессивное охлаждение и нейтрализация горячих кислотных гидротермальных флюидов вмещающими породами в близ-поверхностной обстановке продуцирует кислотно-сульфатный тип изменений и зо-

нальные аргиллизиты с формированием типичных ассоциаций пирита, энаргита, люционита [26].

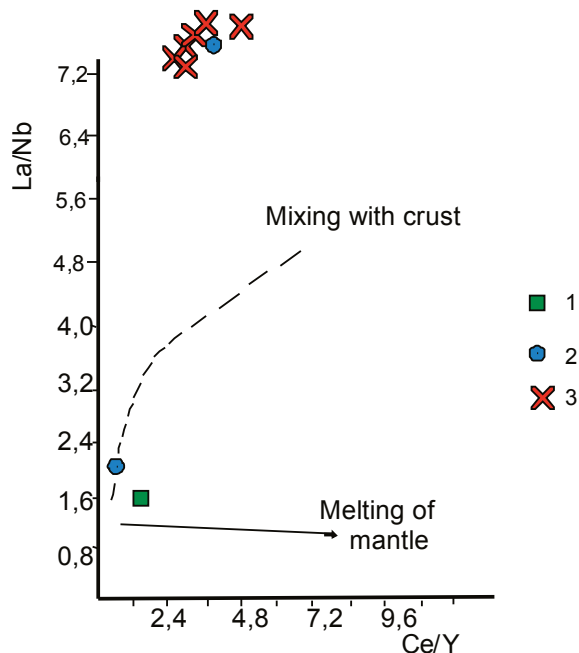


Рис. 8. Диаграмма соотношений $La/Nb-Ce/Y$ по [22] для субвулканических пород Красноярского рудного поля. Условные обозначения – на рис. 2

Fig. 8. Plot ratio La/Nb vs. Ce/Y after [22] for subvolcanic rocks of Krasnoyarsk ore field. Legend is in the Fig. 2

Аналогичный механизм предполагается и для формирования руд Красноярского месторождения. Физико-химические и термодинамические условия формирования руд месторождения весьма показательны и находят много общих черт с объектами подобного типа, описанными в различных регионах [27, 28]. От сульфидной стадии к теллуридной в рудах Красноярского месторождения происходило понижение температуры кристаллизации при значительном снижении фугитивности серы и повышении фугитивности теллура и кислорода. От ранней стадии к поздней происходила трансформация рН среды от близ-нейтральной в сульфидном парагенезисе до сильно кислой среды при отложении теллуридов. Такая смена термодинамического режима генерации руд объясняется повышением уровня становления магматического глубинного очага [29, 30].

В последнее время стало известно, что месторождения порфирово-эпитермальных минеральных систем ассоциированы с островодужным магматизмом в пределах конвергентных геодинамических обстановок. Такие системы зональны и глубже эпитермального оруденения должно локализоваться порфиоровое и, возможно, скарновое. Совмещение порфиорового и эпитермального Au-Ag оруденения отмечается в рудах Михеевского место-

рождения на Урале [28], Au-Ag месторождениях Роговик и Баймка на Северо-Востоке России [31, 32], в Айлаошаньском рудном поясе на Северо-Западе Китая [33].

В Красноярском рудном поле возможно выявление, кроме эпитермального, медно-порфиорового и скарнового оруденения.

Заключение

Магмо-рудно-метасоматическая система Красноярского рудного поля охватывает вулканиты риолитового состава, субвулканические штоки плагиолейкогранит-порфиров и плагиогранит-порфиров коргонского комплекса среднего девона. Субвулканические образования формировались в результате смешения мантийного и корового материала, что сказалось на формировании околорудных метасоматитов и эпитермального оруденения. В объяснении формирования геохимического облика магматитов, метасоматитов и рудных парагенезисов привлекается модель термодиффузии в жидкой среде. Основную роль среди летучих компонентов играли H_2O , CO_2 и S_2 или H_2S . Поэтому в породах проявлен ТЭФ РЗЭ W-типа. С уменьшением величин ТЭФ РЗЭ увеличиваются концентрации Au и Ag в субвулканических образованиях. Околорудные метасоматиты охватывают комплекс окварцевания, аргиллизации с развитием каолинита, монтмориллонита и иллита.

Эпитермальное оруденение Красноярского рудного поля отнесено к высоко-серному типу с парагенезисами блёклых руд, энаргита и люционита, типоморфных высоко-серных сульфидов. Вторая рудная стадия характеризовалась проявлением теллуридов (тетрадимита, алтаита, гессита и других). Такая резкая смена парагенезисов вызвана изменениями в глубинном очаге с повышением его уровня. Резко кислотная обстановка формирования оруденения создавала интенсивные процессы окремнения и окварцевания и изменение фугитивностей серы, теллура и кислорода с варьированием рН среды от почти нейтральной до сильно кислой. Сера сульфидов имела мантийные метки, а изотопы кислорода отвечают значениям метеорных вод. Флюиды, формировавшие оруденение, в процессе быстрого подъёма не смешивались с метеорными водами и лишь на близ-поверхностном уровне происходило смешение ювенильных флюидов и метеорных вод.

В районе Красноярского рудного поля может быть выявлено, помимо эпитермального, медно-порфиоровое и скарновое оруденение.

Работа выполнена при поддержке регионального гранта РФФИ «Петрология магматизма и генезис оруденения Коргоно-Красноярского рудного района Алтайского края» (номер проекта: 18-45-220022, код и название конкурса: р а, региональный конкурс проектов фундаментальных научных исследований).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. White N.C., Hedenquist J.W. Epithermal environments and styles of mineralization: Variations and their causes, and guidelines for exploration // *Journal of Geochemical Exploration*. – 1990. – V. 36. – № 1–3. – P. 445–474. URL: [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(90\)90063-G](https://doi.org/10.1016/0375-6742(90)90063-G) (дата обращения 23.03.2018).
2. Гусев Н.И., Шокальский С.П., Гусев А.И. Возраст магматизма (U-Pb, SHRIMP II), контролирующего эпиптермальное оруденение Новофирсовского золоторудного узла (Алтай) // *Региональная геология и металлогения*. – 2011. – № 45. – С. 98–105.
3. Anders E., Grevesse N. Abundances of the elements: meteoritic and solar // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1989. – V. 53. – № 1. – P. 197–214. DOI: 10.1016/0016-7037(89)90286-X.
4. Maniar P.D., Piccoli P.M. Tectonic discrimination of granitoids // *Geological Society of America Bulletin*. – 1989. – V. 101. – № 5. – P. 635–643. DOI: 10.1130/0016-7606(1989)101<0635:TDOG>2.3.CO;2.
5. Villaseca C., Barbero L., Herreros V. A re-examination of the typology of peraluminous granite types in intracontinental orogenic belts // *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*. – 1998. – V. 89. – № 2. – P. 113–119. DOI: 10.1017/S0263593300007045
6. Irber W. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1999. – V. 63. – № 3–4. – P. 489–508. DOI: 10.1016/S0016-7037(99)00027-7. URL: [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00027-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00027-7) (дата обращения 01.04.2018).
7. Гусев А.И. К геохимии акцессорного пирита Кошрабадского массива Западного Узбекистана // *Актуальные проблемы геологии, геофизики и металлогении: материалы конференции, посвященной 80-летию создания Института геологии и геофизики и 105-летию со дня рождения академика Х.М. Абдуллаева*. – Ташкент, 2017. – С. 229–232.
8. Виноградов А.П. Среднее содержание химических элементов в горных породах // *Геохимия*. – 1962. – № 7. – С. 555–571.
9. Wasson J.T., Kallemejn G.W., Runcorn S.K., Turner G., Wolfson M.M. Compositions of chondrites // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical & Engineering Sciences*. – 1988. – V. 325. – № 1587. – P. 535–544. DOI: 10.1098/rsta.1988.0066. URL: <https://doi.org/10.1098/rsta.1988.0066> (дата обращения 01.04.2018).
10. Meyer C., Hemiey J.J. Wall rock alteration // *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits* / Ed. by H.L. Barnes. – New York: Holt, Rinehart and Winston, 1967. – P. 166–235.
11. Hedenquist J.W. Precious metal vein systems in the National District, Humboldt County, Nevada; discussion // *Economic Geology*. – 1986. – V. 81. – № 4. – P. 1020–1023. URL: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.81.4.1020> (дата обращения 23.03.2018).
12. Золоторудные месторождения нетрадиционных типов – основа укрепления сырьевой базы в районах золотодобычи Алтая / С.С. Вартамян, Ю.М. Щелотьев, А.И. Зайцев, Н.П. Бедарев, Ю.Н. Николаев // *Руды и металлы*. – 2006. – № 3. – С. 5–13.
13. Scott S.D., Barnes H.L. Sphalerite geothermometry and geobarometry // *Economic Geology*. – 1971. – V. 66. – № 4. – P. 653–669. URL: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.66.4.653> (дата обращения 23.03.2018).
14. Afifi A.M., Kelly W.C., Essene E.J. Phase relations among tellurides, sulfides, and oxides; I, Thermochemical data and calculated equilibria // *Economic Geology*. – 1988. – V. 83. – № 2. – P. 377–394. URL: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.83.2.377> (дата обращения 23.03.2018).
15. John D.A. Miocene and Early Pliocene epithermal gold-silver deposits in the Northern Great basin, Western United States: characteristics, distribution, and relationship to magmatism // *Economic Geology*. – 2001. – V. 96. – № 8. – P. 1827–1853. URL: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.96.8.1827> (дата обращения 23.03.2018).
16. Cameron M., Bagby W.C., Cameron K.L. Petrogenesis of Voluminous mid-Tertiary ignimbrites of the Sierra Madre Occidental, Chihuahua, Mexico // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 1980. – V. 74. – № 3. – P. 271–284. URL: <https://doi.org/10.1007/BF00371697> (дата обращения 23.03.2018).
17. Bagby W.C., Cameron K.L., Cameron M. Contrasting evolution of calc-alkalic volcanic and plutonic rocks of western Chihuahua, Mexico // *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. – 1981. – V. 86. – Iss. B11. – P. 10402–10410. URL: <https://doi.org/10.1029/JB086iB11p10402> (дата обращения 23.03.2018).
18. Moll E.J. Geochemistry and petrology of Mid-Tertiary ash flow tuffs from the Sierra el Virulento Area, eastern Chihuahua, Mexico // *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. – 1981. – V. 86. – Iss. B11. – P. 10321–10334. URL: <https://doi.org/10.1029/JB086iB11p10321> (дата обращения 23.03.2018).
19. Pleistocene high-silica rhyolites of the Coso Volcanic Field, Inyo County, California / C.R. Bacon, R. Macdonald, R.L. Smith, P.A. Baedeker // *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. – 1981. – V. 86. – Iss. B11. – P. 10223–10241. URL: <https://doi.org/10.1029/JB086iB11p10223> (дата обращения 23.03.2018).
20. Hildreth W. Gradients in silicic magma chambers: Implications for lithospheric magmatism // *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. – 1981. – V. 86. – Iss. B11. – P. 10153–10192. URL: <https://doi.org/10.1029/JB086iB11p10153> (дата обращения 23.03.2018).
21. Sillitoe R.H., Hedenquist J.W. Linkages between Volcanotectonic Settings, Ore-Fluid Compositions and Epithermal Pressurized Metal Deposits // *Society of Economic Geologists. Special Publication*. – 2003. – V. 10. – P. 315–343.
22. Barbarin B. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments // *Lithos*. – 1999. – V. 46. – Iss. 3. – P. 605–626. URL: [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(98\)00085-1](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(98)00085-1) (дата обращения 23.03.2018).
23. Cooke D.R., Simmons S.F. Characteristics and genesis of epithermal gold deposits // *Reviews in Economic Geology*. – 2000. – V. 13. – P. 221–244.
24. Enargite-luzonite hydrothermal vents in Manus Back-Arc Basin: submarine analogues of high-sulfidation epithermal mineralization / V.M. Dekov, O. Rouxel, K. Kouzmanov, L. Bindi, D. Asael, Y. Fouquet, J. Etoubleau, G. Burgaud, M. Wälle // *Chemical Geology*. – 2016. – V. 438. – P. 36–57. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.05.021> (дата обращения 23.03.2018).
25. Corbett G. Anatomy of porphyry-related Au-Cu-Ag-Mo mineralized systems: Some exploration implications // *AIG Bulletin*. – 2009. – № 49. – P. 33–46.
26. Hedenquist J.W. Epithermal High Sulfidation Gold Deposits. URL: http://www.geologinesia.com/2015/11/epithermal-high-sulfidation-gold_9.html (дата обращения 26.03.2018).
27. Mineralogy, alteration patterns, geochemistry, and fluid properties of the Ag-Au epithermal deposit Nová Baňa, Slovakia / J. Majzlan, K. Berkh, S. Kiefer, P. Kodera, A.E. Fallick, M. Chovan, F. Bakos, A. Biron, S. Ferenc, J. Lexa // *Mineralogy and Petrology*. – 2018. – V. 112. – Iss. 1. – P. 1–23. URL: <https://doi.org/10.1007/s00710-017-0516-0> (дата обращения 26.03.2018).
28. Precious metals assemblages at the Mikheevskoe porphyry copper deposit (South Urals, Russia) as proxies of epithermal overprinting / O.Y. Plotinskaya, O.B. Azovskova, S.S. Abramov, E.O. Groznova, K.A. Novoselov, R. Seltmann, J. Spratt // *Ore Geology Reviews*. – 2018. – V. 94. – P. 239–260. URL: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.01.025> (дата обращения 26.03.2018).
29. Zhai D., Liu J. Gold-telluride-sulfide association in the Sandawanzi epithermal Au-Ag-Te deposit, NE China: implications for phase equilibrium and physicochemical conditions // *Mineralogy and Petrology*. – 2014. – V. 108. – Iss. 6. – P. 853–871. URL:

- <https://doi.org/10.1007/s00710-014-0334-6> (дата обращения 26.03.2018).
30. Yuningsih E.T., Matsueda H. Genesis and origin of Te-bearing gold-silver-base metal mineralization of the Arinem deposit in western Java, Indonesia // *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*. – 2014. – V. 109. – Iss. 2. – P. 49–61. URL: <https://doi.org/10.2465/jmps.130118a> (дата обращения 26.03.2018).
31. Physicochemical models of formation of gold–silver mineralization at the Rogovik deposit (Northeastern Russia) / T.V. Zhuravkova, G.A. Palyanova, K.V. Chudnenko, R.G. Kravtsova, I.R. Prokopyev, A.S. Makshakov, A.S. Borisenko // *Ore Geology Reviews*. – 2017. – V. 91. – P. 1–20. URL: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.10.017> (дата обращения 26.03.2018).
32. Gold-Silver mineralization in porphyry-epithermal systems of the Baimka trend, western Chukchi Peninsula, Russia / Yu.N. Nikolaev, I.A. Baksheev, V.Yu. Prokofiev, E.V. Nagornaya, L.I. Marushchenko, Yu.N. Sidorina, A.F. Chitalin, I.A. Kal'ko // *Geology of Ore Deposits*. – 2016. – V. 58. – № 4. – P. 284–307. DOI: 10.1134/s107570151604005x
33. Paleogene magmatism and gold metallogeny of the Jinping terrane in the Ailaoshan ore belt, Sanjiang Tethyan Orogen (SW China): Geology, deposit type and tectonic setting / J. Zhang, H. Wang, S. Li, T. Li // *Ore Geology Reviews*. – 2017. – V. 91. – P. 620–637. URL: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.08.032> (дата обращения 26.03.2018).

Поступила 04.04.2018 г.

Информация об авторах

Гусев А.И., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры естественно-научных дисциплин, безопасности жизнедеятельности и туризма Алтайского государственного гуманитарно-педагогического университета имени В.М. Шукшина.

Табакаева Е.М., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник управления научно-исследовательской деятельности Алтайского государственного гуманитарно-педагогического университета имени В.М. Шукшина.

UDC 552.3:550.4:550.42:550.93

MAGMATISM AND EPITHERMAL Ag-Au ORE MINERALIZATION OF KRASNOYARSK GOLD ORE FIELD OF GORNY ALTAI

Anatoliy I. Gusev¹,
anzerg@mail.ru

Evgeniya M. Tabakaeva¹,
tabakaeva16@mail.ru

¹ Shukshin Altai State Humanities Pedagogical University,
53, Vladimir Korolenko street, Biysk, 659333, Russia.

The relevance of the study is caused by the need of researching petrology, geochemistry subvolcanic rocks and epithermal Ag-Au ore mineralization of Krasnoyarsk ore field of Gorny Altai. Different types of ore mineralization: copper, cobalt, arsenic, tungsten and gold, are associated in space and paragenetic with subvolcanic stocks of granitoids. High sulfidation type of Ag-Au ore mineralization was re-searched first in Gorny Altai.

The main aim of the research is to study petrology, geochemical features of rocks and ore mineralization of Krasnoyarsk deposit using the experimental diagrams, which allow solving the genetic problems and revealing the physic-chemical features of petro- and ore-genesis.

Methods. Elements were determined in rocks by inductively coupled plasma method on the mass spectrometer «OPTIMA-4300» in the Laboratory of Institute of mineralogy, geochemistry and crystallochemistry of rare elements (Moscow). Isotopes of sulfur and oxygen were determined on the mass-spectrometer MI 1201B in the same laboratory.

Results. Subvolcanic stocks of granitoids of the Middle Devonian of Korgonskiy complex are the main ore generating objects in Krasnoyarsk ore field. These granitoids are of the peraluminous type with varying contents of Mg and Fe. The tetrad effect of REE fractionation (W-type) is revealed in rocks. The contents of Au and Ag in rocks increase with decreasing value of tetrad effect of REE fractionation (W-type). The deep magma chamber evolved toward increasing its level with the formation of sharply acid-sulfur characteristics and with the formation of near ore argillites. Mineralization of the Krasnoyarsk deposit is represented by a series of nested quartz lodes with the formation of a kind of linear stockwork. Ores are formed in three stages: sulfidic, telluridic and postmineral. The main ore minerals are pyrite, galenite, sphalerite, tetrahedrite, tennantite, electrum, tetradymite, seldom – altaite, hessite, enargite, luzonite. The main minerals of lodes are quartz, calcite, chlorite, siderite, kaolinite, montmorillonite, illite. Gold content in ores changes from 0,5 to 29,6 ppm, silver – from 15 to 5000 ppm. Ratio of Ag/Au in ores is from 135 to 150. This indicates that the Krasnoyarsk deposit belongs to the Ag-Au type. The temperatures of homogenization of gas-liquid inclusions in quartz of different generations from stage to stage decreased from 265 to 175 °C. The sulfur fugacity decreased from the first stage (–10–11) to the second one (–15–16), fTe₂ increased from (–15) to (–10) and fO₂ increased from (–39,5) to (–37). Isotopes of sulfur and oxygen indicate a magmatic source for sulfur and meteoric for oxygen.

Key words:

Geochemistry, petrology, granitoids, stocks, tetrad effect fractionation of REE fractionation, lodes, lead, copper, gold, silver, fugacity of S₂, O₂, Te₂.

The research was supported by the RFBR regional grant «Petrology of magmatism and genesis of ore-formation of Korgon-Krasnoyarsk ore area in Altai region» (project no. 18–45–220022, code and title of the contest: p_a, regional contest of projects of fundamental researches).

REFERENCES

- White N.C., Hedenquist J.W. Epithermal environments and styles of mineralization: Variations and their causes, and guidelines for exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 1990, vol. 36, no. 1–3, pp. 445–474. Available at: [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(90\)90063-G](https://doi.org/10.1016/0375-6742(90)90063-G) (accessed 23 March 2018).
- Gusev N.I., Shokalskii S.P., Gusev A.I. The age of magmatism (U-Pb, SHRIMP II) controlling the epithermal mineralization of the Novofirsovsky gold ore cluster (Altai). *Regional Geology and Metallogeny*, 2011, no. 45, pp. 98–105. In Rus.
- Anders E., Grevesse N. Abundances of the elements: meteoritic and solar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, vol. 53, no. 1, pp. 197–214. DOI: 10.1016/0016-7037(89)90286-X.
- Maniar P.D., Piccoli P.M. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, vol. 101, no. 5, pp. 635–643. DOI: 10.1130/0016-7606(1989)101<0635:TD0G>2.3.CO;2.
- Villaseca C., Barbero L., Herreros V. A re-examination of the typology of peraluminous granite types in intracontinental orogenic belts. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 1998, vol. 89, no. 2, pp. 113–119. DOI: 10.1017/S0263593300007045
- Irber W. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, vol. 63, no. 3–4, pp. 489–508. DOI: 10.1016/S0016-7037(99)00027-7. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00027-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00027-7) (accessed 1 April 2018).
- Gusev A.I. K geokhimii aktsessornogo pirita Koshrabadskogo massiva Zapadnogo Uzbekistana [To the geochemistry of accessory pyrite of the Koshrabad massif of Western Uzbekistan]. *Aktualnye problemy geologii, geofiziki i metallogenii. Materialy konferentsii, posvyashchennoy 80-letiyu sozdaniya Instituta geologii i geofiziki i 105-letiyu so dnya rozhdeniya akademika Kh.M. Abdullaeva* [Actual problems of geology, geophysics and metallogeny. Conference materials devoted to the 80th anniversary of creation of the Institute of Geology and Geophysics and the 105th anniversary of the birth of Academician H.M. Abdullaev]. Tashkent, 2017. pp. 229–232.
- Vinogradov A.P. Average content of chemical elements in rocks. *Geochemistry International*, 1962, no. 7, pp. 555–571. In Rus.

9. Wasson J.T., Kallemeyn G.W., Runcorn S.K., Turner G., Woolfson M.M. Compositions of chondrites. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical & Engineering Sciences*, 1988, vol. 325, no. 1587, pp. 535–544. DOI: 10.1098/rsta.1988.0066. Available at: <https://doi.org/10.1098/rsta.1988.0066> (accessed 1 April 2018).
10. Meyer C., Hemiey J.J. Wall rock alteration. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits* Ed. by H.L. Barnes. New York, Holt, Rinehart and Winston, 1967. pp. 166–235.
11. Hedenquist J.W. Precious metal vein systems in the National District, Humboldt County, Nevada; discussion. *Economic Geology*, 1986, vol. 81, no. 4, pp. 1020–1023. Available at: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.81.4.1020> (accessed 23 March 2018).
12. Vartanyan S.S., Schepotev Yu.M., Zaytsev A.I., Bedarev N.P., Nikolaev Yu.N. Gold ore deposits of non-traditional types – the basis for strengthening the resource base in the gold mining areas of Altai. *Ores and Metals*, 2006, no. 3, pp. 5–13. In Rus.
13. Scott S.D., Barnes H.L. Sphalerite geothermometry and geobarometry. *Economic Geology*, 1971, vol. 66, no. 4, pp. 653–669. Available at: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.66.4.653> (accessed 23 March 2018).
14. Afifi A.M., Kelly W.C., Essene E.J. Phase relations among tellurides, sulfides, and oxides; I, Thermochemical data and calculated equilibria. *Economic Geology*, 1988, vol. 83, no. 2, pp. 377–394. Available at: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.83.2.377> (accessed 23 March 2018).
15. John D.A. Miocene and Early Pliocene epithermal gold-silver deposits in the Northern Great basin, Western United States: characteristics, distribution, and relationship to magmatism. *Economic Geology*, 2001, vol. 96, no. 8, pp. 1827–1853. Available at: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.96.8.1827> (accessed 23 March 2018).
16. Cameron M., Bagby W.C., Cameron K.L. Petrogenesis of Voluminous mid-Tertiary ignimbrites of the Sierra Madre Occidental, Chihuahua, Mexico. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1980, vol. 74, no. 3, pp. 271–284. Available at: <https://doi.org/10.1007/BF00371697> (accessed 23 March 2018).
17. Bagby W.C., Cameron K.L. Cameron M. Contrasting evolution of calc-alkalic volcanic and plutonic rocks of western Chihuahua, Mexico. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*, 1981, vol. 86, Iss. B11, pp. 10402–10410. Available at: <https://doi.org/10.1029/JB086iB11p10402> (accessed 23 March 2018).
18. Moll E.J. Geochemistry and petrology of Mid-Tertiary ash flow tuffs from the Sierra el Virulento Area, eastern Chihuahua, Mexico. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*, 1981, vol. 86, Iss. B11, pp. 10321–10334. Available at: <https://doi.org/10.1029/JB086iB11p10321> (accessed 23 March 2018).
19. Bacon C.R., Macdonald R., Smith R.L., Baedeker P.A. Pleistocene high-silica rhyolites of the Coso Volcanic Field, Inyo County, California. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*, 1981, vol. 86, Iss. B11, pp. 10223–10241. Available at: <https://doi.org/10.1029/JB086iB11p10223> (accessed 23 March 2018).
20. Hildreth W. Gradients in silicic magma chambers: Implications for lithospheric magmatism. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*, 1981, vol. 86, Iss. B11, pp. 10153–10192. Available at: <https://doi.org/10.1029/JB086iB11p10153> (accessed 23 March 2018).
21. Sillitoe R.H., Hedenquist J.W. Linkages between Volcanotectonic Settings, Ore-Fluid Compositions and Epithermal Precious Metal Deposits. *Society of Economic Geologists. Special Publication*, 2003, vol. 10, pp. 315–343.
22. Barbarin B. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 1999, vol. 46, no. 3, pp. 605–626. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(98\)00085-1](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(98)00085-1) (accessed 23 March 2018).
23. Cooke D.R., Simmons S.F. Characteristics and genesis of epithermal gold deposits. *Reviews in Economic Geology*, 2000, vol. 13, pp. 221–244.
24. Dekov V.M., Rouxel O., Kouzmanov K., Bindi L., Asael D., Fouquet Y., Etoubleau J., Burgaud G., Wälle M. Enargite-luzonite hydrothermal vents in Manus Back-Arc Basin: submarine analogues of high-sulfidation epithermal mineralization. *Chemical Geology*, 2016, vol. 438, pp. 36–57. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.05.021> (accessed 23 March 2018).
25. Corbett G. Anatomy of porphyry-related Au-Cu-Ag-Mo mineralized systems: Some exploration implications. *AIG Bulletin*, 2009, no. 49, pp. 33–46.
26. Hedenquist J.W. *Epithermal High Sulfidation Gold Deposits*. Available at: http://www.geologinesia.com/2015/11/epithermal-high-sulfidation-gold_9.html (accessed 26 March 2018).
27. Majzlan J., Berkh K., Kiefer S., Koděra P., Fallick A.E., Chovan M., Bakos F., Biron A., Ferenc S., Lexa J. Mineralogy, alteration patterns, geochemistry, and fluid properties of the Ag-Au epithermal deposit Nová Baňa, Slovakia. *Mineralogy and Petrology*, 2018, vol. 112, no. 1, pp. 1–23. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00710-017-0516-0> (accessed 26 March 2018).
28. Plotinskaya O.Y., Azovskova O.B., Abramov S.S., Groznova E.O., Novoselov K.A., Seltmann R., Spratt J. Precious metals assemblages at the Mikheevskoe porphyry copper deposit (South Urals, Russia) as proxies of epithermal overprinting. *Ore Geology Reviews*, 2018, vol. 94, pp. 239–260. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.01.025> (accessed 26 March 2018).
29. Zhai D., Liu J. Gold-telluride-sulfide association in the Sandawanzi epithermal Au-Ag-Te deposit, NE China: implications for phase equilibrium and physicochemical conditions. *Mineralogy and Petrology*, 2014, vol. 108, no. 6, pp. 853–871. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00710-014-0334-6> (accessed 26 March 2018).
30. Yuningsih E.T., Matsueda H. Genesis and origin of Te-bearing gold-silver-base metal mineralization of the Arinem deposit in western Java, Indonesia. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 2014, vol. 109, no. 2, pp. 49–61. DOI: <https://doi.org/10.2465/jmps.130118a>
31. Zhuravkova T.V., Palyanova G.A., Chudnenko K.V., Kravtsova R.G., Prokopyev I.R., Makshakov A.S., Borisenko A.S. Physicochemical models of formation of gold-silver mineralization at the Rogovik deposit (Northeastern Russia). *Ore Geology Reviews*, 2017, vol. 91, pp. 1–20. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.10.017> (accessed 26 March 2018).
32. Nikolaev Yu.N., Baksheev I.A., Prokofiev V.Yu., Nagornaya E.V., Marushchenko L.I., Sidorina Yu.N., Chitalin A.F., Kal'ko I.A. Gold-Silver mineralization in porphyry-epithermal systems of the Baimka trend, western Chukchi Peninsula, Russia. *Geology of Ore Deposits*, 2016, vol. 58, no. 4, pp. 284–307. DOI: 10.1134/s107570151604005x
33. Zhang J., Wang H., Li S., Li T. Paleogene magmatism and gold metallogeny of the Jinping terrane in the Ailaoshan ore belt, Sanjiang Tethyan Orogen (SW China): Geology, deposit type and tectonic setting. *Ore Geology Reviews*, 2017, vol. 91, pp. 620–637. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.08.032> (accessed 26 March 2018).

Received: 4 April 2018.

Information about the authors

Anatoliy I. Gusev, Dr. Sc., professor, Shukshin Altai State Humanities Pedagogical University.

Evgeniya M. Tabakaeva, Cand. Sc., researcher, Shukshin Altai State Humanities Pedagogical University.

УДК 681.51:622.73

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО РЕКОНФИГУРАЦИИ СТРУКТУРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ РУДЫ

Баласанян Сейран Шамирович¹,

seyran@sunicom.net

Геворгян Эрмине Михайловна¹,

hermine79@rambler.ru

¹ Капанский филиал Национального политехнического университета Армении, Армения, 3307, г. Капан, ул. Багаберд, 28.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения надежности и эффективности функционирования технологической системы измельчения руды путем введения структурной избыточности.

Цель: обоснование необходимости повышения эффективности функционирования технологической системы измельчения руды путем введения структурной избыточности (резервных связей), определение наилучшей структуры резервных связей между измельчительными агрегатами и рациональной стратегии их использования, построение математической модели принятия решений по реконфигурации (перестроению) структуры технологической системы измельчения руды при отказах ее оборудования в виде дерева решений, разработка компьютерной модели принятия решений по реконфигурации структуры технологической системы измельчения руды.

Объект: технологическая система измельчения руды Зангезурского медно-молибденового комбината (Армения).

Методы: метод дерева решений (метод мягких вычислений), имитационное моделирование.

Результаты. В результате имитационных экспериментов с компьютерной модели технологической системы измельчения руды определена наилучшая структура резервных связей между измельчительными агрегатами и рациональная стратегия их использования, с применением которых построена математическая модель принятия решений по реконфигурации структуры технологической системы измельчения руды (при отказах ее оборудования) в виде дерева решений. На основе этой модели разработана компьютерная модель, позволяющая при изменении работоспособности агрегатов своевременно выбрать наилучшую для данной сложившейся отказовой ситуации структуру и режим работы каждого агрегата, независимо от квалификации и опыта оператора. Благодаря применению этой модели оператор полностью освобождается от обязанностей лица, принимающего решения. Разработанная компьютерная модель включена в состав специального программного обеспечения автоматизированной системы управления технологическим процессом измельчения руды Зангезурского медно-молибденового комбината (Армения).

Ключевые слова:

Измельчение руды, отказ, имитационное моделирование, дерево решений, реконфигурация, структурная избыточность.

Введение

Измельчение руды является важнейшим технологическим процессом рудоподготовки, непосредственно предшествующим конечному процессу флотации руды и в значительной мере предопределяющим его эффективность [1–4]. Как показывает опыт эксплуатации обогатительных фабрик, эффективность флотации заметно снижается в результате ухудшения выходных характеристик технологической системы измельчения руды (ТСИР) вследствие отказов ее оборудования [5–9]. В связи с этим вопросы обеспечения надежности и эффективности функционирования ТСИР приобретают особую важность.

Одним из возможных способов повышения эффективности функционирования ТСИР является введение структурной избыточности, т. е. резервных связей между измельчительными агрегатами (ИА), которые могут быть использованы для реконфигурирования (перестроения) структуры системы при отказах ее оборудования с целью рационального использования работоспособных агрегатов. Данная работа посвящена определению наилучшей структуры резервных связей между ИА и рациональной стратегии их использования, а так-

же разработке на ее основе компьютерной модели принятия решений по реконфигурации структуры ТСИР Зангезурского медно-молибденового комбината (ЗММК, Армения).

Содержательное описание нормального функционирования ТСИР

ТСИР ЗММК (рис. 1) состоит из 21 мельницы шарового измельчения, 3 мельниц самоизмельчения, 6 двуспиральных классификаторов типа 2КСН-2.4, 10 односпиральных классификаторов типа КСН-2.0, 11 блоков гидроциклонов \varnothing 750 мм, 12 восьмидюймовых грунтовых насосов типа ГраК 350/40, 10 двенадцатидюймовых грунтовых насосов типа ГраК 1600/50, 24 систем смазки.

Цикл шарового измельчения включает 1 шаровую мельницу 1-й стадии типа МШР – 3200×3100 мм, 2 шаровые мельницы 2-й стадии типа МШЦ – 3200×3100 мм стандартного размера, и 18 удлиненных шаровых мельницы типа МШР – 3200×3800 мм.

Мельницы со своими системами смазки и классификаторами или блоками гидроциклонов составляют измельчительные агрегаты (ИА), которые вместе с грунтовыми насосами входят в состав из-

мельчительных комплексов (ИК), работающих по схеме двухстадийного измельчения при сопряжении ИА 2:1 или 1:1 (ДИК (2:1) или ДИК (1:1)).

Измельчительные агрегаты $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, A_8, A_{11}, A_{13}, A_{16}, A_{17}$ работают по схеме двухстадийного измельчения при сопряжении мельниц 2:1, т. е. две мельницы 1-й стадии работают с одной мельницей 2-й стадии. Измельчительные агрегаты $A_9, A_{10}, A_{14}, A_{12}, A_{20}, A_{21}, A_{22}, A_{23}, A_{24}$ и агрегаты самоизмельчения AC_1, AC_2, AC_3 работают по схеме двухстадийного измельчения при сопряжении мельниц 1:1 (одна мельница 1-й стадии работает с одной мельницей 2-й стадии).

Руда из параболического бункера и бункера дробленой руды крупностью <16 мм подается на измельчение в шаровые мельницы 1-й стадии измельчения с разгрузкой через решетку. Разгрузка шаровых мельниц 1-й стадии измельчения агрегатов $A_1, A_2, A_3, A_4, A_8, A_{10}$ поступает в двуспиральные классификаторы $\varnothing 2400$ мм, а разгрузка мельниц 1-й стадии агрегатов $A_{17}, A_{16}, A_{21}, A_{22}$ и 2-й стадии агрегатов A_9, A_{10} поступает в односпиральные классификаторы $\varnothing 2000$ мм. Мельница измельчительного агрегата A_{13} , в отличие от остальных мельниц 1-й стадии, работает в замкнутом цикле с гидроциклоном $\varnothing 750$ мм с непосредственным питанием восьмидюймовым грунтовым насосом. Все шаровые мельницы 2-й стадии ИА работают по замкнутой схеме с грунтовым насосом и

батареей гидроциклонов, причем мельницы агрегатов $A_9, A_{11}, A_{20}, A_{23}$ 2-й стадии измельчения одновременно подпитываются рудой из бункеров дробленой руды, что позволяет им при отказе или ремонте мельниц 1-й стадии работать в одностадийном режиме (1:0). Слив классификаторов и разгрузка мельниц 2-й стадии объединяются и поступают в зумпфы грунтовых насосов гидроциклонов 2-й стадии измельчения. В измельчительных комплексах, работающих по схеме сопряжения 2:1 (ИК₁–ИК₃, ИК₁₀), установлены двенадцатидюймовые грунтовые насосы типа ГраК 1600/50, зарезервированные методом замещения восьмидюймовыми насосами типа ГраК 350/40, обеспечивающими работу ИК по схеме сопряжения 1:1 при отказе основного двенадцатидюймового насоса. В ИК, работающих по схеме сопряжения 1:1 (ИК₄, ИК₆, ИК₇), установлены восьмидюймовые грунтовые насосы, зарезервированные однотипными насосами методом замещения.

Цикл самоизмельчения руды включает 3 агрегата самоизмельчения (AC_1, AC_2, AC_3) типа ММС 70–73, работающих по схеме сопряжения 1:1 соответственно с агрегатами A_{12}, A_{14}, A_{24} и односпиральными классификаторами $\varnothing 2000$ мм. Сливы классификаторов поступают в зумпфы двенадцатидюймовых грунтовых насосов, зарезервированных методом замещения однотипными насосами, откуда качаются в блоки гидроциклонов.

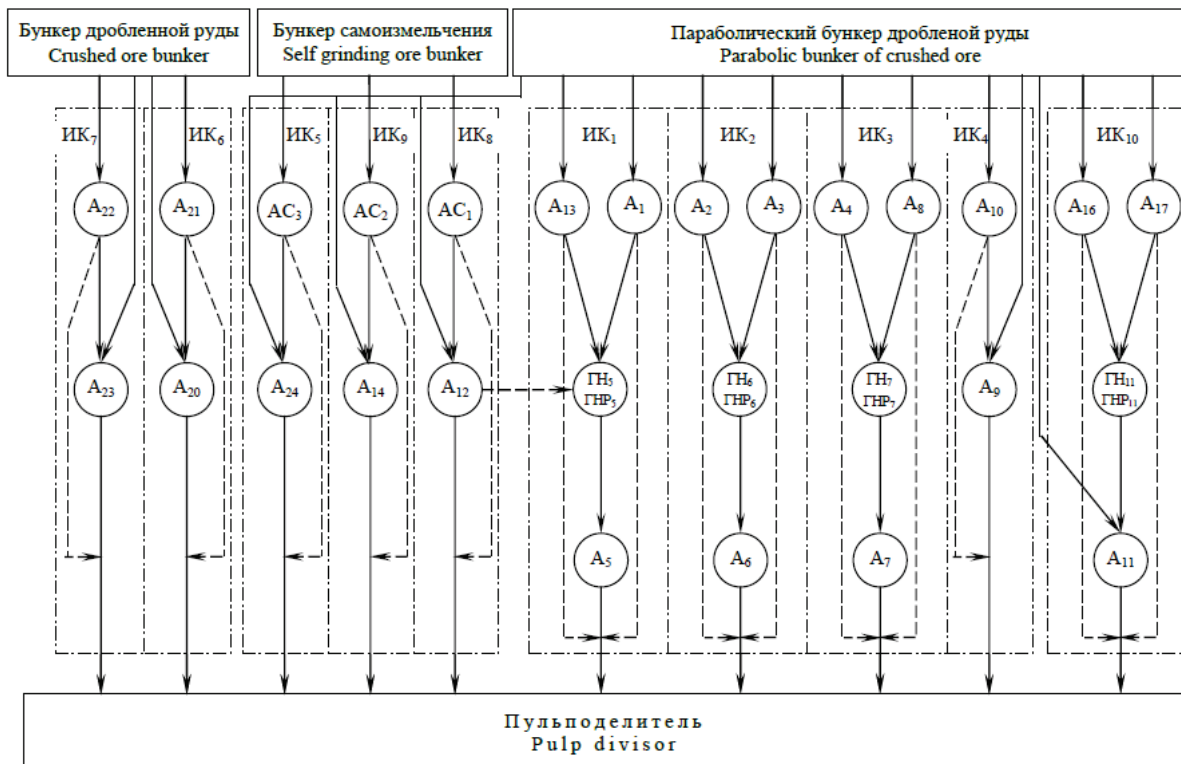


Рис. 1. Укрупненная структурная схема ТСИР

Fig. 1. Enlarged structural diagram of ore grinding technological system (OGTS)

Содержательное описание функционирования ТСИР при отказах ее оборудования

В ТСИР, помимо основных связей между агрегатами, предусмотрены также резервные связи (на рис. 1 эти связи обозначены пунктиром), которые используются при отказах или принудительных простоях оборудования. Благодаря свойству перестроения (реконфигурации) структуры системы посредством использования резервных связей и способности измельчительных агрегатов функционировать в различных режимах, отказы оборудования не приводят к отказу системы в целом, а лишь снижают качество ее функционирования. Условия работоспособности ИА, ИК и возможные режимы их работы с использованием резервных связей определяются следующим образом.

ОИА и ИА 1-й стадии измельчения работоспособны, когда одновременно работоспособно входящее в их состав оборудование: мельницы, системы смазки и классификаторы.

Указанные агрегаты могут функционировать как самостоятельные ИА и как ИА 1-й стадии в составе ДИК при соотношении агрегатов 2:1 или 1:1. ИА 2-й стадии измельчения работоспособен лишь тогда, когда одновременно работоспособен хотя бы один из грунтовых насосов и входящие в ее состав компоненты (мельница, система смазки, классификатор). Измельчительные агрегаты 2-й стадии, которые одновременно подпитываются рудой ($A_{11}, A_9, A_{20}, A_{23}, A_{14}, A_{24}$), могут функционировать как самостоятельные одностадийные ИА при отказах измельчительных агрегатов 1-й стадии. Те ИА 2-й стадии, которые не подпитываются рудой (A_7, A_6, A_5) при одновременном отказе обоих ИА 1-й стадии, прекращают функционировать. Резервные и основные насосы, входящие в состав ИК₄, ИК₅, ИК₆, ИК₇, ИК₈, ИК₉, A_{13} , однотипные, поэтому отказавший насос после восстановления переходит в резерв. Заметим, что резервные восьмидюймовые насосы, входящие в состав ИК₂, ИК₃, ИК₅, ИК₈, ИК₉, работают до момента окончания восстановления отказавшего основного насоса, который включается вместо резервного.

При необходимости ДИК (2:1) (ИК₂, ИК₃, ИК₁₀) посредством реконфигурации структуры может функционировать как:

- самостоятельный ИА (1:0) и ДИК (1:1) – при отказе основного грунтового насоса, ДИК (1:1) – при отказе основного грунтового насоса;
- ДИК (1:1) – при отказе одного из ИА 1-й стадии;
- два самостоятельных одностадийных ОИА (2:0) – при отказе ИА 2-й стадии или грунтовых насосов;
- ОИА (1:0) – при отказе обоих ИА 1-й стадии (только ИК₁₀, который одновременно подпитывается рудой).

ДИК (2:1) полностью прекращает функционировать при одновременном отказе обоих ИА 1-й стадии и ИА 2-й стадии (или грунтовых насосов).

При отказах оборудования входящие в ДИК (1:1) (ИК₄, ИК₆, ИК₇) указанные комплексы могут функционировать как ОИА (1:0) (A_{10}, A_{21}, A_{22}) при отказе ИА 2-й стадии (или (A_9, A_{20}, A_{23}) обоих грунтовых насосов), ОИА (1:0) (A_9, A_{10}, A_{23}) при отказе ИА 1-й стадии (A_{10}, A_{21}, A_{22}). ДИК (1:1) прекращает функционировать при одновременном отказе ИА 1-й и 2-й стадий (или обоих грунтовых насосов).

ДИК (1:1) (ИК₅, ИК₈, ИК₉) при отказах оборудования могут функционировать как ОИА (1:0) при отказах ИА 1-й стадии (MC_1, MC_2, MC_3) или ИА 2-й стадии (A_{12}, A_{14}, A_{24}) или обоих грунтовых насосов. При ремонте классификаторов имеется возможность подачи разгрузки мельницы непосредственно в зумпф грунтовых насосов гидроциклонов 2-й стадии измельчения.

Выбор наилучшей структуры резервных связей и рациональной стратегии перестроения структуры системы

В результате детального рассмотрения различных вариантов введения структурной избыточности в ТСИР ЗММК и обсуждений с эксплуатирующими ее специалистами выяснилось, что кроме имеющихся в системе резервных связей можно ввести еще четыре дополнительные связи. Из всех технологически возможных вариантов структуры резервных связей, составленных с учетом наложенного ограничения, путем исключения заведомо явно малоэффективных вариантов были выбраны четыре конкурирующих варианта (табл. 1).

Для выбранных вариантов структуры резервных связей были рассмотрены две конкурирующие стратегии («А» и «В») использования резервных связей. Стратегия «А» отличается от стратегии «В» тем, что:

- при отказе агрегата A_9 связь $A_{10} \rightarrow A_{11}$ используется независимо от состояний агрегатов A_{16} и A_{17} (при стратегии В связь $A_{10} \rightarrow A_{11}$ используется только при отказе одного из указанных агрегатов);
- при отказе агрегата A_9 связь $A_{10} \rightarrow A_7$ используется независимо от состояний агрегатов A_8 и A_4 (при стратегии В указанная связь используется только при отказе агрегатов A_8 и A_4);
- при отказе агрегата A_{10} связь $A_{16} \rightarrow A_9$ используется независимо от состояния агрегата A_{11} (при стратегии В указанная связь используется только при отказе агрегата A_{11});
- при отказе агрегата A_9 связь $A_{10} \rightarrow A_7$ используется при наличии связи $A_4 \rightarrow A_6$ (при стратегии В связь $A_{10} \rightarrow A_7$ используется независимо от применения указанной связи).

Для каждого из восьми конкурирующих вариантов была построена математическая модель процесса принятия решений по реконфигурации структуры ТСИР в виде дерева решений [10–13]. Дерево решений – это способ представления правил в иерархической, последовательной структуре, где каждому объекту (входному сигналу, опи-

Таблица 1. Результаты имитационных экспериментов

Table 1. Results of simulation experiments

| Варианты структуры резервных связей Options for the structure of reserve links | | Номера вариантов структуры N° of the structure variants | Стратегия реконфигур. Strategies for reconfiguration | Показатель эффективн. (y.e.) Indicator of effectiveness (cu) |
|---|--|---|--|--|
| | | 1 | A | 261 |
| | | | B | 228 |
| | | 2 | A | 272 |
| | | | B | 238 |
| | | 3 | A | 343 |
| | | | B | 281 |
| | | 4 | A | 260 |
| | | | B | 242 |

сывающему состоянию системы) соответствует единственный узел, дающий решение.

Метод дерева решений, который принадлежит методам мягких вычислений (методы искусственного интеллекта, нейронных сетей, генетические методы и т. п. [14, 15]), является одним из классических методов интеллектуального анализа данных (data mining), получивший в последнее время практическое применение в области моделирования и оптимизации процессов обогащения полезных ископаемых [16–20].

Решение задачи выбора наилучшей структуры резервных связей между измельчительными агрегатами и рациональной стратегии реконфигурации структуры ТСИР при отказах ее агрегатов осуществлено методом компьютерного моделирования. Компьютерная модель, ориентированная на решение поставленной задачи, представляет собой композицию из трех моделей (рис. 2). Первая из них воспроизводит процесс возникновения отказов и восстановления измельчительного оборудования – 21 шаровых мельниц и 3 мельниц самоизмельчения, 24 систем смазки мельниц, 18 классификаторов, 20 грунтовых насосов (элементов модели $E_i^0, i=1,86$), вторая модель имитирует процесс функционирования ТСИР под воздействием процесса возникновения отказов и восстановления ее оборудования, а третья модель формирует значение показателя эффективности для каждой реализации процесса функционирования системы в восьмичасовом интервале времени. Построение первой модели осуществлено с использованием функций распределения времени работы между соседними отказами и времени восстановления отказавшего оборудования, идентифицированных

на основании статистических данных о надежности измельчительного оборудования [8]. Ниже приведены аналитические выражения для плотностей распределения времени работы между отказами $g_i(\tau_p)$ и времени восстановления $f_i(\tau_b)$ измельчительного оборудования:

1) Мельница 1-й стадии типа МШР 3200×3800

$$g_i(\tau_p) = \hat{\lambda} \exp(-\hat{\lambda} \hat{\sigma}_p) = 1,925 \cdot 10^{-2} \exp(-1,925 \cdot 10^{-2} \tau_p);$$

$$f_i(\tau_b) = \frac{k \tau_b^{k-1}}{\hat{\alpha}} \cdot \exp\left(-\frac{\tau_b^k}{\hat{\alpha}}\right) = 0,469 \tau_b^{-0,3} \exp(-0,67 \tau_b^{0,7}).$$

2) Мельница 2-й стадии типа МШР 3200×3800

$$g_i(\tau_p) = \hat{\lambda} \exp(-\hat{\lambda} \hat{\sigma}_p) = 2,05 \cdot 10^{-2} \exp(-2,05 \cdot 10^{-2} \tau_p);$$

$$f_i(\tau_b) = \frac{k \tau_b^{k-1}}{\hat{\alpha}} \exp\left(-\frac{\tau_b^k}{\hat{\alpha}}\right) = 0,48 \tau_b^{-0,4} \exp(-0,798 \tau_b^{0,6}).$$

3) Мельница 2-й стадии типа МШР 3200×3100

$$g_i(\tau_p) = \hat{\lambda} \exp(-\hat{\lambda} \hat{\sigma}_p) = 2,05 \cdot 10^{-2} \exp(-2,05 \cdot 10^{-2} \tau_p);$$

$$f_i(\tau_b) = \frac{k \tau_b^{k-1}}{\hat{\alpha}} \exp\left(-\frac{\tau_b^k}{\hat{\alpha}}\right) = 0,48 \tau_b^{-0,4} \exp(-0,798 \tau_b^{0,6}).$$

4) Мельница 1-й стадии типа МШР 3200×3100

$$f_i(\tau_b) = \hat{\lambda} \exp(-\hat{\lambda} \hat{\sigma}_p) = 1,785 \cdot 10^{-2} \exp(-1,785 \cdot 10^{-2} \tau_p);$$

$$f_i(\tau_b) = \frac{k \tau_b^{k-1}}{\hat{\alpha}} \exp\left(-\frac{\tau_b^k}{\hat{\alpha}}\right) = 0,492 \tau_b^{-0,4} \exp(-0,82 \tau_b^{0,6}).$$

5) Классификатор типа 2КСН-2,4

$$g_i(\tau_p) = \hat{\lambda} \exp(-\hat{\lambda} \hat{\sigma}_p) = 4,4 \cdot 10^{-3} \exp(-4,4 \cdot 10^{-3} \tau_p);$$

$$f_i(\tau_b) = \frac{\exp[-(\lg \tau_b - \hat{\mu})^2 / 2\hat{\sigma}^2]}{\hat{\sigma} \sqrt{2\pi} \tau_b} = \frac{\exp[-(\lg \tau_b - 0,14)^2 / 0,46]}{0,48 \sqrt{2\pi} \tau_b}.$$

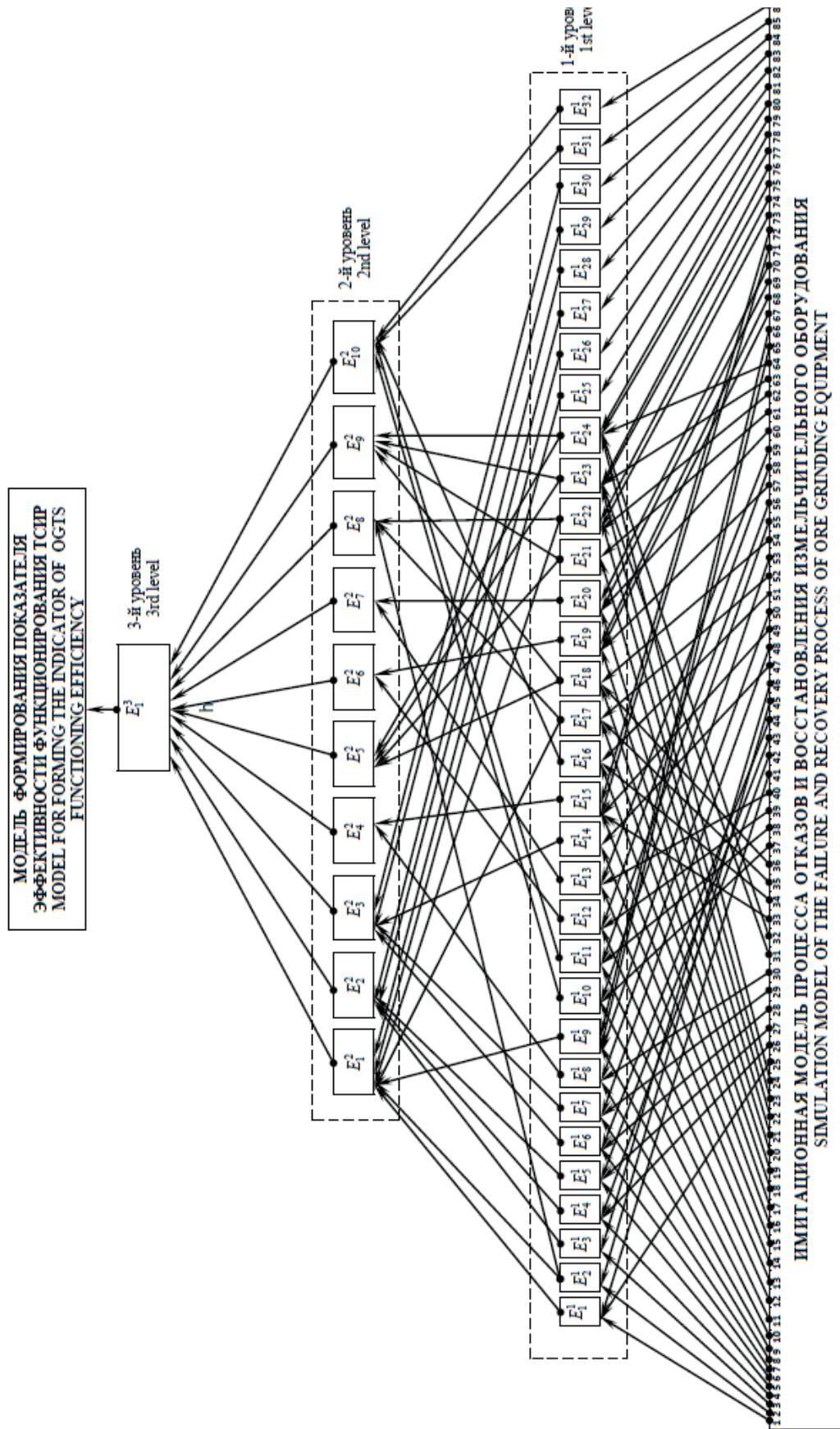


Рис. 2. Структура компьютерной модели ТСРП

Fig. 2. Structure of OGTS computer model

6) Система смазки мельниц

$$g_i(\tau_p) = \hat{\lambda} \exp(-\hat{\lambda} \hat{\sigma}_p) = 2,6 \cdot 10^{-3} \exp(-2,6 \cdot 10^{-3} \tau_p);$$

$$f_i(\tau_b) = \frac{\exp[-(\lg \tau_b - \hat{\mu})^2 / 2\hat{\sigma}^2]}{\hat{\sigma} \sqrt{2\pi} \tau_b} = \frac{\exp[-(\lg \tau_b - 0,12)^2 / 0,52]}{0,52 \sqrt{2\pi} \tau_b}.$$

7) Грунтовой насос типа ГрАК 350/40

$$g_i(\tau_p) = \frac{\tau_p}{\hat{\sigma}^2} \exp\left(-\frac{\tau_p^2}{2\hat{\sigma}^2}\right) = \frac{\tau_p}{4225} \exp\left(-\frac{\tau_p^2}{8450}\right);$$

$$f_i(\tau_b) = \frac{\exp[-(\lg \tau_b - \hat{\mu})^2 / 2\hat{\sigma}^2]}{\hat{\sigma} \sqrt{2\pi} \tau_b} = \frac{\exp[-(\lg \tau_b - 0,292)^2 / 0,174]}{0,295 \sqrt{2\pi} \tau_b}.$$

8) Грунтовой насос типа ГрАК 1600/50

$$g_i(\tau_p) = \frac{\tau_p}{\hat{\sigma}^2} \exp\left(-\frac{\tau_p^2}{2\hat{\sigma}^2}\right) = \frac{\tau_p}{3150} \exp\left(-\frac{\tau_p^2}{6300}\right);$$

$$f_i(\tau_b) = \frac{\exp[-(\lg \tau_b - \hat{\mu})^2 / 2\hat{\sigma}^2]}{\hat{\sigma} \sqrt{2\pi} \tau_b} = \frac{\exp[-(\lg \tau_b - 0,4555)^2 / 0,196]}{0,313 \sqrt{2\pi} \tau_b}.$$

9) Мельница самоизмельчения типа ММС-70–23

$$g_i(\tau_p) = 1,81 \cdot 10^{-2} \exp(-1,81 \cdot 10^{-2} \tau_p);$$

$$f_i(\tau_b) = 0,44 \tau_b^{-0,3} \exp(-0,63 \tau_b^{0,7}).$$

10) Односпиральный классификатор типа КСН- 2,0

$$g_i(\tau_p) = 5,2 \cdot 10^{-3} \exp(-5,2 \cdot 10^{-3} \tau_p);$$

$$f_i(\tau_b) = \frac{\exp[-(\lg \tau_b - 0,18)^2 / 0,5]}{0,52 \sqrt{2\pi} \tau_b}.$$

Выходной сигнал имитационной модели процесса отказов и восстановления оборудования ТСИР $y^0(t) = (y_1^0(t), y_2^0(t), \dots, y_{86}^0(t))$ представляет собой случайный вектор, компоненты которого в зависимости от состояния элементов $E_i^0, i = \overline{1,86}$ (работоспособное или отказ) могут принимать значения «1» или «0».

Одной из основных проблем, препятствующих построению имитационной модели функционирования ТСИР, является преодоление ее большой размерности (числа состояний). Так, при построении модели системы, состоящей из 20 бинарных элементов, число рассматриваемых состояний превышает 10^6 . Одним из возможных путей решения описанной проблемы является применение концепции иерархического многоуровневого (стратифицированного) описания систем [6, 7]. Ее сущность заключается в том, что процесс функционирования системы описывается не одной моделью большой размерности, а иерархией сравнительно

простых моделей, каждая из которых описывает процесс функционирования исследуемой системы на определенном уровне абстрагирования (детализации).

В настоящей работе в основе имитационной модели функционирования ТСИР использована разработанная нами обобщенная стратифицированная модель [6, 7], позволяющая успешно преодолеть сложность формализации ТСИР.

Учитывая характер поставленной задачи, удобство описания, а также конструктивные и функциональные особенности ТСИР, ее функционирование описано на трех следующих стратах (уровнях описания): страте измельчительных агрегатов (ИА), страте измельчительных комплексов (ИК) и системной страте.

Страта измельчительных агрегатов

На данной страте ТСИР представлена совокупностью 32 ИА – подсистем первого уровня $E_i^1, i = \overline{1,32}$, полученных в результате декомпозиции системы, состоящей из элементов $E_i^0, i = \overline{1,86}$.

Каждая подсистема первого уровня E_i^1 рассмотрена как объект с двумя возможными состояниями и формализована в виде временной статической системы без памяти S_i^1 [6, 7], описываемой множествами X_i^1 (входных сигналов $x_i^1(t)$), Y_i^1 (выходных сигналов $y_i^1(t)$), T_i^1 (моментов времени t) и оператором H_i^1 . Множество X_i^1 каждой подсистемы E_i^1 определяется как декартово произведение множеств $\{0;1\}$ выходных сигналов входящих в ее состав элементов E_i^0 и элементов других подсистем, влияющих на работоспособности подсистемы E_i^1 . Множество Y_i^1 включают два элемента (0 – состояние отказа, 1 – работоспособное состояние). Оператор H_i^1 представляет собой логическую функцию работоспособности подсистемы E_i^1 , описывающую условие работоспособности данной подсистемы в зависимости от работоспособности входящих в ее состав и влияющих на нее элементов.

Ниже приведены аналитические выражения операторов $H_i^1, i = \overline{1,8}$ (t опущено) для первых 8 подсистем E_i^1 :

$$y_1^1 = H_1^1(x_1^1) = x_{1,1}^1 \wedge x_{2,1}^1 \wedge x_{3,1}^1 = y_1^0 \wedge y_{25}^0 \wedge y_{41}^0;$$

$$y_2^1 = H_2^1(x_2^1) = x_{2,1}^1 \wedge x_{2,2}^1 = y_2^0 \wedge y_{45}^0;$$

$$y_3^1 = H_3^1(x_3^1) = x_{3,1}^1 \wedge x_{3,2}^1 = y_3^0 \wedge y_{46}^0;$$

$$y_4^1 = H_4^1(x_4^1) = x_{4,1}^1 \wedge x_{4,2}^1 \wedge x_{4,3}^1 = y_4^0 \wedge y_{26}^0 \wedge y_{42}^0;$$

$$y_5^1 = H_5^1(x_5^1) = x_{5,1}^1 \wedge x_{5,2}^1 \wedge x_{5,3}^1 = y_5^0 \wedge y_{27}^0 \wedge y_{43}^0;$$

$$y_6^1 = H_6^1(x_6^1) = x_{6,1}^1 \wedge x_{6,2}^1 \wedge x_{6,3}^1 = y_6^0 \wedge y_{28}^0 \wedge y_{44}^0;$$

$$y_7^1 = H_7^1(x_7^1) = x_{7,1}^1 \wedge x_{7,2}^1 \wedge x_{7,3}^1 = y_7^0 \wedge y_{29}^0 \wedge y_{48}^0;$$

$$y_8^1 = H_8^1(x_8^1) = x_{8,1}^1 \wedge x_{8,2}^1 \wedge x_{8,3}^1 = y_8^0 \wedge y_{30}^0 \wedge y_{50}^0.$$

Страта измельчительных комплексов

На этой страте ТСИР представлена в виде совокупности 10 измельчительных комплексов – подсистем второго уровня $E_i^2, i = \overline{1,10}$. Каждый ИК, в

зависимости от работоспособности входящих в его состав или влияющих на его работу ИА, может работать в одном из технологически возможных режимов по определенной схеме измельчения. Каждый режим работы ИК E_i^2 характеризуется конкретным набором значений его выходных характеристик $y_i^2=(y_{i,1}^2, y_{i,2}^2, y_{i,3}^2)$, где $y_{i,1}^2$ – производительность комплекса; $y_{i,2}^2$ – процентное содержание класса ≤ 80 мкм в измельченном продукте (пульпе); $y_{i,3}^2$ – плотность выходной пульпы.

Обозначим через $x_i^2(t)=(x_{i,1}^2(t), x_{i,2}^2(t), \dots, x_{i,n}^2(t))$ совокупность выходных характеристик состояний в момент t тех ИА, от работоспособности которых зависит выбор структуры и режима работы ИК E_i^2 . В каждый момент $t \in T^1$, когда происходит изменение работоспособности ИА, в соответствии со значением вектора $x_i^2(t)$ происходит перестроение структуры комплекса E_i^2 и переход в новый режим работы, характеризуемый новым значением вектора $y_i^2(t)$.

Каждый ИК E_i^2 , формализованный в виде временной статической системы без памяти S_i^2 , характеризуется четверкой $\langle T_i^2, X_i^2, Y_i^2, H_i^2 \rangle$. Каждое множество T_i^2 , $i=1, 10$ совпадает с множеством $T^1=T^0$ (множество моментов изменения состояний элементов) E_i^0 , $i=1, 86$. Входной сигнал $x_i^2(t)$ каждой S_i^2 представляет собой упорядоченную совокупность выходных сигналов соответствующих подсистем первого уровня. В качестве выходного сигнала любого элемента S_i^2 рассматривается вектор выходных характеристик $y_i^2(t)=(y_{i,1}^2(t), y_{i,2}^2(t), y_{i,3}^2(t))$ соответствующей подсистемы (ИК) E_i^2 . Множество Y_i^2 элемента S_i^2 представляет собой совокупность значений вектора выходных характеристик подсистемы E_i^2 , соответствующих всевозможным режимам ее работы. Каждый оператор H_i^2 , реализую-

щий отображение $X_i^2 \rightarrow Y_i^2$, представляет собой бинарную поисковую признаковую структуру – алгоритм, который по заданному входному сигналу $x_i^2(t) \in X_i^2$, описывающему работоспособность входящих в состав подсистемы E_i^2 и влияющих на ее функционирование подсистем первого уровня, осуществляет поиск и выдачу соответствующего выходного сигнала $y_i^2(t) \in Y_i^2$. На рис. 3 приведена структура одного из десяти операторов H_i^2 .

Среднестатистические значения выходных характеристик $y_i^2(t)=(y_{i,1}^2(t), y_{i,2}^2(t), y_{i,3}^2(t))$ измельчительных комплексов для всевозможных режимов работы подсистемы E_5^2 приведены в табл. 2.

Таблица 2. Схемы измельчения и режимы работы подсистемы E_5^2 (ИК₅)

Table 2. Schemes and grinding modes of subsystem E_5^2 (GC₅)

| Режимы работы Operation modes | Схемы измельчения Schemes of grinding | | Среднестатистические значения выход. характеристик Average values of output characteristics | | |
|----------------------------------|--|--|--|--|---|
| | Схема измельчения Scheme of grinding | Сопряжение мельниц Conjugation of mills | Производит. по исх. руде (т/ч) Original ore productivity (t/h) | Содерж. класса ≤ 80 мкм в (%) Content of class $\leq 80 \mu\text{m}$ in pulp | Плотность вых. пульпы (г/л) Density of output pulp (g/l) |
| v | 2-стадийный 2-stage | (1:1), $A_{24} \rightarrow AC_3$ | $q_1^v=126,7$ | $q_2^v=56,3$ | $q_3^v=1344,7$ |
| w | 1-стадийный 1-stage | (1:0), AC_3 | $q_1^w=80$ | $q_2^w=56,3$ | $q_3^w=1273,3$ |
| β | 2-стадийный 2-stage | (2:1), $A_{14} \rightarrow AC_3 \rightarrow A_{24}$ | $q_1^\beta=130$ | $q_2^\beta=56,3$ | $q_3^\beta=1344$ |

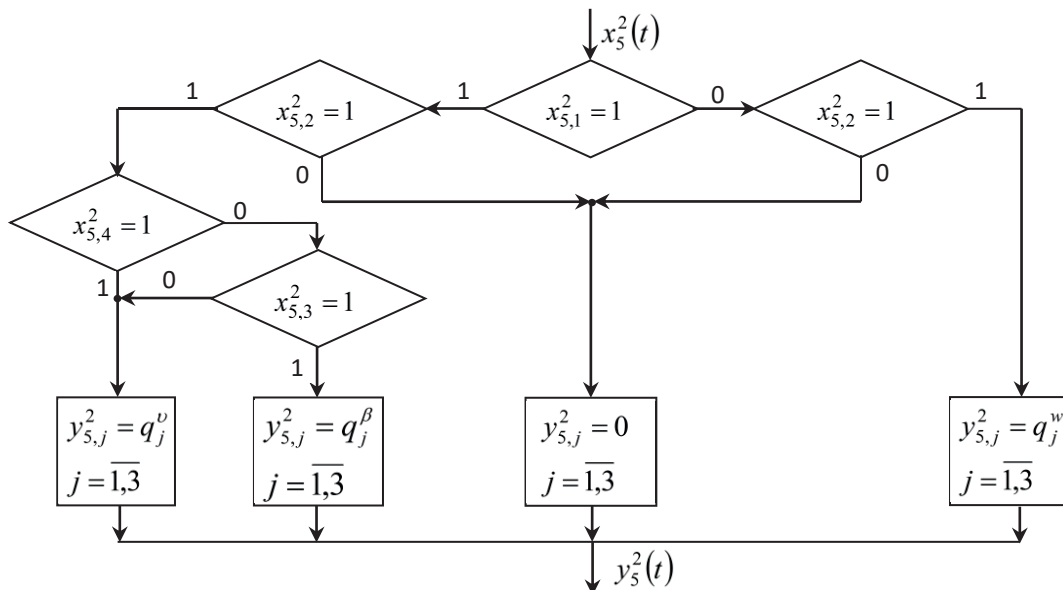


Рис. 3. Структура оператора H_5^2

Fig. 3. Structure of the operator H_5^2

Системная стратегия

На данной стратегии ТСИР рассматривается как одна крупная подсистема E_1^3 третьего уровня, представляющая собой смеситель (пульподелитель), входом которого является совокупность выходных продуктов всех измельчительных комплексов, а выходом – объединенная выходная пульпа, поступающая на флотацию.

Обозначим через $y_{1,1}^3(t)$, $y_{1,2}^3(t)$, $y_{1,3}^3(t)$ значения выходных характеристик подсистемы E_1^3 в момент времени t : ее производительность, процентное содержание класса ≤ 80 мкм и плотность объединенной пульпы. Соответствующие характеристики входных потоков, представляющие собой выходные характеристики ИК, обозначим через $x_{i,1}^3(t) = y_{i,1}^2(t)$, $x_{i,2}^3(t) = y_{i,2}^2(t)$, $x_{i,3}^3(t) = y_{i,3}^2(t)$, $i=1, 10$.

Нами показано [7], что общая производительность ТСИР $y_{1,1}^3(t)$, процент содержания класса ≤ 80 мкм $y_{1,2}^3(t)$ в объединенной пульпе и ее плотность $y_{1,3}^3(t)$ связаны с характеристиками отдельных комплексов следующими соотношениями:

$$y_{1,1}^3(t) = H_{1,1}^3(x_{1,1}^3(t), x_{1,2}^3(t), \dots, x_{1,10}^3(t)) = \sum_{i=1}^{10} x_{1,i}^3(t),$$

$$y_{1,2}^3(t) = H_{1,2}^3(x_{1,1}^3(t), \dots, x_{1,20}^3(t)) = \left[\sum_{i=1}^{10} x_{1,i}^3(t) \cdot x_{1,(i+10)}^3(t) \right] / \sum_{i=1}^{10} x_{1,i}^3(t),$$

$$y_{1,3}^3(t) =$$

$$= H_{1,3}^3(x_{1,1}^3(t), x_{1,2}^3(t), \dots, x_{1,10}^3(t), x_{1,20}^3(t), \dots, x_{1,30}^3(t)) = \left[\sum_{i=1}^{10} \frac{x_{1,i}^3(t) x_{1,(i+20)}^3(t)}{x_{1,(i+20)}^3(t) - 1000} \right] / \sum_{i=1}^{10} \frac{x_{1,i}^3(t)}{x_{1,(i+20)}^3(t) - 1000}.$$

Модель формирования значений показателя эффективности функционирования ТСИР включает алгоритмическую модель формирования ее выходных среднесменных показателей для реализованных траекторий функционирования системы и регрессионную модель, описывающую статистическую зависимость прибыли, получаемой от производства медно-молибденовых концентратов в восьмичасовом интервале времени, от выходных среднесменных показателей ТСИР.

При решении поставленной задачи в качестве сравнительной оценки эффективности каждого варианта структуры резервных связей между ИА была выбрана величина прироста прибыли (в у.е.), получаемой от производства медно-молибденовых концентратов в восьмичасовом интервале времени при использовании данного варианта. Как видно из табл. 1, в результате имитационных экспериментов с компьютерной модели ТСИР в качестве наилучшей структуры резервных связей был выбран третий вариант с рациональной стратегией «А» реконфигурации структуры.

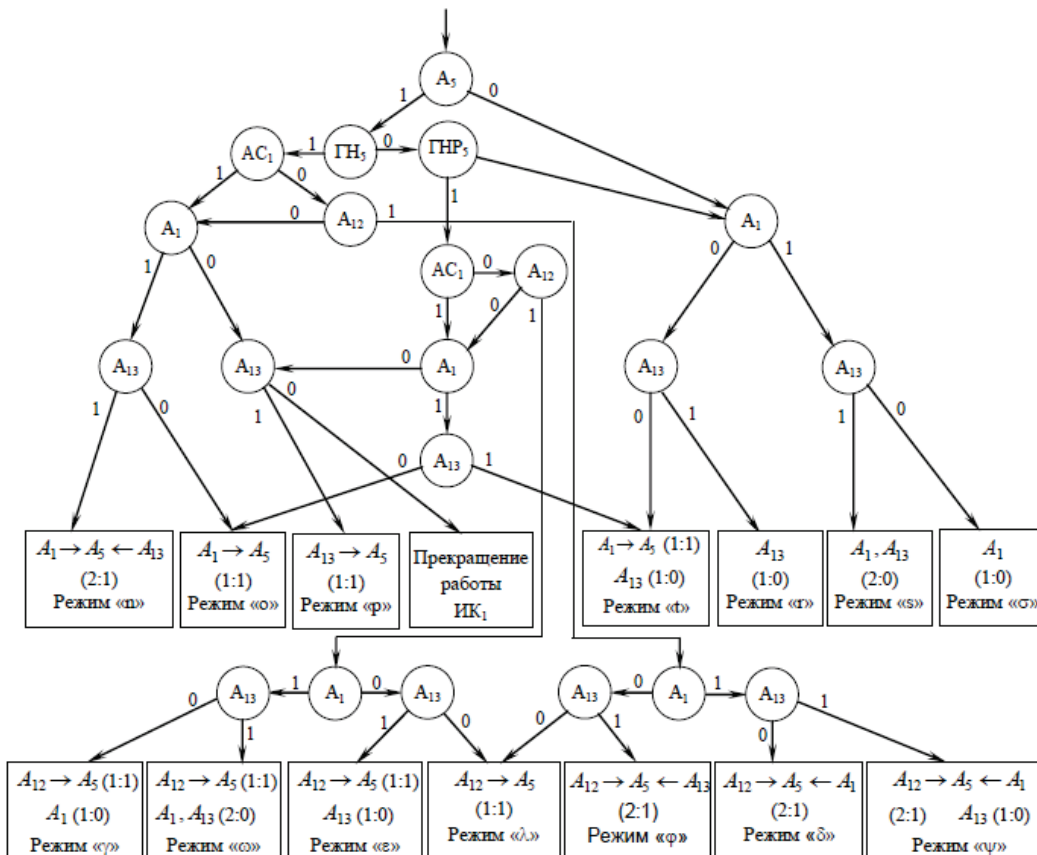


Рис. 4. Дерево решений для ИК₁

Fig. 4. Decision tree for gridding complex (GC₁)

Компьютерная модель принятия решений по реконфигурации структуры ТСИР

Оператору измельчительного отделения нелегко запомнить сложную процедуру выбора наилучшей структуры системы в зависимости от работоспособности измельчительных агрегатов и своевременно принять наиболее рациональные для конкретно сложившихся отказовых ситуаций решения. В этой связи возникает необходимость автоматизации процесса принятия решений по реконфигурации структуры ТСИР при отказах ее оборудования.

В соответствии с выбранной наилучшей структурой резервных связей и рациональной стратегией реконфигурации структуры ТСИР разработана математическая модель процесса принятия решений по реконфигурации структуры ТСИР при отказах ее агрегатов в виде дерева решений (рис. 3). Данная модель состоит из 10 последовательно соединенных деревьев решений, каждое из которых представляет процесс принятия решений по реконфигурации структуры соответствующего измельчительного комплекса (на рис. 4 приведено дерево решений для ИК₁).

На основании построенных деревьев решений для наилучшего варианта разработана компьютер-

ная модель принятия решений по реконфигурации структуры (КМПРПС) ТСИР при отказах ее агрегатов. КМПРПС состоит из 10 модулей, каждый из которых при отказах измельчительных агрегатов ТСИР позволяет принять наилучшее решение по реконфигурации структуры и выбору режимов работы соответствующего измельчительного комплекса. Блок-схема одного из модулей (для измельчительного комплекса ИК₁) приведена на рис. 5.

Входной сигнал КМПРПС представляет собой 32-мерный бинарный вектор $\hat{z}(t) = (\hat{z}_1(t), \hat{z}_2(t), \dots, \hat{z}_{32}(t))$, описывающий состояние ТСИР в момент времени t . Каждая компонента вектора $\hat{z}(t)$ в зависимости от состояния соответствующего измельчительного агрегата (или грунтового насоса) может принимать значение 1 при работоспособности агрегата, или 0 – при его отказе или принудительном простое. Выходной сигнал КМПРПС представляет собой совокупность решений по реконфигурации структуры и выбору режимов каждого из десяти измельчительных комплексов.

КМПРПС реализована на компьютере Pentium i7 с использованием языка C++. Среднее время принятия решения для одной ситуации с помощью КМПРПС составляет около 1 мин, что позволяет

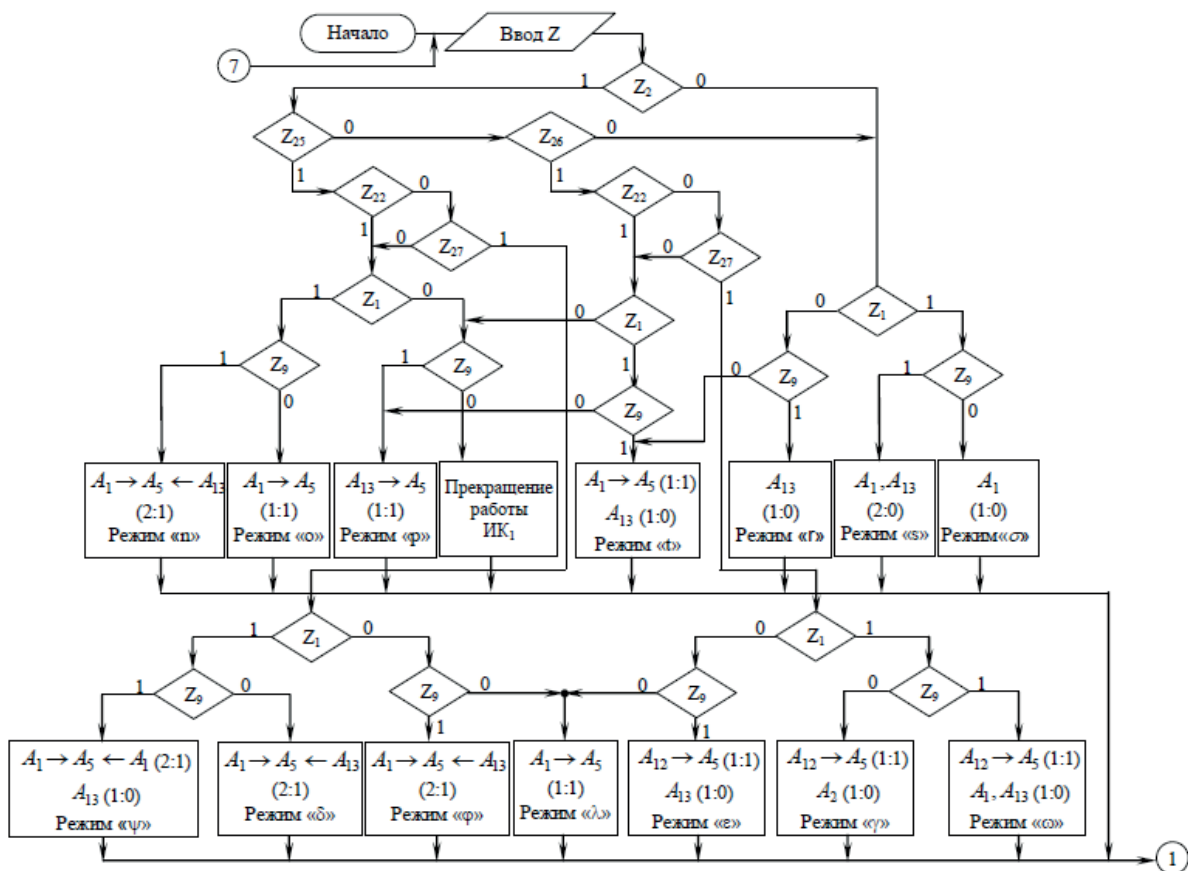


Рис. 5. Блок-схема модуля КМПРПС для ИК₁

Fig. 5. Block diagram of computer model of decision-making system (CMDMS) module for GC₁

использовать ее с целью управления процессом реконфигурации структуры ТСИР в реальном масштабе времени.

Заключение

Обоснована необходимость повышения надежности и эффективности функционирования ТСИР путем введения в систему структурной избыточности.

В результате имитационных экспериментов с компьютерной модели ТСИР определены наилучшая структура резервных связей между измельчительными агрегатами и рациональная стратегия реконфигурации структуры системы при отказах ее оборудования.

На основании вышеуказанных результатов построена математическая модель принятия решений по реконфигурации структуры ТСИР при отка-

зах ее оборудования в виде дерева решений, с использованием которой разработана компьютерная модель принятия решений по реконфигурации структуры ТСИР. Данная модель позволяет при изменении работоспособности измельчительного оборудования ТСИР своевременно выбрать наилучшую для данной отказовой ситуации структуру и режим работы каждого измельчительного комплекса, независимо от квалификации и опыта оператора. Благодаря применению этой модели оператор по существу освобождается от обязанностей лица, принимающего решения по реконфигурации структуры ТСИР при отказах ее оборудования.

Разработанная компьютерная модель включена в состав специального программного обеспечения автоматизированной системы управления технологическим процессом измельчения медно-молибденовой руды ЗММК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдохин В.М. Основы обогащения полезных ископаемых. Т. 1. Обогащительные процессы. – М.: Изд-во «Горная книга», 2014. – 417 с.
2. King R.P. Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems. 2nd ed. – Boston: Butterworth-Heinemann, 2015. – 416 p.
3. Castro S., Lopez-Valdivieso A., Laskowski J.S. Review of the flotation of molybdenite // International Journal of Mineral Processing. – 2016. – V. 148. – P. 48–58.
4. Jovanović I., Miljanović I. Contemporary advanced control techniques for flotation plants with mechanical flotation cells – a review // Minerals Engineering. – 2015. – V. 70. – P. 228–249.
5. Карепов В.А., Безверхая Е.В., Чесноков В.Т. Надежность горных машин и оборудования. – Красноярск: Изд-во СФУ, 2012. – 134 с.
6. Баласанян С.Ш. Метод стратифицированной формализации сложных технологических систем со многими состояниями // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 1. – С. 6–18.
7. Баласанян С.Ш. Стратифицированное моделирование сложных технологических систем. – Саарбрукен, Германия: LAP Lambert Academic Publishing, 2016. – 385 с.
8. Баласанян С.Ш., Геворгян Э.М. Имитационная модель процесса изменения работоспособности измельчительного оборудования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 2. – С. 21–34.
9. Баласанян С.Ш., Симонян С.О., Геворгян Э.М. Компьютерная модель для стохастического управления технологическим процессом флотации руды с учетом надежности измельчительного оборудования // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 5. – С. 50–57.
10. Fangfang Yuan, Fusheng Lian, Xingjian Xu. Decision tree algorithm optimization research based on MapReduce // 6th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS). – Beijing, China, 23–25 Sept. 2015. – P. 1010–1013.
11. Jani Ritika. Research on data mining classification // Int. J. Adv. Res. Comput. Sci. Software Engineering. – 2014. – 4 (4). – P. 329–332.
12. Auret L., Aldrich C. Interpretation of nonlinear relationships between process variables by use of random forests // Miner. Eng. – 2012. – № 35. – P. 27–42.
13. Jani Ritika, Bhatt Nirav, Shah Chandni. A Survey on Issues of Data Stream Mining in Classification // II International Conference on Information and Communication Technology for Intelligent Systems (ICTIS 2017). – Ahmedabad, India, 25–26 March, 2017. – V. 1. – P. 137–144.
14. Turunen E., Raivio K., Mantere T. Soft Computing Methods // Mathematical Modelling / Ed. by S. Pohjolainen. – Cham, Switzerland: Springer, 2016. – P. 79–112.
15. Maimon O., Rokach L. Data Mining and Knowledge Discovery Handbook. 2nd ed. – New York: Springer, 2010. – 1306 p.
16. Auret L., Aldrich C. Monitoring of mineral processing operations based on multivariate similarity indices // Preprints of the 18th IFAC World Congress. – Milano, Italy, August 28 – September 2, 2011. – P. 9923–9928.
17. Jovanović I., Miljanović I., Jovanović T. Soft computing-based modeling of flotation processes – a review // Minerals Engineering. – 2015. – V. 84. – P. 34–63.
18. Using data mining to assess and model the metallurgical efficiency of a copper concentrator / M., Massinaei M.R. Sedaghati, R. Rezvani., A.A Mohammadzadeh. // Chem. Eng. Commun. – 2014. – № 201 (10). – P. 1314–1326.
19. Jahedsaravani A., Marhaban M.H., Massinaei M. Application of statistical and intelligent techniques for modeling of metallurgical performance of a batch flotation process // Chem. Eng. Commun. – 2016. – V. 203. – Iss. 2. – P. 151–160.
20. Gouws F.S., Aldrich C. Rule-based characterization of industrial flotation processes with inductive techniques and genetic algorithms // Ind. Eng. Chem. Res. – 1996. – № 35. – P. 4119–4127.

Поступила 20.04.2018 г.

Информация об авторах

Баласанян С.Ш., доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе Капанского филиала Национального политехнического университета Армении.

Геворгян Э.М., кандидат технических наук, ассистент кафедры информационных технологий, информатики и автоматизированных систем Капанского филиала Национального политехнического университета Армении.

UDC 681.51:622.73

COMPUTER MODEL OF DECISION-MAKING ON RECONFIGURATION OF THE ORE GRINDING TECHNOLOGICAL SYSTEM STRUCTURE

Seyran Sh. Balasanyan¹,
seyran@sunicom.net

Hermine M. Gevorgyan¹,
hermine79@rambler.ru

¹ Kapan branch of National Polytechnic University of Armenia,
28, Baghaberd Street, Kapan, 3307, Armenia.

The relevance of the research is caused by the need to improve the reliability and efficiency of functioning of the ore grinding technological system by introducing structural redundancy.

The main aim of the research is to substantiate the need to improve the efficiency of the ore grinding technological system by introducing structural redundancy (reserve links), determining the best structure of reserve connections between grinding aggregates and rational strategies for their use, building a mathematical decision-making model for reconfiguring the structure of the ore grinding technological system at the failure of its equipment in the form of a decision tree, the development of a decision-making computer model for reconfiguring the ore grinding technological system structure.

Object of the research is the ore grinding technological system of Zangezur Copper-Molybdenum Combine (Armenia).

Methods: decision-tree method (method soft computing), simulation modeling.

The result of simulation experiments with the computer model of the technological system of ore grinding is determined by the best structure of the redundant links between the milling units and rational strategy for their use, on the basis of which the authors have developed a mathematical model of decision-making on reconfiguring the structure of ore grinding technological system (at the failure of its equipment) in the form of a decision tree. On the basis of this model the authors developed a computer model that allows, with a change in the operability of grinding aggregates, selecting in a timely manner the best structure of the redundant links and mode of operation for each unit for the current failed situation, regardless of the operator's skills and experience. Thanks to the application of this model, the operator is completely freed from the duties of the decision-maker. The developed computer model was included in the special software of the automated process control system for grinding the ore from Zangezur Copper-Molybdenum Combine.

Key words:

Ore grinding, failure, simulation modeling, decision tree, reconfiguration, structural redundancy.

REFERENCES

1. Avdokhin V.M. *Osnovy obogashcheniya poleznykh iskopaemykh. T. 1. Obogatitelnye protsessy* [The fundamentals of mineral processing. Vol. 1. Mineral processing]. Moscow, Gornaya kniga Publ., 2014. 417 p.
2. King R.P. *Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems*. 2nd ed. Boston, Butterworth-Heinemann, 2015. 416 p.
3. Castro S., Lopez-Valdivieso A., Laskowski J.S. Review of the flotation of molybdenite. *International Journal of Mineral Processing*, 2016, vol. 148, pp. 48–58.
4. Jovanović I., Miljanović I. Contemporary advanced control techniques for flotation plants with mechanical flotation cells – a review. *Minerals Engineering*, 2015, vol. 70, pp. 228–249.
5. Karepov V.A., Bezverkhaya E.V., Chesnokov V.T. *Nadezhnost gornykh mashin i oborudovaniya* [Reliability of mining machines and equipment]. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2012. 134 p.
6. Balasanyan S.Sh. A stratified method of formalization of multi-state complex technological systems. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 1, pp. 6–18. In Rus.
7. Balasanyan S.Sh. *Stratifikatsionnoye modelirovaniye slozhnykh tekhnologicheskikh sistem* [Stratified modeling of complex technological systems]. Saarbrücken, Germany, LAP Lambert Academic Publishing, 2016. 385 p.
8. Balasanyan S.Sh., Gevorgyan H.M. Simulation model of changing working capacity of grinding equipment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 2, pp. 21–34. In Rus.
9. Balasanyan S.Sh., Simonyan S.O., Gevorgyan H.M. Computer model for stochastic control of ore flotation considering grinding equipment reliability. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 5, pp. 50–57. In Rus.
10. Fangfang Yuan, Fusheng Lian, Xingjian Xu. Decision tree algorithm optimization research based on MapReduce. *6th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS)*. Beijing, China, 23–25 September, 2015. pp. 1010–1013.
11. Jani Ritika. Research on data mining classification. *Int. J. Adv. Res. Comput. Sci. Software Engineering*, 2014, no. 4 (4), pp. 329–332.
12. Auret L., Aldrich C. Interpretation of nonlinear relationships between process variables by use of random forests. *Minerals Engineering*, 2012, no. 35, pp. 27–42.
13. Jani Ritika, Bhatt Nirav, Shah Chandni. A Survey on Issues of Data Stream Mining in Classification. *II International Conference on Information and Communication Technology for Intelligent Systems (ICTIS 2017)*. Ahmedabad, India, 25–26 March, 2017. Vol. 1, pp. 137–144.
14. Turunen E., Raivio K., Mantere T. *Soft Computing Methods. Mathematical Modelling*. Ed. by S. Pohjolainen. Cham, Switzerland, Springer, 2016. pp. 79–112.
15. Maimon O., Rokach L. *Data Mining and Knowledge Discovery Handbook*. 2nd ed. New York, Springer, 2010. 1306 p.
16. Auret L., Aldrich C. Monitoring of mineral processing operations based on multivariate similarity indices. *Preprints of the 18th IFAC World Congress*. Milano, Italy, 2011, August 28 – September 2. pp. 9923–9928.
17. Jovanović I., Miljanović I., Jovanović T. Soft computing-based modeling of flotation processes – a review. *Minerals Engineering*, 2015, vol. 84, pp. 34–63.

18. Massinaei M., Sedaghati M.R., Rezvani R., Mohammadzadeh A.A. Using data mining to assess and model the metallurgical efficiency of a copper concentrator. *Chem. Eng. Commun.*, 2014, no. 201 (10), pp. 1314–1326.
19. Jahedsaravani A., Marhaban M.H., Massinaei M. Application of statistical and intelligent techniques for modeling of metallurgical performance of a batch flotation process. *Chem. Eng. Commun.*, 2016, vol. 203, no. 2, pp. 151–160.
20. Gouws F.S., Aldrich C. Rule-based characterization of industrial flotation processes with inductive techniques and genetic algorithms. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1996, no. 35, pp. 4119–4127.

Received: 20 April 2018.

Information about the authors

Seyran Sh. Balasanyan, Dr. Sc., professor, deputy director on research works, Kapan branch of National Polytechnic University of Armenia.

Hermine M. Gevorgyan, Cand. Sc., assistant, Kapan branch of National Polytechnic University of Armenia.

УДК 621.313.04:621.315.61

КОНТРОЛЬ ПРОПИТКИ – ЭФФЕКТИВНЫЙ ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ, СТРОИТЕЛЬНОЙ И ДРУГИХ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Смирнов Геннадий Васильевич¹,
smirnov@main.tusur.ru

Ведяшкин Максим Викторович²,
vedyashkin@tpu.ru

¹ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
Россия, 634045, г. Томск, пр. Ленина, 40.

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

Отказ электрической машины приводит к аварийным ситуациям, к простоем оборудования и, как следствие, к высоким экономическим затратам на ликвидацию результатов отказа машины. Наибольший ущерб отечественной экономике наносит отказ электрических машин при разведке, добыче и транспортировке георесурсов в нефтедобывающей, горнорудной, угольной, химической и других отраслях промышленности, так как эти отрасли в настоящее время являются основой формирования бюджета страны. Надежность и безотказность работы этих машин в значительной степени определяется технологическими операциями пропитки и сушки обмоток, так как на этих операциях формируются важнейшие качественные характеристики обмоток: электроизоляционные, тепловые, влагостойкие и механические. Все эти свойства зависят от степени заполнения межвитковых и прикорпусных полостей обмотки пропиточным составом. В случае некачественной пропитки обмоток возможно появление дефектов в межвитковой изоляции в период хранения и транспортировки оборудования к месту эксплуатации, что неизбежно приводит к снижению надежности изоляции обмоток. Совершенствование указанных операций невозможно осуществлять без надлежащих способов неразрушающего контроля качества проведения этой операции. Поэтому разработка методов контроля качества пропитки обмоток является весьма злободневной проблемой.

Цель: показать возможность контроля распределенности пропиточного состава по обмотке по результатам измерения теплоёмкости обмоток до пропитки и после неё.

Методы: электротепловые и электромагнитные, связанные с измерением тепловых параметров обмотки и отдельных электрических величин при контроле качества пропитки.

Результаты. Рассмотрен электротепловой способ контроля качества пропитки обмоток. Обоснованы физические принципы контроля качества пропитки, и приведен вывод основных критериев оценки качества указанной технологической операции. Приведена схема прибора контроля, и рассмотрен принцип его работы. Произведен анализ погрешностей предложенного способа контроля.

Ключевые слова:

Обмотка, пропиточный состав, система управления, преобразователь, теплоёмкость, сопротивление, время, генератор, триггер, счетчик.

Введение

Безотказность электрических машин – один из важнейших показателей надежности, так как отказ двигателя приводит к аварийным и часто к опасным для здоровья и жизни людей факторам. Наибольшую опасность для людей представляют отказы электродвигателей в производствах горнодобывающей, нефтяной, газовой и других производствах сырьевой промышленности [1]. Именно в этих отраслях промышленности электрические машины широко используются в качестве электроприводов буровых установок [2], шахтных вентиляционных устройств [3], в погружных электродвигателях насосов при добыче нефти [4], в лебедках и других транспортных средствах [5], где их отказ может привести к возникновению чрезвычайных ситуаций и даже к гибели людей. Самым ненадежным узлом электрической машины является изоляция их обмоток [1, 6]. Показатели надежности изоляции обмоток электрических машин закладываются в процессе их производства и

зависят от качества изоляции обмоточного провода, от намоточного оборудования, технологии пропитки и сушки обмоток [7–12]. При этом в процессе намотки обмоток происходит снижение показателей их надежности из-за образования многочисленных дефектов в эмалевой изоляции проводов, обусловленных вытяжкой провода, растрескиванием изоляционной пленки обмоточных проводов, образованием в ней сдилов и проколов. Операция пропитки обмоток, наоборот, способствует повышению качества изоляции обмоток, так как на этом этапе пленкой пропиточного состава скрываются дефекты в витковой, межфазной и корпусной изоляции. При этом качество изоляции пропитанных обмоток зависит не только от свойств самого пропиточного состава, но и от того, какое количество этого состава проникло в полости обмоток, и как он распределился по указанным полостям. В результате пропитки обмоток повышаются не только их электроизоляционные свойства, но и их теплопроводность, влагостойкость, монолитность

и другие характеристики, повышающие надежность изоляции обмоток.

При некачественной пропитке, когда степень заполненности межвитковых и прикорпусных полостей пропиточным составом низка, часть существующих в обмотке пустот остается незаполненной пропиточным составом. В результате этого усугубляется процесс проникновения влаги и пыли в обмотки электрических машин, что приводит к ускоренному старению изоляции обмоток и к значительному повышению вероятности отказа изоляции указанных обмоток [7–14].

Повышение качества изоляции обмоток невозможно осуществить без совершенствования технологии пропитки и сушки. Совершенствование же этих операций, оперативное устранение технологических причин, приводящих к некачественной пропитке и сушке, невозможно реализовать без разработки и внедрения неразрушающих методов контроля качества проведения указанных технологических операций. Попытки создания точных и информативных способов контроля качества пропитки предпринимались в работах ряда исследователей [15–29]. В основу контроля в этих работах было положено измерение ёмкости обмоток относительно магнитного сердечника до пропитки и после неё. Такой контроль позволяет оценить только качество пропитки прикорпусных полостей обмотки. Однако этим способом невозможно определить наиболее важный параметр – степень заполнения пропиточным составом межвитковых полостей обмотки, а также нельзя оценить, как распределится пропиточный состав по фазам обмотки.

Цель настоящей работы – устранение недостатков вышеназванных способов контроля пропитки, повышение точности и информативности контроля.

Статистика отказов электродвигателей в различных отраслях промышленности и их причины

В настоящее время электропривод занимает доминирующее положение практически во всех промышленных и многих транспортных механизмах. Согласно статистике, электроприводом оснащены примерно 85 % всех двигательных и силовых механизмов (насосы, компрессоры, вентиляторы, станки, разнообразные технологические машины, бытовая техника и др.). Асинхронные двигатели (АД) стали изделием массового применения, и на сегодня они потребляют около 75 % вырабатываемой во всем мире электроэнергии [25].

Электрические двигатели участвуют во многих сложных и ответственных технологических процессах и операциях. Отказ в их работе может повлечь за собой огромные убытки предприятия из-за простоя технологического оборудования, а также несет угрозу безопасности жизни людей. Такие убытки могут во много раз превышать стоимость самого электродвигателя, вышедшего из строя. Специфические и тяжелые условия эксплуатации приводят к снижению надежности и долговечности электродвигателей. Окружающая среда, в ко-

торой функционирует электрическая машина, может значительно отличаться от нормированной для нормальной работы электродвигателей. В частности, в горнодобывающей, строительной и нефтегазовой промышленности присутствие в вентилируемом электродвигателем воздухе агрессивных сред, паров кислот и щелочей, токопроводящей и не токопроводящей пыли, а также других механических включений ведут к преждевременному износу, а то и к выходу из строя как витковой, так и корпусной изоляции, что приводит электродвигатель в негодность. Технико-экономическое совершенство и эксплуатационная надежность работы электрических машин в значительной степени зависят от изоляции. Если учесть то, что стоимость изоляции составляет около половины стоимости всех материалов машины, становится понятным то большое внимание, которое уделяется специальным вопросам, связанным с изготовлением и диагностикой состояния изоляции электрических машин. Асинхронные двигатели нередко работают в весьма тяжелых условиях при неудовлетворительном обслуживании или совершенно без какого-либо ухода. Примерно 30–35 % отказов происходит вследствие недостатков конструкции и технологии производства двигателей. Лишь 10–12 % двигателей выходят из строя вследствие естественных процессов старения и износа. Статистика обнаруживает резкие колебания в уровне аварийности и сроке службы двигателей в различных отраслях промышленности. Среднегодовой выход двигателей в капитальный ремонт составлял: в строительстве – 54 %, в горнодобывающей промышленности – 29 %, в промышленности стройматериалов – 25 %, в пищевой промышленности – 24 %. В то же время в химической промышленности, где условия работы двигателей также достаточно неблагоприятны, средний выход в капитальный ремонт в год составил лишь 9 %, в черной металлургии – 13 %. На некоторых шахтах Кузбасса электродвигатели служат в среднем всего 6–7 мес. В условиях химической промышленности средний технический ресурс двигателей серии ВАО до первого капитального ремонта составляет 60–80 тыс. ч, в то время как на угольных шахтах только 5–6 тыс. ч, а для отдельных приводных механизмов даже около 2 тыс. ч. Распределение повреждений по отдельным узлам асинхронных двигателей изменяется в зависимости от условий их применения, однако наибольшее число поврежденных приходится на обмотку статора. В среднем из-за повреждений обмоток двигателей происходит 85–95 % отказов, 3–8 % отказов происходит вследствие повреждений подшипников [30]. По характеру повреждений обмоток отказы асинхронных двигателей единой серии распределяются следующим образом: межвитковые замыкания – 93 %, повреждения междуфазовой изоляции – 5 %, фазовой изоляции – 2 % [26]. Таким образом, в подавляющем большинстве случаев причиной отказов является повреждение межвитковой изо-

ляции, типичное для всыпных обмоток. Повреждения междуфазовой и пазовой изоляции обычно возникают как следствие межвитковых замыканий и представляют развитие последних. Для асинхронных двигателей общепромышленного применения изменение интенсивности отказов в функции времени имеет довольно типичный характер, обнаруживая отчетливые периоды приработки, нормальной эксплуатации и износа. Правильная форма кривой интенсивности отказов обусловлена тем, что преобладающей причиной отказов являются межвитковые замыкания в обмотке статора и, таким образом, в большинстве случаев отказы однотипны по своему происхождению [31]. Обобщая полученные данные о повреждениях изоляции, можно назвать наиболее характерные из них: короткое замыкание на корпус, короткие витковые замыкания, пробой и обугливание изоляции, обрыв обмотки статора. Наиболее частое сочетание встречающихся видов повреждений – это пробой и обугливание изоляции с витковым коротким замыканием и повреждением провода. Такое сочетание видов повреждений имеют 51,2 % из всех вышедших из строя и обследованных электродвигателей. Обугливание изоляции в сочетании с пробоем наблюдается у 10,2 % двигателей, а обугливание изоляции в сочетании с витковым коротким замыканием и пробоем – у 13,1 %. В «чистом» виде пробой изоляции имеет место у 4,8 %, обугливание изоляции – у 13,5 %, витковое короткое замыкание – у 4,3 % электродвигателей. Лишь 29 % электродвигателей имели механические повреждения без повреждения обмотки. Кроме этого, по данным некоторых исследований, пробой на корпус наблюдался у 16 %, а стгорание обмоток – у 46 % электродвигателей. Особенно опасны отказы двигателей вследствие пробоя изоляции в горнодобывающей промышленности, в частности в угольных шахтах. Такие отказы могут повлечь возгорания и взрывы угольной пыли и привести к гибели людей. Все это говорит о том, насколько высокими должны быть требования к технологии изготовления обмоток электродвигателей. Для этого необходимы средства и методы контроля и диагностирования изоляции обмоток в процессе их изготовления. Основное количество повреждений витковой изоляции обмоток происходит в процессе их намотки [26]. Во время эксплуатации изоляция электрооборудования, в том числе и электрических машин, подвергается различным воздействиям, под влиянием которых происходит старение изоляции, т. е. необратимое ухудшение ее свойств. Для изоляции электрических двигателей характерным является образование местных дефектов (например, трещин), т. е. существенное ухудшение ее электрических свойств на отдельных небольших участках. К причинам, вызывающим повреждения изоляционных материалов, относятся тепловые и электрические поля, величины механических нагрузок, запыленность и влажность окружающей среды. Качественная пропитка

позволяет создать систему изоляции, устойчивую к действию указанных эксплуатационных воздействий. Это обусловлено тем, что операция пропитки обмоток является многоцелевой и приводит не только к скрытию дефектов в витковой, междуфазной и корпусной изоляции, но и вызывает значительное улучшение тепловых, механических, влагозащитных и других свойств изоляции обмотки [25]. Во время работы оборудования его изоляция испытывает эти воздействия одновременно, при этом возможно взаимодействие, т. е. одновременно приложенные воздействия могут вызывать старение изоляции с иной скоростью, нежели приложенные поочередно. Каждый из перечисленных ранее видов воздействия может оказаться в определенных условиях основным, определяющим процесс старения изоляции или ее части, в этом случае данному виду воздействия будет соответствовать определенный характер старения изоляции и вызываемые этим старением дефекты. Тепловое старение изоляции является следствием постепенного химического изменения входящих в ее состав органических веществ. Возможны другие условия теплового старения изоляции – сравнительно кратковременное действие температур, существенно превышающих допустимые рабочие температуры. Такие условия возникают, как правило, при местных перегревах: замыкание ряда элементарных проводников в пазовой части стержня с быстрым ростом температуры в месте замыкания, излом проводника со случайным контактом в месте излома.

Основными факторами действия на изоляцию электрических машин окружающей среды являются: действие окружающего изоляцией газа (например, воздуха); действие влаги, содержащейся в воздухе, газе или попадающей на изоляцию в виде жидкости (например, попадание влаги извне при действии устройств пожаротушения, при небрежном хранении статора и т. п.). Кроме того, возможно абразивное действие пыли, содержащейся в воздухе. Действие окружающего изоляцию газа сказывается в основном на процессах теплового и электрического старения изоляции. Действие на изоляцию крупных металлических частиц и предметов, попавших в двигатель извне или выпавших из различных его узлов, с некоторым допущением также может быть отнесено к действию окружающей среды. Увлажнение изоляции при работе машины возможно лишь при попадании воды на обмотку. Увлажнение изоляции от действия влажного воздуха возможно только тогда, когда машина не работает (во время транспортировки, монтажа, длительного ремонта и т. п.). При этом разные части изоляции увлажняются по-разному в зависимости от материала, из которого они сделаны, и технологии пропитки. Современная пропитка обмоток терморезистивными компаундами, не имеющая дефектов при высоком коэффициенте пропитки, практически не подвержена объемному увлажнению. В ней при правильном ее изготовлении мало пор, проникая в которые влага могла бы сни-

зять ее электрическую прочность. Термореактивные компаунды мало гигроскопичны, и процесс их увлажнения идет весьма медленно. Значительно более интенсивно идет процесс поверхностного увлажнения, однако такое увлажнение легко устраняется подсушкой изоляции на воздухе даже без нагрева. Только при наличии дефектов увлажнения может существенно сказаться на пробивном напряжении изоляции. Такими дефектами могут быть трещины, образовавшиеся при укладке стержней и подгонке головок из-за неправильной формы лобовых частей или нарушения технологии укладки. Другим дефектом может явиться недостаточная пропитка изоляции и плетеного стержня термореактивным компаундом. Непрерывная компаундированная изоляция, не имеющая дефектов, практически также не подвержена объемному увлажнению ни под действием обычной влаги воздуха, ни при кратковременном смачивании водой: пропитка компаундом хотя бы внешних слоев изоляции делает ее мало гигроскопичной. У такой изоляции (как и термореактивной) возможно главным образом поверхностное увлажнение. Механическим воздействиям изоляция подвергается как во время изготовления, так и во время эксплуатации электрической машины. Механические воздействия приводят к возникновению в изоляции деформаций растяжения, сжатия, изгиба, смятия, кручения, а также к трению поверхности стержней о прилегающие к ним детали. При неблагоприятных обстоятельствах это приводит к появлению дефектов изоляции в виде трещин, складок, ее расслоения и местного уменьшения толщины. Уровень механических воздействий с ростом мощности двигателей непрерывно возрастает, и увеличивается опасность механического повреждения изоляции в случае малейших конструктивных или технологических недоработок, упущений при монтаже. В связи с этим механические повреждения изоляции являются наиболее характерной причиной дефектов, выявляемых в машинах, находящихся в эксплуатации. Термомеханические воздействия возникают при тепловых циклах (нагревании и охлаждении обмотки) в основном вследствие разницы в температурах и коэффициентах линейного расширения меди, активной стали и изоляции, а также наличия значительного трения между поверхностью стержня и стенками паза. Вследствие указанных причин при изменении тока в обмотке и соответствующем изменении температуры токоведущей части стержня и длины последней (расширении или сжатии) в изоляции возникают напряжения растяжения или сжатия, усугубляемые тем, что перемещения стержня в пазу происходят с усилием. При термореактивной изоляции и уплотнении стержня в пазу боковыми пружинящими прокладками смещения меди и изоляции относительно стали сердечника практически одинаковы, т. е. изоляция не смещается относительно токоведущего стержня, а образует с ним комплекс с некоторым общим коэф-

фициентом линейного расширения. Термомеханические напряжения при большом числе циклов нагрева и охлаждения существенно влияют на состояние термореактивной изоляции и при сочетании неблагоприятных условий, в частности при недостаточно совершенной ее системе, могут привести к отказу изоляции. Анализ всех известных способов поддержания эксплуатационной надежности изоляции АД, основными из которых являются ее капитальный ремонт, техническое обслуживание, периодическая диагностика, обеспечение надежной защитой, показывает, что основными мероприятиями, способствующими созданию базового ресурса работы изоляционной системы, являются ее пропитка и сушка специальными диэлектрическими составами [26]. Обмоточно-изолировочные работы являются важнейшими при ремонте. Это обусловлено тем, что правильный выбор значений конструктивных параметров обмотки обеспечивает нормируемые значения рабочих и энергетических характеристик электродвигателя, а качественное выполнение работ способствует отсутствию дефектов в эмалевом покрытии проводников. В практике эксплуатации электрооборудования в сельском хозяйстве известны случаи, когда после полной или частичной перемотки АД не подвергались операциям пропитки и сушки. При этом АД сохраняли работоспособное состояние в течение некоторого времени. Однако вследствие воздействия агрессивных факторов эмалевое покрытие проводов сравнительно быстро повреждалось, и электродвигатель выходил из строя. Таким образом, эксплуатационная надежность изоляции обмотки после обмоточно-изолировочных работ низка. В практике электромашиностроения для повышения надежности изоляционных конструкций низковольтных электродвигателей используется пропитка и сушка их обмоток. Сушка перед пропиткой необходима для удаления влаги из пор изоляции, препятствующей проникновению лака в тело обмотки. Сушку перед пропиткой требуется выполнять еще и потому, что при пропитке лаки и компаунды быстрее и глубже проникают внутрь нагретых обмоток вследствие разрежения воздуха в капиллярах, которое возникает при нагревании обмоток. Следует также отметить, что чем выше температура, тем быстрее происходит удаление влаги из обмоток. Сушка до пропитки может осуществляться с использованием следующих методов: конвекционного, токового, терморadiационного, индукционного, электроосмоса, вакуумного, скоростного электротермовакuumного. Одним из путей повышения надежности изоляции обмоток является обоснование режимов технологического процесса ее пропитки и сушки на основе оптимизации этих процессов, которую невозможно осуществить без надлежащих способов и устройств контроля пропитки. В процессе проведения технологических операций изготовления обмоток электродвигателей измеряются некоторые величины, которые являются частными показателями каче-

ства. К ним относится дефектность изоляции провода, возникающая при намотке, коэффициент пропитки и степень полимеризации пропиточного состава при сушке после пропитки [25]. Каждый из частных показателей качества является характеристикой успешности выполняемых операций технологического процесса. Основным интересом представляет технический аспект использования тех или иных показателей качества. В настоящее время для диагностики изоляции электродвигателей распространение получили тестовые средства диагностики и контроля, работающие по принципу посылки специального сигнала с последующей его обработкой, а также различные электрические приборы. К диагностирующим приборам, обеспечивающим минимальные затраты при осуществлении процесса оценки состояния изоляции, относятся ручные автоматические приборы и устройства периодического контроля. К техническим средствам диагностики и контроля обмоток электродвигателей относятся электромеханические, цифровые и электронные омметры, измерительные мосты, специальные устройства для измерения добротности и емкости. Наибольшее распространение в последнее время получили аналоговые электромеханические и электронные цифровые приборы. Иногда для измерения емкости применяются измерительные мосты. Все показатели качества можно разделить на электрические и неэлектрические величины. К электрическим величинам относятся сопротивление обмотки, её индуктивность, межвитковая ёмкость, ёмкость обмотки относительно магнитного сердечника и т. п. К неэлектрическим величинам относится глубина проникновения лака в обмотку, лакопоглощение, влагоудаление, коэффициент пропитки и т. п. Результаты исследований позволяют использовать для оценки каждого этапа технологического процесса следующие показатели: дефектность, протяженность дефектов, коэффициент пропитки и степень полимеризации пропиточного состава.

Теоретическое обоснование электротеплового контроля

Рассмотрим сущность предлагаемого электротеплового способа контроля.

В обмотках статоров электрических машин, соединенных чаще всего в звезду, для более полной характеристики качества пропитки необходимо знать не только средний коэффициент пропитки контролируемой обмотки, но и как пропиточный состав распределен по фазам обмотки. В способе [31] показана последовательность измерений и расчетов, позволяющих определить только усредненный коэффициент пропитки полостей двух фаз обмотки, но не позволяет определить распределенность упомянутых коэффициентов по фазам обмотки. Покажем, как можно определить коэффициенты пропитки не только полостей двух фаз обмотки, но и коэффициенты пропитки каждой из фаз обмотки.

Введем следующие обозначения: K_{i12} , K_{i13} , K_{i23} – коэффициенты пропитки двух фаз обмотки, соответственно 1–2, 1–3, 2–3, связанных в звезду. Для упрощения описания рассмотрим сущность предлагаемого способа на примере определения коэффициента пропитки полостей любых двух фаз обмотки, например фаз 1–2, а потом обобщим полученные результаты для всех остальных фаз.

Коэффициент пропитки двух фаз обмотки можно записать в виде:

$$K_{i12} = \frac{m_{12}}{m_{012}}, \quad (1)$$

где m_{12} – суммарная масса пропиточного состава в полостях фаз 1–2 обмотки; m_{012} – предельная масса, которую можно разместить в полостях упомянутых двух фаз обмотки при их 100 %-м заполнении. Величина m_{012} в выражении (1) может быть определена расчетным путем по формуле:

$$m_{012} = d_c V_{012}. \quad (2)$$

В формуле (2) общий объем полостей в двух фазах обмотки V_{012} находится из обмоточных данных статора по известной формуле:

$$V_{012} = S_p l_w \left(1 - \frac{\pi}{4} K_f \right) \cdot \frac{\delta}{2}, \quad (3)$$

где S_p – площадь сечения паза; l_w – длина полувитка обмотки; K_f – коэффициент заполнения паза проводом; p – количество пазов, в которые всыпаны две фазы обмотки.

Таким образом, для определения коэффициента пропитки K_{i12} по формуле (1) необходимо знать величину m_{12} , тогда как величину m_{012} можно определить с использованием формул (2) и (3). Рассмотрим, как измерить указанную величину, используя электротепловой способ, в основу которого положен принцип измерения эквивалентной теплоемкости обмотки.

Условно обмотку электротехнического изделия до пропитки можно представить в виде слоистого анизотропного тела, состоящего из медного провода, эмалевого изоляционного, межвитковых воздушных полостей, корпусной изоляции, прикорпусных воздушных полостей. Обмотка всыпана в пазы массивного стального сердечника. Обмотку после пропитки и сушки также можно представить в виде анизотропного слоистого тела, только воздушные полости после пропитки и сушки заполнены пропиточным составом.

До пропитки эквивалентная теплоемкость двух фаз обмотки C_{d12} равняется сумме теплоемкостей

$$C_{d12} = C_{np12} + C_{эм12} + C_{кн12}, \quad (4)$$

где $C_{np12} = c_{np} m_{np12}$ – эквивалентная теплоемкость провода двух фаз контролируемой обмотки; $C_{эм12} = c_{эм} m_{эм12}$ – эквивалентная теплоемкость эмалевого изоляционного провода двух фаз обмотки; $C_{кн12} = c_{кн} m_{кн12}$ – эквивалентная теплоемкость корпусной изоляции двух фаз обмотки; c_{np} , $c_{эм}$, $c_{кн}$ – удельные теплоемкости материала провода, эмали, корпусной изоляции, соответственно; m_{np12} , $m_{эм12}$, $m_{кн12}$ – массы жилы провода, эмали и корпусной изоляции двух фаз обмотки, соответственно.

После пропитки эквивалентная теплоемкость двух фаз обмотки $C_{н12}$ станет равной

$$C_{н12} = C_{пр12} + C_{эм12} + C_{кн12} + C_{пс12}, \quad (5)$$

где $C_{с12} = cm_{12}$, c – удельная теплоемкость пропиточного состава.

Из выражений (4) и (5) следует, что

$$m_{12} = \frac{C_{i12} - C_{д12}}{\tilde{n}}. \quad (6)$$

Из выражения (6) следует, что для определения величины m_{12} достаточно измерить две величины – $C_{н12}$ и $C_{д12}$, и найти их разность. Если к двум фазам непропитанной обмотки подвести греющую энергию $Q_{д12}$ и создать такие условия, чтобы потеря тепла из обмотки в окружающую среду и магнитный сердечник не было, а все тепло указанной энергии было бы потрачено только на разогрев упомянутых фаз обмотки, то, измерив приращение температуры упомянутых двух фаз обмотки $\Delta T_{д12}$, можно было бы определить их эквивалентную теплоемкость $C_{д12}$ согласно выражению:

$$C_{д12} = \frac{Q_{д12}}{\Delta T_{д12}}. \quad (7)$$

Исключения потерь тепла из обмотки можно достичь, если время подвода t_0 энергии выбрать достаточно малым исходя из условия

$$0,01 \tau \leq t_0 \leq 0,013 \tau, \quad (8)$$

где τ – постоянная разогрева обмотки.

Величину τ в выражении (8) можно определить по выражению (9), приведенному ниже

$$\tau = R_{тепл} C_{д,расч}, \quad (9)$$

где $R_{тепл}$ – расчетное тепловое сопротивление двух фаз непропитанной обмотки; $C_{д,расч}$ – расчетная эквивалентная теплоемкость двух фаз непропитанной обмотки.

Тепловое сопротивление в формуле (9) двух фаз непропитанной обмотки можно найти по формуле

$$R_{тепл} = \frac{1}{p} \left[\frac{d_э}{S_{1охл} \lambda_э} + \frac{1}{S_{2охл}} \left(\frac{d_{кн}}{\lambda_{кн}} + \frac{d_в}{\lambda_в} \right) \right], \quad (10)$$

где p – количество пазов, в которые всыпаны две фазы обмотки; $d_э$, $d_{кн}$, $d_в$ – толщина эмалевого изоляционного провода, корпусной изоляции и воздушного зазора между обмоткой и корпусной изоляцией соответственно; $S_{1охл} = \pi \cdot l_w$ – поверхность охлаждения двух фаз обмотки, периметр паза; l_w – длина полувитка обмотки; $S_{2охл} = \pi \cdot l_n$ – поверхность охлаждения двух фаз обмотки, примыкающих к корпусной изоляции; l_n – длина паза; $\lambda_э$ – теплопроводность эмали; $\lambda_{кн}$ – теплопроводность корпусной изоляции; $\lambda_в$ – теплопроводность воздуха.

Для расчета теплового сопротивления по выражению (10) нужно знать конструктивные данные электрической машины и теплопроводности конструкционных материалов.

Греющую энергию $Q_{дн12}$ к двум фазам обмотки можно подводить путем пропускания стабилизированного тока I_0 через провод упомянутых фаз. В этом случае величину греющей энергии можно вычислить по выражению

$$Q_{дн12} = I_0^2 \cdot t_0 \frac{(R_{д12} + R_{др12})}{2}, \quad (11)$$

где $R_{д12}$ – сопротивление двух фаз обмотки в момент подключения к ним источника стабилизированного тока; $R_{др12}$ – сопротивление двух фаз обмотки в момент времени t_0 .

Величина $\Delta T_{д12}$ может быть определена по изменению сопротивления провода двух фаз обмотки в процессе её разогрева стабилизированным током из выражений:

$$R_{д12} = R_{12н20} [1 + \alpha(T_{д12} - 20)], \quad (12)$$

$$R_{др12} = R_{12н20} [1 + \alpha(T_{др12} - 20)]. \quad (13)$$

В выражениях (12) и (13) величина $R_{12н20}$ – это сопротивление двух фаз непропитанной обмотки при температуре $T=20$ °C; $T_{д12}$ – температура двух фаз непропитанной обмотки в момент подключения к ней стабилизированного тока; $T_{др12}$ – температура двух фаз непропитанной обмотки в момент времени t_0 её разогрева стабилизированным током; α – температурный коэффициент провода обмотки.

Вычтем $R_{д12}$ из $R_{др12}$ и, используя выражения (12) и (13), получим:

$$R_{др12} - R_{д12} = R_{12н20} [1 + \alpha(T_{др12} - 20)] - R_{12н20} [1 + \alpha(T_{д12} - 20)] = R_{12н20} \alpha (T_{др12} - T_{д12}). \quad (14)$$

Из выражения (14) следует

$$\Delta T_{д12} = T_{др12} - T_{д12} = \frac{R_{др12} - R_{д12}}{\alpha R_{12н20}}. \quad (15)$$

Величина $R_{12н20}$ в общем случае неизвестна, так как начальная температура обмотки $T_{д12}$ в момент начала измерения не равняется 20 °C и зависит от температуры окружающей среды в помещении, где производятся измерения, от технологической операции, с которой поступила обмотка на контроль и др., и может колебаться в широких пределах. Указанные колебания температуры могут привести к значительным погрешностям в определении коэффициентов пропитки. Чтобы исключить эти погрешности необходимо в момент начала контроля измерить указанную исходную температуру обмотки $T_{д12}$. Величину этой температуры можно узнать, измерив температуру магнитного сердечника, в который всыпана обмотка, до подачи в обмотку греющего тока. Если температура $T_{д12}$ измерена, то величину сопротивления $R_{12н20}$ двух фаз обмотки при температуре 20 °C можно определить по первоначальному измерению сопротивления $R_{д12}$ по выражению

$$R_{12н20} = \frac{R_{д12}}{1 + \alpha (T_{д12} - 20)}. \quad (16)$$

Подставив величину $R_{12н20}$ из выражения (16) в формулу (15), получим:

$$\Delta T_{д12} = \frac{(R_{др12} - R_{д12}) [1 + \alpha (T_{д12} - 20)]}{\alpha R_{д12}}. \quad (17)$$

Подставив в формулу (7) $Q_{д12}$ из выражения (11) и величину $\Delta T_{д12}$ из выражения (17), получим значение величины $C_{д12}$

$$C_{\text{дп12}} = \frac{\alpha t_0 I_0^2 R_{\text{д12}} (R_{\text{д12}} + R_{\text{дп12}})}{2(R_{\text{дп12}} - R_{\text{д12}})[1 + \alpha (T_{\text{д12}} - 20)]}. \quad (18)$$

Проведя аналогичные измерения у пропитанной обмотки, можно найти $C_{\text{п12}}$ по формуле

$$C_{\text{п12}} = \frac{\alpha t_0 I_0^2 R_{\text{п12}} (R_{\text{п12}} + R_{\text{дп12}})}{2(R_{\text{п12}} - R_{\text{д12}})[1 + \alpha (T_{\text{п12}} - 20)]}, \quad (19)$$

где $R_{\text{п12}}, R_{\text{д12}}$ – сопротивление двух фаз пропитанной обмотки в начальный момент времени разогрева и в момент времени t_0 ; $T_{\text{п12}}$ – исходная температура пропитанной обмотки в момент подключения к её двум фазам стабилизированного тока I_0 .

Используя выражение (6) и подставив в него значения эквивалентных теплоемкостей двух фаз обмотки до пропитки и после неё из формул (18) и (19), получим:

$$m_{12} = \frac{\alpha t_0 I_0^2}{2c} \left\{ \frac{R_{\text{п12}} (R_{\text{п12}} + R_{\text{дп12}})}{(R_{\text{дп12}} - R_{\text{п12}})[1 + \alpha (T_{\text{п}} - 20)]} - \frac{R_{\text{д12}} (R_{\text{д12}} + R_{\text{дп12}})}{(R_{\text{дп12}} - R_{\text{д12}})[1 + \alpha (T_{\text{д}} - 20)]} \right\}. \quad (20)$$

С использованием формул (2) и (3) найдем величину m_{012} :

$$m_{012} = d_c S_n l_w \left(1 - \frac{\pi}{4} K_f \right) \cdot \frac{P}{2}. \quad (21)$$

Подставив в формулу (1) значения m_{12} и m_{012} из выражений (20) и (21) получим:

$$K_{\text{п12}} = \frac{\alpha t_0 I_0^2}{pcd_c S_n l_w (1 - pK_f / 4)} \times \left\{ \frac{R_{\text{п12}} (R_{\text{п12}} + R_{\text{дп12}})}{(R_{\text{дп12}} - R_{\text{п12}})[1 + \alpha (T_{\text{п}} - 20)]} - \frac{R_{\text{д12}} (R_{\text{д12}} + R_{\text{дп12}})}{(R_{\text{дп12}} - R_{\text{д12}})[1 + \alpha (T_{\text{д}} - 20)]} \right\}. \quad (22)$$

Проведя аналогичные рассуждения, можно получить выражения для определения коэффициентов пропитки двух других пар фаз

$$K_{\text{п13}} = \frac{\alpha t_0 I_0^2}{pcd_c S_n l_w (1 - pK_f / 4)} \times \left\{ \frac{R_{\text{п13}} (R_{\text{п13}} + R_{\text{дп13}})}{(R_{\text{дп13}} - R_{\text{п13}})[1 + \alpha (T_{\text{п}} - 20)]} - \frac{R_{\text{д13}} (R_{\text{д13}} + R_{\text{дп13}})}{(R_{\text{дп13}} - R_{\text{д13}})[1 + \alpha (T_{\text{д}} - 20)]} \right\}. \quad (23)$$

$$K_{\text{п23}} = \frac{\alpha t_0 I_0^2}{pcd_c S_n l_w (1 - pK_f / 4)} \times \left\{ \frac{R_{\text{п23}} (R_{\text{п23}} + R_{\text{дп23}})}{(R_{\text{дп23}} - R_{\text{п23}})[1 + \alpha (T_{\text{п}} - 20)]} - \frac{R_{\text{д23}} (R_{\text{д23}} + R_{\text{дп23}})}{(R_{\text{дп23}} - R_{\text{д23}})[1 + \alpha (T_{\text{д}} - 20)]} \right\}. \quad (24)$$

Коэффициенты пропитки $K_{\text{п12}}, K_{\text{п13}}, K_{\text{п23}}$ – определенные по выражениям (22)–(24), являются среднестатистической характеристикой пропитки соответствующих двух фаз i -й обмотки, и их величины можно определить из выражений:

$$K_{\text{п12}} = \frac{K_{\text{п1}} + K_{\text{п2}}}{2}, \quad (25)$$

$$K_{\text{п13}} = \frac{K_{\text{п1}} + K_{\text{п3}}}{2}, \quad (26)$$

$$K_{\text{п23}} = \frac{K_{\text{п2}} + K_{\text{п3}}}{2}, \quad (27)$$

где $K_{\text{п1}}, K_{\text{п2}}, K_{\text{п3}}$ – коэффициенты пропитки фаз 1, 2 и 3. Решив систему уравнений (25)–(27) относительно коэффициентов пропитки фаз $K_{\text{п1}}, K_{\text{п2}}, K_{\text{п3}}$, получим:

$$K_{\text{п1}} = K_{\text{п12}} - K_{\text{п23}} + K_{\text{п13}}, \quad (28)$$

$$K_{\text{п2}} = K_{\text{п23}} - K_{\text{п13}} + K_{\text{п12}}, \quad (29)$$

$$K_{\text{п3}} = K_{\text{п13}} - K_{\text{п12}} + K_{\text{п23}}. \quad (30)$$

Используя выражения (28)–(30) можно определить насколько равномерно или не равномерно пропиточный состав распределился в процессе операций пропитки и сушки по фазам обмотки.

Практическая реализация предлагаемого способа

Структурная схема устройства, реализующего рассмотренный электротепловой способ, приведена на рис. 1.

Устройство содержит: собственно прибор КИР-1А, вычислительный блок (ВБ) и контактор. ВБ содержит микрокалькулятор (МК) со встроенным узлом сопряжения (УС) с прибором.

Прибор КИР-1А содержит следующие субблоки: стабилизатор тока (СТ), синхронизатор (С), схему защиты (СЗ), схему термостатирования и компенсации (СК), блок настройки компенсатора (БНК), аналого-цифровой преобразователь (АЦП), индикатор напряжения (ИН) и блоки питания (БП).

Прибор работает следующим образом. Заземленная обмотка статора подключается к прибору в качестве выходной нагрузки СТ, который преобразует выпрямленное напряжение отрицательной полярности в стабилизированный ток I_0 , величина которого задается опорным напряжением с БНК в соответствии с типом контролируемого двигателя. Напряжение обмотки $U_{\text{обм}}$ контролируемого статора поступает в СК, в состав которой входит узел термокомпенсации и вычитания. Схема термокомпенсации посредством датчика температуры (Д) преобразует температуру статора T_c в положительное или отрицательное напряжение термокомпенсации $U_{\text{тк}}$, которое пропорционально по величине отклонению температуры статора от температуры 20°C и имеет знак «+», если температура статора больше 20°C , и знак «-», если наоборот.

$$U_{\text{тк}} = I_0 R_n \alpha (T_c - 20), \quad (31)$$

где R_n – номинальное сопротивление обмотки при 20°C .

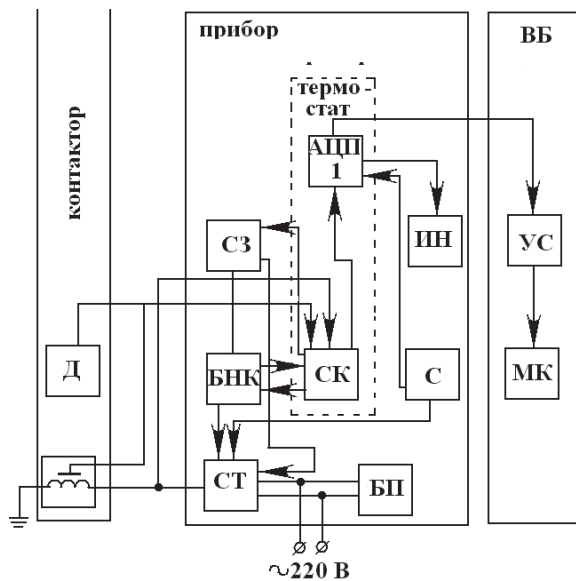


Рис. 1. Структурная схема прибора контроля пропитки

Fig. 1. Block diagram of impregnation control device

Схема вычитания в зависимости от типа двигателя формирует напряжение вычитания, знак которого противоположен знаку $U_{обм}$, а величина равна

$$U_b = I_0 \alpha (R_n - \Delta R), \quad (32)$$

где ΔR – допустимое отклонение сопротивления обмотки в сторону уменьшения при 20°C.

Вычитание постоянной составляющей осуществляется для обеспечения более точного измерения изменения напряжения в процессе нагрева. Схема компенсации включается с задержкой $t=0,25$ с и осуществляет суммирование напряжений обмотки, вычитания и термокомпенсации. Задержка суммирования предусмотрена с целью защиты входа сумматора от переходных процессов напряжения обмотки в момент включения стабилизатора тока.

$$U_k = U_{обм} + U_b + U_{тк}, \quad (33)$$

где величины U_b и $U_{тк}$ находятся по выражениям (31) и (32).

Результат суммирования поступает в АЦП1 и схему защиты, где его значение сравнивается с пороговыми значениями. При несоответствии сопротивления обмотки допустимым пределам СЗ отключает СТ и сигнализирует лампами «КЗ» или «Обрыв». Скомпенсированное напряжение U_k измеряется АЦП1 дважды: в момент времени $t=0,5$ с и $t=t_{онт}$, устанавливаемого переключателем «время опт». Результат измерения в параллельном двоично-десятичном коде поступает на индикатор напряжения ИН и с помощью соединительного кабеля в узел сопряжения ВБ на МК. Блок сопряжения преобразует его в последовательный десятичный код, вводит в микрокалькулятор МК и осуществляет старт программы ВБ, которая рассчитывает теплоемкость обмотки $C_{эвб}$ по формуле

$$C_{эвб} = \frac{I_0 t_0 [(U_b + U_{к1})(U_b + U_{к2})](U_b + U_{к1}) \alpha}{2(U_{к2} - U_{к1})}. \quad (34)$$

где $U_{к1}$, $U_{к2}$ – значения скомпенсированных напряжений в момент времени $t=0,5$ с и $t=t_{онт}$ соответственно. Эти величины рассчитываются по формуле (33).

Анализ погрешностей контроля

Результирующая погрешность электротеплового способа и прибора контроля коэффициента пропитки складывается из методических и инструментальных ошибок.

Абсолютная методическая погрешность обусловлена ошибкой определения эквивалентной теплоемкости обмотки по формулам (7), (18) и (19) и равна

$$\Delta C = C_t - C_{ист}, \quad (35)$$

где $C_{ист}$ – истинное значение эквивалентной теплоемкости обмотки, определяемое выражением (7), (18) или (19) для идеализированной обмотки; C_t – экспериментальное значение теплоемкости реальной обмотки, определяемое по выражению (34).

Методическая погрешность обусловлена неидеальностью обмотки и зависит от выбора времени измерения параметров обмотки при её контроле $t=t_{онт}$. Эта ошибка рассчитывается классическим методом с использованием электротепловой аналогии по электротепловым схемам идеализированной и реальной обмотки, подробно изложенным в работе [26]. При построении графиков использовались обмоточные данные статоров электродвигателя 4АМ80 при разогреве этой обмотки стабилизированным током $I_0=12,4$ А.

Величину постоянного стабилизированного тока выбирали исходя из допустимых плотностей тока j для медного провода, лежащих в диапазоне от 6 до 10 А/мм² [32, 33], и площади сечения провода.

При этом плотность тока 6 А/мм² считается нормальной плотностью, взятой с запасом, а плотность тока 10 А/мм² – это максимально допустимая плотность, которая пригодна только для кратковременной эксплуатации. В нашем случае при кратковременном воздействии постоянного стабилизированного тока I_0 на объект контроля (обмотку) целесообразно выбирать плотность тока, близкую к максимально допустимой, равной 10 А/мм². Это обусловлено тем, что, во-первых, воздействие тока на провод обмотки в процессе контроля пропитки кратковременно, и, во-вторых, тем, что чем выше плотность тока, тем быстрее происходит изменение температуры провода, что сокращает время контроля. Поэтому для разрабатываемого способа контроля качества пропитки обмоток электротехнических изделий следует обузить интервал плотностей тока до значений от 8 до 10 А/мм². Указанный выбранный интервал тока для контроля пропитки обмоток электротехнических изделий, изготовленных из медного провода, обусловлен следующими причинами. Плотность тока для медных проводов более 10 А/мм² недопустима. Значение плотностей тока меньше 8 А/мм² приводит к увеличению времени контроля и точности измерений коэффициентов пропитки. В данном конкрет-

ном случае площадь сечения медного провода контролируемой обмотки была равной 1,368 мм². Исходя из выбранного диапазона допустимых плотностей тока от 8 до 10 А/мм², значение постоянно стабилизированного тока I_0 должно лежать в диапазоне от 10,9 до 13,67 А. Нами был выбран ток, лежащий примерно в середине указанного диапазона и равный 12,4 А.

Инструментальная (аппаратурная) погрешность – это погрешность, принадлежащая средству измерения. Поскольку контроль теплоёмкости осуществляется косвенным путём по результатам измерений скомпенсированных напряжений $U_{к1}$ и $U_{к2}$, то задача расчета аппаратурной погрешности сводится к суммированию погрешностей измерения $U_{к1}$ и $U_{к2}$ с учетом их вклада в результирующую погрешность в зависимости от выражения (34).

$$\Delta C_a = C_{ид} \left(B_1 \frac{\Delta U_{к1}}{U_{к1}} + B_2 \frac{\Delta U_{к2}}{U_{к2}} \right), \quad (36)$$

где $C_{ид}$ – истинная теплоёмкость обмотки.

Для определения чувствительности ΔC_a к изменению погрешностей $\frac{\Delta U_{к1}}{U_{к1}}$, $\frac{\Delta U_{к2}}{U_{к2}}$ используем общий прием [34], заключающийся в определении частных производных по выражению (34)

$$B_1 = \frac{(4U_{выч} U_{к2} + 2U_{к2} U_{к1} + 2U_{выч}^2 - U_{к1}^2 + U_{к2}^2) U_{к1}}{\left[(U_{к2} - U_{к1}) \times \left(2U_{выч}^2 + 3U_{выч} U_{к1} + U_{выч} U_{к2} + U_{к2}^2 + U_{к1} U_{к2} \right) \right]}, \quad (37)$$

$$B_2 = \frac{2(U_{выч} + U_{к1}) U_{к2}}{(U_{к2} - U_{к1})(2U_{выч} + U_{к1} + U_{к2})}. \quad (38)$$

Так как в процессе нагрева обмотки её сопротивление увеличивается, скомпенсированное напряжение обмотки в режиме стабилизированного тока для моментов времени $t=0,5$ с и $t=t_{онт}$ будет определяться выражениями:

$$\Delta U_{к1} = I \Delta R, \quad (39)$$

$$\Delta U_{к2} = IR_n \{1 + \alpha [T(t-20)]\}. \quad (40)$$

Следовательно, коэффициенты B_1 и B_2 , входящие в выражение (36), в соответствии с величинами, определяемыми по формулам (37)–(40), зависят от времени контроля. Для определения факторов, связанных с погрешностями $\Delta U_{к1}$ и $\Delta U_{к2}$, проведём анализ структурной схемы прибора (рис. 1).

Погрешности подразделяются по окружающим условиям на основные и дополнительные, а по условиям их появления – на статические и динамические [34]. К числу основных статических погрешностей относятся несоответствия используемых по формуле (34) значений констант, которые определяются только типом контролируемого двигателя, и их действительных значений, зависящих от точности настройки: напряжения вычитания

$\Delta U_{выч}$, оптимального времени контроля $\Delta t_{онт}$ и напряжения термокомпенсации $\Delta U_{тк}$. Поскольку ток, напряжение вычитания и напряжение термокомпенсации задаются опорным напряжением, выставленным с помощью делителей, точность их настройки определяется разрешающей способностью подстроечных резисторов. Используя многооборотные резисторы типа СП5–3 с разрешающей способностью 9,3 % (по справочным данным) от номинального значения, мы добились следующей точности для контроля электродвигателя 4АМ80А4: $\Delta I_0 = 1,24 \cdot 10^{-4}$ А; $\Delta U_{выч} = -2,8 \cdot 10^{-3}$ В; $\Delta U_{тк} = 4,1 \cdot 10^{-4}$ В.

Точность отсчета оптимального времени контроля $t_{онт}$ с момента запуска прибора на измерение связана с нестабильностью тактовых импульсов, которые поступают с генератора, собранного на кварцевом резонаторе РВ-72 с частотой резонирования (3276810) Гц. Такая подстройка частоты осуществлялась переменным воздушным конденсатором. Количественная оценка погрешности генератора показала, что отклонение $\Delta t_{онт}$ настолько мало, что им, с учетом дальнейшего влияния на измеряемую величину, можно пренебречь. Указанные неточности настройки отдельных параметров прибора приводят к систематической погрешности в измерении скомпенсированного напряжения, определяемого выражением (34), согласно которому суммарная погрешность равна

$$\Delta U_{к} = I_0 R_n + \Delta U_{выч} + \Delta U_{тк}. \quad (41)$$

Основная динамическая погрешность прибора связана с запаздыванием процесса измерения скомпенсированного напряжения, поскольку используется АЦП последовательного типа.

Максимальная ошибка в измерении $U_{к}$ двенадцатирядным АЦП составит

$$\Delta K_{кд} = 2^{12} \frac{K_n}{f}, \quad (42)$$

где K_n – крутизна нарастания скомпенсированного напряжения по времени; $f=20$ кГц – частота тактового генератора АЦП. Количественная оценка динамической погрешности $\Delta U_{кд}$ по формуле (42) показывает, что она пренебрежительно мала.

Дополнительные погрешности возникают при отклонении условий работы прибора от номинальных. Поскольку прибор эксплуатируется в лабораторных или заводских условиях в стационарном положении, дополнительные погрешности определяются в основном климатическими условиями, параметрами внешних полей и параметрами режимов питания. Для устранения первых двух причин основные узлы прибора (ИОН, СК, АЦП) размещены в экранированный, термостатированный корпус.

Погрешность, связанная с нестабильностью источников питания, является мультипликативной и распределена по тому же закону, что и отклонения напряжения в сети. В данном случае основная погрешность вносится источником опорного напряжения, а погрешности, связанные с отклонениями

коэффициентов усиления напряжений смещения, незначительны. Например, колебания в сети в пределах $\pm 16\%$, с учетом коэффициентов стабилизации стабилизатора напряжения $K_{\text{стен}}=0,5\%$ и ИОН $K_{\text{стоп}}=0,02\%$, влекут за собой отклонение опорного напряжения на величину $\Delta U_{\text{оп}}=1,24 \cdot 10^{-3}$ В. Изменение $U_{\text{оп}}$ приводит к погрешности упомянутых параметров $I_0, U_{\text{в}}, U_{\text{тк}}: \Delta I_{0\text{д}}=4,78 \cdot 10^{-4}$ А; $\Delta U_{\text{вызд}}=6,8 \cdot 10^{-4}$ В; $\Delta U_{\text{ткд}}=1,3 \cdot 10^{-3}$ В. Поскольку перечисленные выше погрешности вызваны одной причиной, т. е. коррелированы между собой, суммирование их осуществляется также, как и в формуле (41), с учётом знака составляющей [34].

$$\Delta U_{\text{тд}} = \Delta I_{0\text{д}} \cdot R_{\text{н}} - \Delta U_{\text{вызд}} + \Delta U_{\text{ткд}}.$$

Таким образом, абсолютная погрешность измерения скомпенсированного напряжения будет складываться из основной и дополнительной погрешностей по их абсолютным величинам

$$\Delta U_{\text{к}} = \Delta U_{\text{ко}} + \Delta U_{\text{кд}}.$$

Результирующая погрешность определения теплоемкости обмотки является суммой методической и инструментальной погрешностей. При суммировании погрешностей следует учитывать два момента: методическая и аппаратная погрешности имеют зависимости от времени и мощности разогрева обмотки в процессе контроля; методическая погрешность является систематической погрешностью, а аппаратная – случайной.

Исходя из вышесказанного, результирующая погрешность в определении теплоемкости непропитанной обмотки $\Delta C_{\text{тд}}$

$$\Delta C_{\text{тд}} = \Delta C_{\text{тдм}} \pm \Delta C_{\text{тда}}, \quad (43)$$

а пропитанной $\Delta C_{\text{тп}}$

$$\Delta C_{\text{тп}} = \Delta C_{\text{тпм}} \pm \Delta C_{\text{тпа}}. \quad (44)$$

Входящие в правые стороны формул (45) и (46) величины определяются по формулам (35) и (36).

Погрешность определения массы состава в контролируемой обмотке $\Delta m_{\text{с}}$ рассчитывается согласно выражению (6) по формуле

$$\Delta m_{\text{с}} = \frac{\Delta \tilde{N}_{\text{тп}} - \Delta \tilde{N}_{\text{тд}}}{\tilde{n}_{\text{с}}}. \quad (45)$$

Однако необходимо учесть, что погрешности $\Delta C_{\text{тд}}$ и $\Delta C_{\text{тп}}$ находятся в некоторой полосе неопределенностей, границы которой описаны выражениями (43) и (44).

Для расчета методической и аппаратной погрешностей с использованием электротепловых схем замещения была составлена программа, основанная на анализе переходных тепловых процессов в идеализированных и реальных обмотках. Эта программа позволяла производить анализ методической, аппаратной и результирующей погрешностей, осуществлять определение величин (43), (44) и $t_{\text{отт}}$ для любых типов двигателей по их конструктивным и обмоточным данным. Абсолютная погрешность в измерении эквивалентной теплоемкости реальной обмотки, как до пропитки $\Delta C_{\text{тда}}$, так и после неё $\Delta C_{\text{тпа}}$ определяется классом точности измерителя температуры и вычисляется по

формулам

$$\Delta C_{\text{тда}} = \pm \left[A + B \frac{T_{\text{пр}}}{T_{\text{дн}}(t)} \right], \quad (46)$$

$$\Delta C_{\text{тпа}} = \pm \left[A + B \frac{T_{\text{пр}}}{T_{\text{пн}}(t)} \right], \quad (47)$$

где A и B – константы, определяемые классом точности измерителя температуры; $T_{\text{пр}}$ – предельное значение шкалы измерителя температуры; $T_{\text{дн}}$ и $T_{\text{пн}}$ – изменение температуры непропитанной и пропитанной обмотки в процессе их разогрева при контроле. Для определения аппаратной погрешности по выражениям (47) и (48) нужно задаться величинами A, B и $T_{\text{пр}}$. Предварительный анализ показал, что для обеспечения необходимой точности измерения величины $T_{\text{дн}}$ и $T_{\text{пн}}$ следует использовать измеритель сопротивления с пределом $R_{\text{пр}} \approx 0,1$ Ом. В пересчете на температуру предельная шкала измерителя составит

$$T_{\text{пр}} = \frac{R_{\text{пр}}}{2R_{\phi} \alpha_R},$$

где R_{ϕ} – номинальное сопротивление двух фаз обмотки; α_R^2 – температурный коэффициент сопротивления провода обмотки.

Для измерения приращения температуры в контролируемых обмотках был выбран цифровой вольтметр В-7-27. Он обеспечивает измерение сопротивления по постоянному току в диапазоне от 0,001 Ом до 20 МОм. По паспортным данным этого вольтметра $A=0,002, B=0,002$.

Зависимость результирующей погрешности определения эквивалентной теплоемкости, пропитанной (2) и непропитанной (1) теплоемкостей обмоток от времени их разогрева при контроле демонстрируют графики, приведенные на рис. 2.

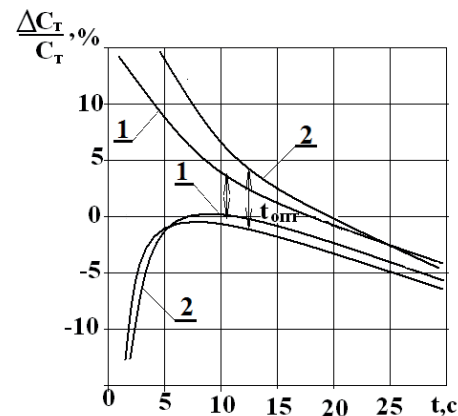


Рис. 2. Зависимость результирующей погрешности определения эквивалентной теплоемкости от времени измерения температуры обмотки

Fig. 2. Dependence of the resulting error of determining the equivalent heat capacity on the time of winding temperature measurement

Эти погрешности, так же как и аппаратные погрешности, находятся в некоторой полосе нео-

пределенностей. Очевидно, что оптимальным является такое время контроля, при котором результирующая погрешность минимальна по абсолютной величине независимо от знака погрешности. Таким временем $t_{\text{опт}}$ является время, от которого границы результирующей погрешности равноудалены. Результаты расчета относительной результирующей погрешности $K_{\text{пр}}$ межвитковых полостей обмотки двигателя 4AM80A4 при $t_{\text{опт}}=19$ с показали, что относительная погрешность не превышает 2,2 %.

Сравнение возможностей разработанного способа и прибора с методом контроля по привесу, предложенным Форкманном [35], осуществлялось по следующей методике.

В обмотки двух статоров электродвигателя вливалась строго дозированная, измеренная с помощью аналитических весов масса пропиточного состава, соответствующая коэффициентам пропитки $K_{\text{пр1}}=0,03$ и $K_{\text{пр2}}=0,6$. Относительная погрешность измерения при помощи прибора была равна, соответственно

$$\frac{\Delta K_{\text{пр1}}}{K_{\text{пр1}}} 100 \% = 1,6 \%, \quad \frac{\Delta K_{\text{пр2}}}{K_{\text{пр2}}} 100 \% = 0,9 \%$$

Так как погрешность измерения коэффициента пропитки складывается из аддитивных и мультипликативных ошибок, то в соответствии с [34] для приведенной погрешности $K_{\text{пр2}}=0,6$ можно записать

$$\gamma_s + \gamma_n + \gamma_k = \frac{\Delta K_{\text{пр2}}}{K_{\text{пр2}}}, \quad (48)$$

$$\gamma_s + \gamma_n \frac{0,06}{0,03} = \frac{\Delta K_{\text{пр2}}}{K_{\text{пр2}}}, \quad (49)$$

где $\gamma_n \frac{\Delta_0}{O_k} (X_k = K_{\text{пр2}})$ – приведенное значение погрешности в начале диапазона; Δ_0 – аддитивная погрешность; γ_s – мультипликативная погрешность. Из уравнений (48), (49) следует, что $\gamma_s=0,86$; $\gamma_n=0,037$, т. е. класс прибора в соответствии с ГОСТ8.401–80 можно оценить как (0,9/0,04).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курбатова О.А., Павлюченко В.М. Монтаж и ремонт горных машин и электрооборудования. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2004. – 286 с.
2. Колмаков Е.А., Кондрашов П.М., Зеньков И.В. Обзор конструкций фильтров в составе погружных электроцентробежных насосов при добыче нефти // Вестник КузГТУ. – 2016. – № 1. – С. 150–155.
3. Компьютерная система для функциональной диагностики электроприводов карьерных экскаваторов // В.Г. Каширских, А.Н. Гаргаев, В.М. Завьялов, И.Ю. Семькина // Вестник КузГТУ. – 2016. – № 6. – С. 159–168.
4. Русский Е.Ю. Анализ прочности роторов шахтных осевых вентиляторов // Вестник КузГТУ. – 2015. – № 2. – С. 31–34.
5. Герике П.Б. Определение дефектов динамического оборудования тяговых лебедок экскаваторов типа драглайн по параме-

Если взять весы того же класса точности, то погрешность определения ими массы пропиточного состава $m_c=60$ г в обмотке при массе статора с обмоткой электродвигателя 4AM80A4, равной $m_{\text{ст}}=6$ кг, при взвешивании его на весах с предельной шкалой $m_k=10$ кг, дает абсолютную погрешность, равную

$$\Delta m_{\text{ст}} = \left(\frac{\gamma_n}{100} m_k + \frac{\gamma_s}{100} m_{\text{ст}} \right) = \\ = \pm \left(\frac{0,04 \cdot 10^4}{100} + \frac{0,86 \cdot 10^3}{100} \right) = 55,6 \text{ г.}$$

Относительная погрешность определения массы пропиточного состава $m_c=60$ г весовым методом составит

$$\frac{\Delta m_{\text{ст}}}{m_c} \cdot 100 \% = \pm \frac{55,6}{60} \cdot 100 \% = \pm 92,7 \%$$

Таким образом, за счет исключения мощной помехи, которой является масса магнитного сердечника, в электротепловом способе контроля, путем создания в обмотке адиабатического процесса, точность определения коэффициента пропитки увеличена в сравнении с методом контроля по привесу [35] при одинаковом классе точности измерителей в 57 раз. Дополнительным преимуществом разработанного способа, по сравнению с методом контроля по привесу, является то, что он позволяет определить, как пропиточный состав распределится по фазам обмотки, чего невозможно сделать методом контроля по привесу.

Заключение

В результате проведенной работы был рассмотрен электротепловой способ контроля качества пропитки обмоток. Приведена структурная схема прибора, в котором реализован созданный метод контроля. Проведен анализ методических и аппаратных погрешностей разработанного способа и прибора контроля. Показано, что результирующая погрешность контроля находится в диапазоне (1,62,2) %.

грам механических колебаний // Вестник КузГТУ. – 2014. – № 1. – С. 21–26.

6. Смирнов Г.В. Ресурсосберегающая технология пропитки обмоток электротехнических и радиотехнических изделий // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2018. – № 4. – С. 31–45.
7. A new generation of aluminum enameled winding wires / T. Knych, A. Mamala, P. Uliasz, M. Jabłoński // Wire Journal International. – 2012. – V. 45. – № 1. – P. 55–61.
8. Gupta B. Risk in surge testing of turn insulation in windings of rotating machines // Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Technology Conference. – Chicago, June 2003. – P. 459–462.
9. A new generation of aluminum enameled winding wires / B. Smyrak, T. Knych, A. Mamala, P. Uliasz, M. Jabłoński // Wire Journal International. – 2012. – V. 45. – № 1. – P. 55–61.

10. PDIV characteristics of twisted-pair of magnet wires with repetitive impulse voltage / K. Kimura, S. Ushirone, T. Koyanagi, M. Hikita // IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Ins. – Chicago, June 2007. – V. 14. – № 3. – P. 744–750.
11. Chapman M., Frost N., Bruetsch R. Insulation systems for rotating low-voltage machines // IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Chicago, June 2008. – P. 257–260.
12. Accessing the insulation characteristics for stator windings of low-voltage induction motors for adjustable-speed drive applications / D. Hwang, K. Lee, Y. Kim, I. Lee, T. Lim, D. Kim // IEEE Industry Application Conference. Chicago, June 2003. – V. 1. – P. 432–438.
13. Electrical aging of the insulation of low voltage machines: model definition and test with the design of experiments / N. Lahoud, J. Faucher, D. Malec, P. Maussion // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2013. – V. 60. – № 5. – P. 60–67.
14. Leonov A.P., Redko V.V., Soldatenko E.Yu. Estimation of winding insulation resistance to the corona discharges // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2014. – V. 66. – P. 1–5.
15. PDIV characteristics of twisted-pair of magnet wires with repetitive impulse voltage / K. Kimura, S. Ushirone, T. Koyanagi, M. Hikita // IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Ins. – Chicago, June 2007. – V. 14. – № 3. – P. 744–750.
16. ГОСТ ИЕС 60851–5–2011. Провода обмоточные. Методы испытаний. Ч. 5. Электрические свойства. – М.: Стандартинформ, 2014. – 19 с.
17. Bellomo J.P., Castelan P., Lebey T. The effect of pulsed voltages on dielectric material properties // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 1999. – V. 6. – № 2. – P. 20–26.
18. Борисенко А.И., Костилов О.Н., Яковлев А.И. Охлаждение промышленных электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.
19. Смирнов Г.В. Магнитодиэлектрический состав, его свойства и применение в ресурсосберегающей технологии пропитки обмоток электротехнических изделий // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2018. – № 12. – С. 55–69.
20. A new generation of aluminum enameled winding wires / B. Smyrak, T. Knych, A. Mamala, P. Uliasz, M. Jabłoński // Wire Journal International. – 2012. – V. 45. – № 1. – P. 55–61.
21. Prasad A., Prasad K. Effective permittivity of random composite media: a comparative study // Physica. – 2007. – V. 396. – P. 132–137.
22. Похолков Ю.П., Бесперстов П.П., Пыхтин В.В. Исследование влияния технологического процесса изготовления обмоток на дефектность витковой изоляции асинхронных двигателей // Известия Томского политехнического института. – 1975. – Т. 222. – С. 52–65.
23. Кондратьева Н.Г., Кузнецов Н.А. Сравнительная оценка коэффициентов заполнения паза пропиточным составом, определенных различными методами // Технология электротехнического производства. – 1981. – № 12. – С. 14–16.
24. Дудкин А.Н. Разработка методов оценки технологического процесса пропитки обмоток асинхронных двигателей: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 1980. – 163 с.
25. Смирнов Г.В., Смирнов Д.Г. Ёмкостной контроль качества пропитки обмоток электрических машин общепромышленного применения. // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2018. – № 3. – С. 68–77.
26. Смирнов Г.В. Надежность изоляции обмоток электротехнических изделий. – Томск: Изд-во Томского государственного университета, 1990. – 192 с.
27. Frost N., Chapman M., Bruetsch R. Considerations for rotating low-voltage machine insulation designs // IEEE Insulation. – 2008. – P. 571–574.
28. A survey on testing and monitoring methods for stator insulation systems of low-voltage induction machines focusing on turn insulation problems / S. Grubic, J.M. Aller, B. Lu, T.G. Habetler // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2008. – V. 55. – № 12. – P. 4127–4134.
29. Halpem E.H. Interaction of varnish with magnet wire enamel // IEEE Transactions on Electrical Insulation. – 1967. – V. 2. – № 3. – P. 141–145.
30. Хомутов С.О., Кобозев Е.В., Семичевский П.И. Повышение эффективности восстановления изоляции электрических двигателей на основе комплексной оценки воздействующих факторов // Ползуновский вестник. – 2009. – № 1, 2. – С. 220–229.
31. Смирнов Г.В. Контроль качества проведения операций пропитки и сушки обмоток электродвигателей // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2018. – № 5. – С. 24–36.
32. Смирнов Г.В. Пооперационный контроль процесса изготовления обмоток электрических машин. – М.: Научно-техническое издательство «Горячая линия – Телеком», 2018. – 156 с.
33. Смирнов Г.В., Смирнов Д.Г. Способ определения коэффициента пропитки отверждаемым полимерным составом обмоток электрических машин: пат. РФ № 2521439; заявл. 25.10.2012; опубл. 27.06.2014, Бюл. № 18. – 22 с.
34. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. Отд-ние, 1985. – 248 с.
35. Forkmann H. Die resultierende wärmeleitfähigkeit getrankter Wicklungen aus Runddraht mit Lackisolation // Deutsche Elektrotechnik. – 1957. – H. 12. – Bd. 11. – P. 533–536.

Поступила 30.12.2018 г.

Информация об авторах

Смирнов Г.В., доктор технических наук, профессор, директор Научно-исследовательского института электронного технологического оборудования и систем связи Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

Ведяшкин М.В., кандидат технических наук, доцент отделения контроля и диагностики Инженерной школы неразрушающего контроля Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.313.04:621.315.61

CONTROL OF IMPREGNATION IS AN EFFECTIVE FACTOR IN INCREASING THE RELIABILITY OF MOTORS IN THE MINING, CONSTRUCTION AND OTHER INDUSTRIES

Gennady V. Smirnov¹,
smirnov@main.tusur.ru

Maxim V. Vedyashkin²,
vedyashkin@tpu.ru

¹ Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
40, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

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

Failure of the electric machine leads to emergencies, equipment downtime and, as a consequence, high economic costs to eliminate the results of machine failure. The failure of electrical machines at investigation, production and transportation of georesources in oil-extracting, mining, coal, chemical and other industries damages most of all the domestic economy. Reliability of these machines is determined by technological operations of impregnation and drying of windings. The most important qualitative characteristics of the windings are formed on these operations: electroinsulating, thermal, moisture resistant and mechanical. These properties depend on the degree of cavities filling of the winding with the impregnating composition. Low-quality impregnation of windings leads to the defects in the inter-coil insulation during storage and transportation of equipment to the place of operation. The development of quality control methods of windings impregnation is an actual problem.

The aim of the work is to show the possibility of controlling the distribution of the impregnating composition on the winding by measuring the heat capacity of the windings before and after impregnation.

Research methods: electrothermal and electromagnetic research methods, which are related to the measurement of thermal parameters of the winding and individual electrical quantities.

Results. The paper considers the electrothermal method of quality control of windings impregnation. Physical bases of quality control of impregnation are proved. The paper introduces the derivation of the main criteria of quality assessment for technological operations and the scheme of the control device. The authors considered the principle of its operation and analyzed the errors for the offered method of control.

Key words:

Winding, impregnating composition, control system, converter, heat capacity, resistance, time, generator, trigger, counter.

REFERENCES

- Kurbatov O.A., Pavlyuchenko V.M. *Montazh i remont gornykh mashin i elektrooborudovaniya* [Installation and repairing of mining machinery and electrical equipment]. Vladivostok, DVG TU Publ. house, 2004. 286 p.
- Kolmakov E.A., Kondrashov P.M., Zenkov I.V. Review of filter design in the composition of electrical submersible pumps in oil production. *Bulletin of KuzGTU*, 2016, no. 1, pp. 150–155. In Rus.
- Kashira V.G., Garaev A.N., Zavyalov V.M., Semykina I.Yu. Computer system for functional diagnostics of electric drives of quarry excavators. *Bulletin of KuzGTU*, 2016, no. 6, pp. 159–168. In Rus.
- Russian E.Y. The analysis of the strength of the rotor shaft of axial fans. *Bulletin of KuzGTU*, 2015, no. 2, pp. 31–34. In Rus.
- Gerik P.B. Defining defects of dynamic equipment, traction hoists excavators of the dragline type in the parameters of mechanical vibrations. *Bulletin of KuzGTU*, 2014, no. 1, pp. 21–26. In Rus.
- Smirnov G.V. Resource-saving technology of impregnation of windings of electrotechnical and radio engineering products. *Electrical Equipment: operation and repair*, 2018, no. 4, pp. 31–45. In Rus.
- Knych T., Mamala A., Uliasz P., Jabłoński M. A new generation of aluminum enameled winding wires. *Wire Journal International*, 2012, vol. 45, no. 1, pp. 55–61.
- Gupta B. Risk in surge testing of turn insulation in windings of rotating machines. *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Technology Conference*. Chicago, June 2003. pp. 459–462.
- Smyrak B., Knych T., Mamala A., Uliasz P., Jabłoński M. A new generation of aluminum enameled winding wires. *Wire Journal International*, 2012, vol. 45, no. 1, pp. 55–61.
- Kimura K., Ushirone S., Koyanagi T., Hikita M. PDIV characteristics of twisted-pair of magnet wires with repetitive impulse voltage. *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Ins.* Chicago, June 2007. Vol. 14, no. 3, pp. 744–750.
- Chapman M., Frost N., Bruetsch R. Insulation systems for rotating low-voltage machines. *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. Chicago, June 2008. pp. 257–260.
- Hwang D., Lee K., Kim Y., Lee I., Lim T., Kim D. Accessing the insulation characteristics for stator windings of low-voltage induction motors for adjustable-speed drive applications. *IEEE Industry Application Conference*. Chicago, June 2003. Vol. 1, pp. 432–438.
- Lahoud N., Faucher J., Malec D., Maussion P. Electrical aging of the insulation of low voltage machines: model definition and test with the design of experiments. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, vol. 60, no. 5, pp. 60–67.
- Leonov A.P., Redko V.V., Soldatenko E.Yu. Estimation of winding insulation resistance to the corona discharges. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2014, vol. 66, pp. 1–5.
- Kimura K., Ushirone S., Koyanagi T., Hikita M. PDIV characteristics of twisted-pair of magnet wires with repetitive impulse voltage. *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Ins.* Chicago, June 2007. Vol. 14, no. 3, pp. 744–750.

16. GOST IEC 60851–5-2011. *Provoda obmotochnye. Ch. 5. Elektricheskie svoystva* [State Standard IEC 60851–5-2011. Magnet wires. Test methods. P. 5. Electrical properties]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 19 p.
17. Bellomo J.P., Castelan P., Lebey T. The effect of pulsed voltages on dielectric material properties. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1999, vol. 6, no. 2, pp. 20–26.
18. Borisenko A., Kostikov O.N., Yakovlev A.I. *Okhlazhdenie promyshlennykh elektricheskikh mashin* [Cooling of industrial electric machines]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 296 p.
19. Smirnov G.V. Magnetodielectric composition, its properties and application in resource-saving technology of impregnation of windings of electrical products. *Electrical Equipment: operation and repair*, 2018, no. 12, pp. 55–69. In Rus.
20. Smyrak B., Knych T., Mamala A., Uliasz P., Jabłoński M. A new generation of aluminum enameled winding wires. *Wire Journal International*, 2012, vol. 45, no. 1, pp. 55–61.
21. Prasad A., Prasad K. Effective permittivity of random composite media: a comparative study. *Physica*, 2007, vol. 396, no. 11, pp. 132–137.
22. Pokholkov Yu.P., Besperstov P.P., Pykhtin V.V. Issledovanie vliyaniya tekhnologicheskogo protsessa izgotovleniya obmotok na defektnost vitkovoy izolyatsii asinkhronnykh dvigateley [Study of the influence of technological process of manufacturing the windings on the deficiency of turn insulation of induction motors]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic Institute*, 1975, vol. 222, pp. 52–65.
23. Kondrat'eva G.N., Kuznetsov I.N. Sravnitel'naya otsenka koeffitsientov zapolneniya paza propitochnym sostavom opredelennykh razlichnymi metodami [Comparative evaluation of the fill factor of the groove of the impregnating composition defined by different methods]. *Technology of electrical production*, 1981, no. 12, pp. 14–16.
24. Dudkin A.N. *Razrabotka metodov otsenki tekhnologicheskogo protsessa propitki obmotok asinkhronnykh dvigateley*. Dis. Kand. nauk [Development of methods for evaluating technological process of impregnation of the windings of induction motors. Cand. Diss.]. Tomsk. 1980. 163 p.
25. Smirnov G.V., Smirnov D.G. Capacitive method of quality control of impregnation of windings of electric motors of General industrial application. *Electrical Equipment: operation and repair*, 2018, no. 3, pp. 68–77. In Rus.
26. Smirnov G.V. *Nadezhnost izolyatsii obmotok elektrotekhnicheskikh izdeliy* [Reliability of winding insulation in electrical products]. Tomsk, Tomsk State University Press, 1990. 192 p.
27. Frost N., Chapman M., Bruetsch R. Considerations for rotating low-voltage machine insulation designs. *IEEE Insulation*, 2008, pp. 571–574.
28. Grubic S., Aller J.M., Lu B., Habetler T.G. A survey on testing and monitoring methods for stator insulation systems of low-voltage induction machines focusing on turn insulation problems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, vol. 55, no. 12, pp. 4127–4134.
29. Halpem E.H. Interaction of varnish with magnet wire enamel. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1967, vol. 2, no. 3, pp. 141–145.
30. Khomutov S.O., Kobozev E.V., Semichevsky P.I. Povyshenie effektivnosti vosstanovleniya izolyatsii elektricheskikh dvigateley na osnove kompleksnoy otsenki vosdeystvuyushikh faktorov [Improving the efficiency of recovery of insulation of electrical motors based on a comprehensive assessment of influencing factors]. *Polzunovskii bulletin*, 2009, no. 1–2, pp. 220–229.
31. Smirnov G.V. Quality control of impregnation and drying operations of electric motor windings. *Electrical Equipment: operation and repair*, 2018, no. 5, pp. 24–36. In Rus.
32. Smirnov G.V. *Pooperatsionny kontrol protsessa isgotovleniya obmotok elektricheskikh mashin* [Operational control of producing windings of electric machines]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ. house, 2018. 156 p.
33. Smirnov G.V., Smirnov D.G. *Sposob opredeleniya koeffitsienta propitki overzhdanym polimernym sostavom obmotok elektricheskikh mashin* [Method of determining the coefficient of winding impregnation with curable polymer composition in electrical machines]. Patent RF, no. 2521439, 2014.
34. Novitskiy P.V., Sograf I.A. *Otsenka pogreschnosti rezultatov ismereny* [Estimation of errors of measurement results]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1985. 248 p.
35. Forkmann H. Die resultierende warmeleitfähigkeit getrankter Wicklungen aus Runddraht mit Lackisolation [Speed of sealed winding made of round wire with paint insulation]. *German Electrical Engineering*, 1957, vol. 12, no. 11, pp. 533–536.

Received: 30 December 2018.

Information about the authors

Gennady V. Smirnov, Dr. Sc., professor, director of Research Institute of Electronic Production Equipment and Communication Means, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.

Maxim V. Vedyashkin, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 553.98:550.8:551.76:552.5(571.62)

ГЕОТЕРМИЯ И ОЦЕНКА НЕФТЕГАЗОВОГО ПОТЕНЦИАЛА БУРЕИНСКОГО БАССЕЙНА (ДАЛЬНИЙ ВОСТОК РОССИИ)

Прохорова Полина Николаевна¹,
prokhorova.polina1988@gmail.com

Развозжаева Елена Петровна²,
rep@itig.as.khb.ru

Исаев Валерий Иванович¹,
isaevvi@tpu.ru

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

² Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН,
Россия, 680000, г. Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, 65.

Актуальность. Буреинский осадочный бассейн – наиболее интересная в нефтегазоносном отношении межгорная впадина слабо-изученной материковой части Дальнего Востока России. Положительная оценка в отношении перспектив обнаружения в отложениях бассейна месторождений нефти и газа обоснована результатами ранее проведенных производственных и научных работ.

Цель: дальнейшая аргументация перспектив нефтегазоносности верхнеюрско-нижнемеловых отложений Буреинского бассейна на основе применения отечественного программного обеспечения бассейнового моделирования *TempoDialog*, обладающего оригинальными особенностями.

Объект: осадочные комплексы средне-верхнеюрский, верхнеюрско-нижнемеловой и меловой Кындальского грабена, наиболее хорошо изученной структуры в составе Буреинского краевого прогиба. Ранее проведенные исследования показали, что в процесс нефтегазообразования вовлечён весь юрско-меловой разрез Буреинского бассейна.

Методы. В комплексе *TempoDialog* реализован метод палеотемпературного моделирования, основанный на численном решении уравнения теплопроводности горизонтально-слоистого твердого тела с подвижной верхней границей. В математическую модель непосредственно включены климатический вековой ход температур на земной поверхности, как краевое условие, и палеотемпературы из определений отражательной способности витринита, как «наблюденные». Метод не требует априорных сведений о природе и величинах глубинного теплового потока, поток определяется решением обратной задачи геотермии в рамках параметрического описания седиментационной истории и истории теплофизических свойств осадочной толщи.

Результаты. Установлено, что геотермия грабена, начиная с юрского времени, благоприятствовала процессам генерации жидких углеводородов в породах осадочного чехла, которые могли начаться около 107 млн лет назад, в середине альба. Наиболее интенсивно нефтегенерация происходила в период 107–40 млн лет назад, до середины эоцена. Температурные условия генерации жидких углеводородов сохраняются для талынджанского очага. Наибольшая продолжительность температурных периодов, благоприятных для газообразования, наблюдается в чемчукинском очаге. Условия генерации газа сохраняются для ургальского и чагдомынского очагов. Результаты, полученные с использованием отечественной системы *TempoDialog* и ранее полученные в системе *PetroMod*, во многом совпадают. Названные системы характеризуются разными подходами к рассмотрению тектоно-седиментационных и термических условий генерации УВ. Поэтому результаты настоящих исследований являются дополнительной аргументацией положительных перспектив нефтегазоносности верхнеюрско-нижнемеловых отложений Буреинского бассейна.

Ключевые слова:

Верхнеюрско-нижнемеловые отложения, геотермический режим, очаги генерации углеводородов, Буреинский осадочный бассейн, Дальний Восток России.

Введение

Верхнебуреинская впадина (Буреинский осадочный бассейн) – одна из наиболее интересных в нефтегазоносном отношении межгорных впадин южной части материка в Дальневосточном регионе [1, 2].

Положительная оценка в отношении перспектив обнаружения в отложениях Буреинского бассейна месторождений нефти и газа обоснована результатами ранее проведенных работ по изучению его геологического строения, нефтегазоносности, газогеохимии и подземных вод [3].

В настоящее время при решении задач, связанных с прогнозом нефтегазоносности, широко применяется бассейновое моделирование [4–6]. Этот процесс можно разделить на две относительно независимые части: моделирование истории погру-

жения, тектоники, термического развития (первая часть) и моделирования процессов генерации, миграции, аккумуляции и сохранения углеводородов (УВ) в бассейне (вторая часть). Первая часть в зарубежной литературе определена термином «бассейновое моделирование» («basin modeling»), вторая – «моделирование углеводородных систем» («petroleum system modeling»). Можно придерживаться этой терминологии.

Количество генерированных УВ рассчитывается на основе реконструкции геотемпературного режима нефтематеринских отложений. На региональном этапе геологоразведочных работ технология бассейнового моделирования позволяет выделить очаги генерации УВ и проследить их динамику на протяжении эволюции бассейна. Существую-

щие на сегодняшний день программно-математические комплексы бассейнового моделирования (ГАЛА, Temis и др.) характеризуются разными подходами к рассмотрению тектоно-седиментационных и термических условий генерации УВ в бассейне [7, 8].

Первая и единственная оценка реализации генерационного потенциала нефтематеринских отложений Буреинского бассейна в пределах Кындальского грабена с помощью программного комплекса бассейнового моделирования представлена в работе [9]. Моделирование выполнено с применением программного обеспечения PetroMod 1D компании Шлюмберже.

Цель настоящей работы – дальнейшая аргументация перспектив нефтегазоносности верхнеюрско-нижнемеловых отложений Буреинского бассейна на основе применения отечественного программного обеспечения бассейнового моделирования ТеплоDialog, обладающего оригинальными пресловутыми особенностями.

Достижение поставленной цели осуществлялось путем решения следующих задач: 1) актуализация геолого-геофизических, геохимических и нефтегеологических данных в пределах Кындальского грабена; 2) одномерное моделирование глубинного теплового потока и термической истории потенциально нефтегазоматеринских свит; 3) выделение по геотемпературному критерию очагов генерации нефти и газа; 4) оценка времени и интенсивности реализации фаз нефте- и газообразования органическим веществом нефтегазоматеринских отложений.

О методике исследований

Оценка реализации генерационного потенциала нефтегазоматеринских пород в пределах Кындальского грабена выполнена с помощью комплекса ТеплоDialog. В комплексе реализован метод палеотемпературного моделирования, основанный на численном решении уравнения теплопроводности горизонтально-слоистого твердого тела с подвижной верхней границей [10]. Метод опирается на решение прямой задачи геотермии, как частный случай найденных решений для набора горизонтальных бесконечных плоскопараллельных слоев, расположенных в нижнем полупространстве [11].

Расчет палеотемператур состоит из двух этапов. На первом, по распределению температур «наблюденных» в скважине, рассчитывается тепловой поток через поверхность основания осадочного чехла, т. е. решается обратная задача геотермии. На втором этапе, с известным значением теплового потока, решаются прямые задачи геотермии – рассчитываются температуры в заданных точках осадочной толщи (в том числе в материнских отложениях) на заданные моменты геологического времени.

В математическую модель непосредственно включены палеотемпературы из определений

отражательной способности витринита (ОСВ), как «наблюденные». Для перехода от ОСВ к соответствующей геотемпературе используется диаграмма «Линии значений отражательной способности витринита, нанесенные на измененную схему Коннона» [12].

Отличия ТеплоDialog и PetroMod заключаются в разных подходах к определению граничных условий при моделировании тектонической и тепловой истории отложений осадочного бассейна.

Нижним граничным условием является значение теплового потока из основания бассейна осадконакопления. При моделировании в PetroMod предусматриваются переменные значения плотности теплового потока из основания осадочного чехла, определяемые на основе модели растяжения двухслойной литосферы Маккензи [13]. При палеотемпературном моделировании в ТеплоDialog предполагается квазипостоянство значения плотности теплового потока из основания. В ТеплоDialog глубинный тепловой поток определяется решением обратной задачи геотермии, в рамках параметрического описания седиментационной истории и истории теплофизических свойств только осадочной толщи, без привлечения сведений о геодинамике ниже основания осадочного разреза.

Верхнее граничное условие – вековой ход поверхностных температур на протяжении моделируемого отрезка истории развития бассейна. В отличие от ТеплоDialog, в котором используются экспериментальные данные о вековом ходе температур на земной поверхности [14, 15], в PetroMod реализован теоретический расчет поверхностных палеотемператур на основе значений палеошироты территории исследований, определяющей интенсивность соляного источника тепла [4].

В методическом подходе, использующем ТеплоDialog, применяется простой способ (экспериментальный интегральный показатель генерации УВ. Расчет реализуется следующим образом. Решение прямых задач геотермии выполняется на моменты геологического времени, включающие времена начала/завершения формирования каждой свиты, перекрывающей материнскую. Балансовая модель процессов нефтегазообразования [16] позволяет по геотемпературному критерию выполнить выделение очагов интенсивного образования УВ из рассеянного органического вещества (РОВ) материнских отложений. Далее для материнской свиты рассчитывается интегральный показатель плотности генерации углеводородов R [17]. Расчетное значение R напрямую зависит от времени нахождения материнской свиты в «верхней зоне газообразования» (ВЗГ), «главной зоне нефтеобразования» (ГЗН), «нижней зоне газообразования» (НЗГ) и от геотемператур этих зон. Применяемый подход позволяет кумулятивно учитывать динамику геотемператур материнских отложений и достаточно просто выполнять пространственно-временную локализацию очагов генерации УВ.

Краткая характеристика территории исследований

В строении осадочного чехла Буреинского бассейна принимают участие четыре комплекса: нижне-среднеюрский (дешская *ds*, синкальтинская *sn*, эпиканская *ep*, эльгинская *el* свиты), средне-верхнеюрский (чаганыйская *cg*, талынджанская *tl* свиты), верхнеюрско-нижнемеловой (ургальская *ur*, чагдамынская *cg*, чемчукинская *cm*, йорекская *ir* свиты) и меловой (кындальская *kn* свита и песчаниковая *ps* толща).

Кындальская грабен-синклинали является наиболее хорошо изученной структурой в составе Буреинского краевого прогиба (рис. 1).

Кындальский грабен расположен в центральной части Кындальской грабен-синклинали, имеет север-северовосточную протяженность, около 56 км в длину при максимальной ширине до 17 км. В целом осадочный разрез грабена представлен ритмичным переслаиванием песчаников, алевролитов, аргиллитов, реже конгломератов, с редкими пластами углей и прослоями туфов.

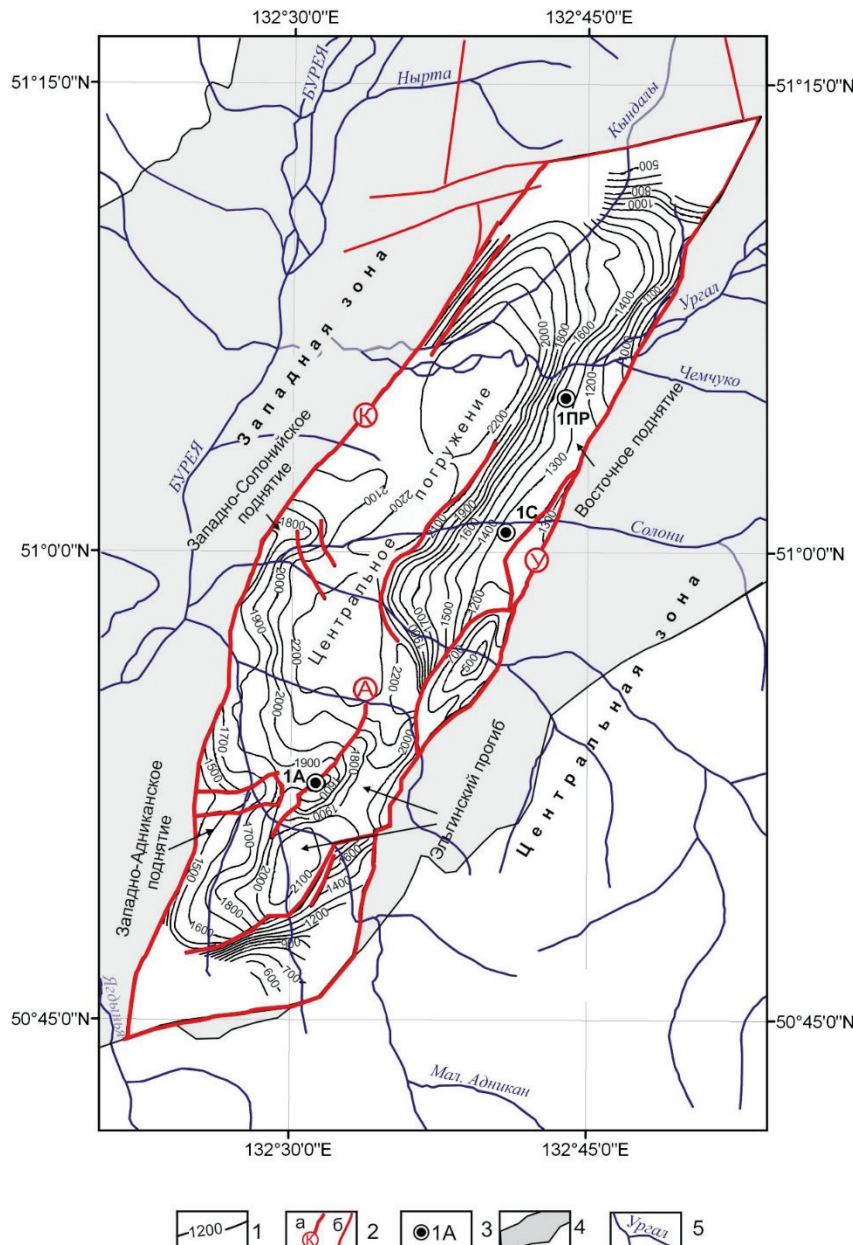


Рис. 1. Структурная схема Кындальского грабена (по подошве йорекской свиты): 1 – изоглубины подошвы йорекской свиты, м; 2 – разломы: а) главные и их буквенное обозначение (К – Кындальский, У – Ургальский, А – Адниканский), б) второстепенные; 3 – глубокие скважины, по которым проводилось моделирование; 4 – территория Кындальской грабен-синклинали; 5 – гидросеть

Fig. 1. Structure map of Kyndal graben (from the bottom of iorekskaya suite): 1 – isodepth of iorekskaya suite bottom, m; 2 – faults: а) main and their letter identification (К – Kindalskiy, У – Urgalskiy, А – Adnikanskiy), б) affluent; 3 – deep wells that were modeled; 4 – Kyndal Graben-synclinal area; 5 – hydrographic network

В период с 1965 по 1972 гг. в пределах Кындальского грабена проведено структурно-картировочное, параметрическое и поисковое бурение шести скважин, в том числе одной параметрической 1ПР на Восточном поднятии. Почти по всему осадочному разрезу были зафиксированы многочисленные проявления УВ, но промышленных скоплений не обнаружено. В 1980–1990 гг. пробурены две глубокие скважины: 1С в центральной части и 1А в его южной части грабена. В скважине 1А получены промышленные притоки газа, что послужило открытию Адниканского газового месторождения.

В 1990-х гг. в разрезе скважины 1А, вскрывшей чагдамынскую, чемчукинскую, йорекскую, кындальскую свиты и песчаниковую толщу, проведено детальное изучение литологии, фильтрационно-емкостных свойств пород и геохимии органического вещества. По результатам исследований выявлено, что в процесс нефтегазообразования вовлечён весь юрско-меловой разрез Буреинского осадочного бассейна, при этом исходное органическое вещество имеет преимущественно гумусовый состав [3].

Глубокие скважины 1А, 1С и 1ПР расположены соответственно в южной (Адниканская антиклинальная структура), центральной и северо-восточной (Восточное поднятие) частях грабена (рис. 1).

Далее приводятся краткие сведения о мощности вскрытого разреза, возрастной привязке, наличии размыва, измеренных значениях показателя ОСВ, а также результатах испытаний верхнеюрско-меловых пластов. Данные испытаний скважин 1А и 1С изучены и сведены из первичных «дел скважин» (материалы Хабаровского филиала ФБУ «Территориальный фонд геологической информации по Дальневосточному федеральному округу»), данные испытаний скважины 1ПР приняты из монографии [3], значения ОСВ ($R_{от}^0$) приняты из названной монографии.

Скважина 1А. На забое (2998 м) ургальская свита (J_3-K_1), вскрытая на глубине 2600 м. Фиксируется перерыв осадконакопления в раннем мелу, размыв поздне-меловых и палеоген-неогеновых отложений. Результаты испытаний кындальской свиты (K_{1-2}): 438–455 м, фонтанный газ, 53 тыс. м³/сут; 993–1010 м, газ, 82 тыс. м³/сут; 1118–1140 м, вода+растворенный газ, 11 м³/сут. Результаты испытаний йорекской свиты (K_1): 1202–1215 м, вода+растворенный газ, 7 м³/сут; 1218–1225 м, вода+растворенный газ, 7 м³/сут. Температуры, определенные по ОСВ: 1888 м, 99 °С ($R_{от}^0=0,64$); 2196 м, 114 °С ($R_{от}^0=0,75$).

Скважина 1С. На забое (3459 м) талынджанская свита (J_3), вскрытая на глубине 2863 м. Фиксируются перерывы осадконакопления в поздней юре и раннем мелу, размыв поздне-меловых и палеоген-неогеновых отложений. Результаты испытаний чемчукинской свиты (K_1): 1638–1649 м, слабогазированный фильтрат бурового раствора с пленкой нефти. Результаты испытаний ургальской свиты: 2680–2792 м, слабогазированный

фильтрат бурового раствора. Температуры, определенные по ОСВ: 1211 м, 83 °С ($R_{от}^0=0,52$); 1263 м, 83 °С ($R_{от}^0=0,52$); 1355 м, 84 °С ($R_{от}^0=0,53$).

Скважина 1ПР. На забое (3012 м) ургальская свита (J_3-K_1), вскрытая на глубине 2570 м. Фиксируется перерыв осадконакопления в раннем мелу, размыв поздне-меловых и палеоген-неогеновых отложений. Имели место повышенные газопоказатели при проходке кындальской, чемчукинской и чагдамынской свит. При проходке ургальской свиты в интервале 2720–3002 м наблюдались выбросы нефтено-метановой парафинистой нефти. Результаты испытаний ургальской свиты: 2941–2966 м, газ, 500 м³/сут.

Параметризация и моделирование

Палеорекострукции истории погружения и геотемператур выполнены для трех глубоких скважин: 1А, 1С и 1ПР Кындальского грабена (рис. 1). Пример параметризации тектоно-седиментационной истории и теплофизических свойств осадочного разреза показан в табл. 1.

Термическая история осадочных комплексов восстанавливалась на основе использования фактических данных об ОСВ. Отражательная способность витринита – природного максимального термометра, наиболее предпочтительна для восстановления тепловой истории отложений, так как отражает кумулятивный эффект воздействия температур на РОВ [19, 20].

Скважина 1А пересекает аллохтонный и автохтонный блоки Адниканского *надвига* на глубине около 1850 м. Предварительный анализ показал, что значения показателя ОСВ для отложений всяческого блока являются некондиционными. Для моделирования были отобраны значения показателя ОСВ, измеренные в образцах керна скважины с глубины ниже 1850 м.

Для скважины 1С для моделирования были выбраны значения показателя ОСВ по двум структурно-картировочным скважинам 14-ск и 16-ск, расположенным в аналогичных структурно-тектонических условиях.

Для скважины 1ПР измеренные значения показателя ОСВ отсутствуют. Построение модели геотемператур выполнялось на основе экстраполяции рассчитанных величин теплового потока, полученных в скважинах 1А и 1С.

Применение вариативности [21] сценариев тектоно-седиментационной истории и реконструкций геотермического режима осадочного разреза позволили количественно определить мощность денудации в меловое время (табл. 1).

Контроль результатов моделирования осуществлялся сопоставлением «измеренных» и расчетных геотемператур в скважинах (табл. 2). Среднеквадратические отклонения фактических значений от расчетных составили $\pm 2-3$ °С. Такие «невязки» оптимальны [22], т. к. «наблюдаемые» геотемпературы (ОСВ) имеют погрешность определения порядка ± 2 °С [10].

Таблица 1. Пример параметризации осадочной толщи для моделирования (скважина 1А)

Table 1. Example of parameterization of sedimentary strata for modeling (well 1A)

| Свита, толща (стратиграфия)* Suite, strata (stratigraphy)* | Мощность, м* Thickness, m* | Возраст, млн лет назад** Age, million years ago** | Время накопления, млн лет Time, million years | Плотность, г/см³*** Density, g/cm³*** | Теплопроводность, Вт/м·град Thermal conductivity, W/m·deg | Температуропроводность, м²/с Heat diffusivity, m²/s | Тепловыделение, Вт/м² Heat production, W/m² |
|---|-------------------------------|--|--|--|--|--|--|
| Квартер Quaternary system Q | 30 | 0–1,81 | 1,81 | 1,6 | 0,91 | 6,5e-007 | 1,1e-006 |
| Р ₁ -N ₂ | -200 | 1,8–61,7 | 59,89 | 1,9 | 1,17 | 6,5e-007 | 1,1e-006 |
| Песчаная Peschanaya p K ₂ -P ₁ | 480 | 61,7–70,6 | 8,9 | 1,9 | 1,17 | 6,5e-007 | 1,1e-006 |
| K ₂ | -1100 | 70,6–98,2 | 27,6 | 2,3 | 1,53 | 8e-007 | 1,25e-006 |
| Кындальская Kundalskaya kn K ₁₋₂ | 1990 | 98,2–108,4 | 10,2 | 2,3 | 1,53 | 8e-007 | 1,25e-006 |
| Йорекская Iorekskaya ir K ₁ | 437 | 108,4–116 | 7,6 | 2,5 | 1,69 | 8e-007 | 1,3e-006 |
| K ₁ | - | 116–118,2 | 2,2 | - | - | - | - |
| Чемчукинская Chemchukinskaya cm K ₁ | 581 | 118,2–127,5 | 9,3 | 2,5 | 1,69 | 8e-007 | 1,3e-006 |
| Чагдамынская Chagdaminskaya cg K ₁ | 382 | 127,5–136,4 | 8,9 | 2,58 | 1,76 | 8e-007 | 1,3e-006 |
| Ургальская Urgalskaya ur J ₃ -K ₁ | 398 | 136,4–150,8 | 14,4 | 2,52 | 1,71 | 8e-007 | 1,3e-006 |

* – данные литолого-стратиграфических разбивок взяты из монографии [3]; ** – в качестве основы использована Шкала геологического времени [18]; *** – плотность пород выделенных свит и толщ принята по материалам монографии [3]. Светло-серой заливкой показаны времена накопления потенциально нефтегазоматеринских свит и их параметрическое описание, серой – перерывы осадконакопления и размывы меловых и палеоген-неогеновых отложений.

* – the data of lithological and stratigraphic differentiation are taken from the monograph [3]; ** – the geological time Scale is used as a basis [18]; *** – the rock density of the selected suites and strata are taken from the monograph [3]. Light-gray fill shows the accumulation times of potentially oil and gas source suites and their parametric description, gray fill shows sedimentation breaks and erosion of Cretaceous and Paleogene-Neogene deposits

Таблица 2. Сопоставление измеренных и расчетных геотемператур в скважинах

Table 2. Comparison of measured and calculated temperatures in wells

| Глубина, м Depth, m | Измеренные температуры, °C Measured temperatures, °C | Способ измерения Measurement method | Расчетные температуры, °C Calculated temperatures, °C | Разница расчетных и измеренных температур, °C Difference between calculated and measured temperatures, °C |
|---|---|--|--|--|
| Скважина 1А/Well 1A | | | | |
| 1888 | 99 | по ОСВ | 102 | +3 |
| 2196 | 114 | | 111 | -3 |
| Среднеквадратическое отклонение («невязка»), °C Mean-square deviation («residual error»), °C | | | | ±3 |
| Расчетная плотность теплового потока, мВт/м² Calculated heat flow, mW/m² | | | | 49 |
| Скважина 1С/Well 1C | | | | |
| 1211 | 83 | по ОСВ | 81 | -2 |
| 1263 | 83 | | 83 | 0 |
| 1355 | 84 | | 86 | +2 |
| Среднеквадратическое отклонение («невязка»), °C Mean-square deviation («residual error»), °C | | | | ±2 |
| Расчетная плотность теплового потока, мВт/м² Calculated heat flow, mW/m² | | | | 45 |

Достоверность результатов моделирования, выполненного на скважинах 1А и 1С Кындальского грабена, подтверждается согласованностью полученных расчетных значений плотности теплового потока 45 и 49 мВт/м² (табл. 2) с порядком расчет-

ных значений плотности теплового потока на скважинах В1, Е1 и Е2 Переяславского грабена Среднеамурской впадины (48–56 мВт/м²) [23]. Результаты моделирования не противоречат трем значениям теплового потока, измеренным в пределах Буреинского бассейна (40, 56 и 90) мВт/м² [24], и диапазону значений теплового потока в бассейне Bide-Santang (46–59 мВт/м²) [25].

Результатирующие графики истории погружения и геотемператур осадочных комплексов Кындальского грабена представлены на рис. 2.

Интересно отметить кратковременное, но характерное охлаждение осадочного разреза, начинающая с 108 млн лет назад (пиковое «провисание» изотерм, рис. 2), обусловленное как высокой скоростью накопления кындальской свиты, так и ее последующей мощной денудацией.

Рассеянное органическое вещество (РОВ) изучаемых осадочных комплексов преимущественно гумусового типа, поэтому нижняя температурная граница вхождения в верхнюю зону газообразования (ВЗГ) принята 60 °C, в главную зону нефтеобразования (ГЗН) – 95 °C, в нижнюю зону газообразования (НЗГ) – 130 °C.

В соответствии с температурной градиацией зон интенсивной генерации УВ, используя полученную табличную базу термической истории свит и ее графическое представление (рис. 2), проведена оценка степени реализации генерационного потенциала талынджанской, ургальской, чагдамынской, чемчукинской и йорекской свит. Выполнена

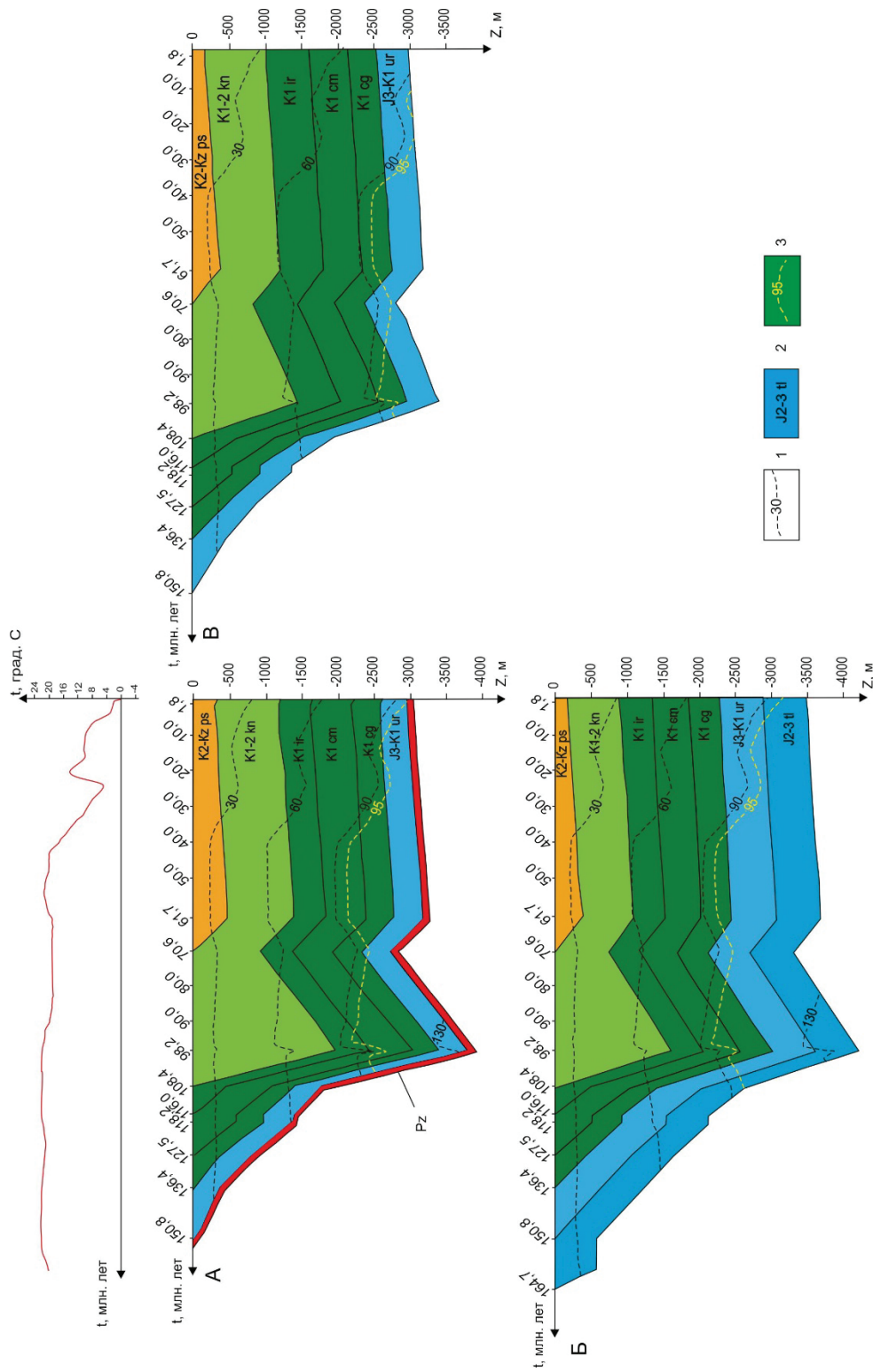


Рис. 2. Палеогеографическая реконструкция тектонической и тепловой истории в разрезах скважин: А – 1А, Б – 1С, В – 1ПР. 1 – изотермы, °С; 2 – стратиграфическая приуроченность отложений; 3 – изотерма пороговой температуры ГЭН. В верхней части рисунка (А) приведен график палеоклиматического векового хода температур на земной поверхности

Fig. 2. Paleogeographic reconstruction of tectonic and thermal history in well sections: А – 1А, Б – 1С, В – 1ПР. 1 – isotherms, °С; 2 – stratigraphic confinement of sediments; 3 – isotherm of threshold temperature of main oil window. The upper part of the figure (А) shows a graph of the paleoclimatic secular trend of temperatures on the earth surface

экспресс-оценка плотности генерации УВ – рассчитан интегральный показатель R .

Результаты исследований

Сводные данные экспресс-оценки по интегральному температурно-временному показателю генерации УВ (R) талынджанской, ургальской, чагдамынской, чемчукинской и йорекской свит приведены в табл. 3.

Анализ истории погружения и геотемператур (рис. 2), интегральных оценок генерации нефти и газа (табл. 3) показывает, что на протяжении истории погружения Буреинского бассейна в пределах Кындалского грабена генерация УВ могла происходить в талынджанской, ургальской, чагдамынской, чемчукинской и йорекской свитах. Кындальская свита за всю свою историю практически не

входила в ГЗН, лишь эпизодически, незначительно, подошвой достигала верхов ВЗГ.

Около 126,0 млн лет назад породы талынджанской свиты вошли в ВЗГ. Благоприятные геотемпературные условия для генерации нефти отложениями талынджанской свиты (ГЗН) наступили 107 млн лет назад. Затем, начиная с 98,2 млн лет назад, свита вошла в НЗГ. Результаты расчетов свидетельствуют о том, что с 87,5 млн лет назад по настоящее время в отложениях талынджанской свиты генерируется нефть (ГЗН).

Около 114,0–112,0 млн лет назад породы ургальской свиты вошли в ВЗГ. Затем, приблизительно 103,0–101,0 млн лет назад, ургальская свита достигла ГЗН. Наибольшая длительность фазы генерации нефти ургальской свитой наблюдается в районе скважины 1А, где отложения продолжали

Таблица 3. Экспресс-оценка генерации углеводородов (температурно-временные интервалы ВЗГ, НЗГ и ГЗН)

Table 3. Rapid assessment of hydrocarbon generation (temperature and time intervals of upper gas formation zone, lower gas formation zone and main oil generation zone)

| Потенциально материнская свита Potentially source suite | Экспресс-расчет плотности генерации газа (R), усл. ед Rapid calculation of gas generation density, c.u. | Период работы палеоочага генерации газа, млн лет назад; максимальные геотемпературы, °C Working period of gas paleokitchen, million years ago; the maximum geotemperatures, °C | Время работы палеоочагов генерации газа, млн лет Working time of gas paleokitchen, million years | Экспресс-расчет плотности генерации нефти (R), усл. ед Rapid calculation of oil generation density, c.u. | Период работы палеоочага генерации нефти, млн лет назад; максимальные геотемпературы, °C Working period of oil paleokitchen, million years ago; maximum geotemperatures, °C | Время работы палеоочагов генерации нефти, млн лет Working time of oil paleokitchen, million years |
|--|--|---|---|---|--|--|
| Скважина 1А/Well 1A | | | | | | |
| Ургальская Urgalskaya | 17 | 112,0–103,0; 94 96,0–94,0; 132(НЗГ) 6,0–0,0; 94 | 17 | 128 | 103,0–96,0; 130 94,0–6,0; 120 | 96 |
| Чагдамынская Chagdaminskaya | 47 | 107,0–102,0; 83 77,5–67,0; 92 35,0–0,0; 94 | 50 | 63 | 102,0–77,5; 121 67,0–35,0; 107 | 56 |
| Чемчукинская Chemchukinskaya | 87 | 105,0–99,0; 93 87,5–0,0; 93 | 94 | 12 | 99,0–87,5; 107 | 12 |
| Йорекская Iorekskaya | 60 | 103,0–74,0; 91 71,0–28,0; 78 | 72 | – | – | – |
| Скважина 1С/Well 1C | | | | | | |
| Талынджанская Talindzhanskaya | 31 | 126,0–107,0; 87 98,2–87,5; 139(НЗГ) | 30 | 125 | 107,0–98,2; 130 87,5–0,0; 130 | 96 |
| Ургальская Urgalskaya | 42 | 114,0–103,0; 92 71,0–69,0; 94 32,0–0,0; 94 | 45 | 80 | 103,0–71,0; 123 69,0–32,0; 110 | 69 |
| Чагдамынская Chagdaminskaya | 72 | 107,0–101,0; 87 84,5–61,7; 94 48,0–0,0; 94 | 77 | 31 | 101,0–84,5; 109 61,7–48,0; 95 | 30 |
| Чемчукинская Chemchukinskaya | 93 | 105,0–7,0; 95 | 98 | – | – | – |
| Йорекская Iorekskaya | 40 | 102,0–77,5; 86 65,0–36,0; 67 | 54 | – | – | – |
| Скважина 1П/Well 1PR | | | | | | |
| Ургальская Urgalskaya | 50 | 112,0–101,0; 92 76,0–68,0; 94 35,0–0,0; 94 | 54 | 62 | 101,0–76,0; 109 68,0–35,0; 106 | 58 |
| Чагдамынская Chagdaminskaya | 80 | 107,0–99,0; 89 91,0–62,0; 94 48,0–0,0; 94 | 85 | 21 | 99,0–91,0; 98 62,0–48,0; 96 | 22 |
| Чемчукинская Chemchukinskaya | 88 | 105,0–3,0; 86 | 102 | – | – | – |
| Йорекская Iorekskaya | 37 | 101,0–80,0; 71 67,0–35,0; 69 | 53 | – | – | – |

генерировать нефть в период с 103 до 6 млн лет назад. Раньше ургальская свита вышла из ГЗН в районе скважины 1ПР, около 35 млн лет назад. В районе скважины 1С главная фаза нефтегенерации ургальской свитой завершилась 32 млн лет назад. *В настоящее время отложения ургальской свиты в пределах территории исследований являются газопроизводящими (ВЗГ).*

Около 107,0 млн лет назад *чагдамынская* свита вошла в ВЗГ. Благоприятные условия для генерации нефти отложениями чагдамынской свиты сформировались приблизительно 102–99 млн лет назад. Затем, около 91,0–77,5 млн лет назад, под влиянием тектонического (общее воздымание территории и последующий размыв) и палеоклиматического факторов, чагдамынская свита вышла из ГЗН. Вторая волна входа в ГЗН, обусловленная нарастанием мощности перекрывающей осадочной толщи, наступила приблизительно 69–62 млн лет назад. Раньше чагдамынская свита вышла из «нефтяного окна» в районе скважин 1ПР и 1С, около 48 млн лет назад. В районе скважины 1А главная фаза нефтегенерации отложениями чагдамынской свиты завершилась 35 млн лет назад. *В настоящее время породы чагдамынской свиты в пределах территории исследований являются газопроизводящими.*

Около 105,0 млн лет назад *чемчукинская* свита вошла в ВЗГ. В период 99,0–87,5 млн лет назад в районе скважины 1А отложения чемчукинской свиты генерировали нефть (ГЗН). Фаза нефтеобразования в отложениях чемчукинской свиты в районе скважин 1С и 1ПР места не имела. Приблизительно 105,0–87,5 млн лет назад чемчукинская свита начала генерировать газ. Раньше чемчукинская свита вышла из ВЗГ в районе скважины 1С, 7 млн лет назад. В районе скважины 1ПР фаза газообразования завершилась 3 млн лет назад. В настоящее время в районе скважины 1А отложения чемчукинской свиты продолжают генерировать газ.

Около 103,0–101,0 млн лет назад отложения *йорекской* свиты достигли температуры 60 °С (ВЗГ). Затем, около 80,0–74,0 млн лет назад, йорекская свита вышла из ВЗГ. Вторая волна входа в ВЗГ наступила приблизительно 71–65 млн лет назад. Раньше йорекская свита вышла из ВЗГ в районе скважин 1С и 1ПР, около 36–35 млн лет назад. Наибольшая длительность фазы генерации газа йорекской свитой наблюдается в районе скважины 1А, где отложения продолжали генерировать газ в период с 71 до 28 млн лет назад.

Обсуждение результатов

Наибольшая продолжительность фазы нефтеобразования (ГЗН) в Кындалском грабене наблюдается в *талынджанском* очаге генерации нефти – 96 млн лет, очаг характеризуется максимальным значением плотности генерации нефти – $R=125$ усл. ед (табл. 3). Соизмеримо долго, по геотемпературному критерию, «работает» в пределах

грабена *ургальский* очаг генерации нефти, продолжительностью от 58 до 96 млн лет, $R=62–128$ усл. ед. Продолжительность фазы генерации жидких УВ чагдамынским очагом составила от 22 до 56 млн лет, $R=21–63$ усл. ед. Вклад в генерацию нефти *чемчукинским* очагом мал, продолжительность генерации жидких УВ – 12 млн лет, $R=12$ усл. ед. На сегодняшний день геотемпературные условия генерации жидких УВ сохраняются для *талынджанского* очага.

Наибольшая фаза газообразования (ВЗГ) наблюдается в *чемчукинском* очаге генерации – от 94 до 102 млн лет, очаг характеризуется максимальным значением плотности генерации газа – $R=87–93$ усл. ед. Продолжительность периодов газогенерации, выделенных по геотемпературному критерию, *чагдамынским, йорекским и ургальским* очагами составила 50–85 млн лет ($R=47–80$), 53–72 млн лет ($R=37–60$) и 17–54 млн лет ($R=17–50$), соответственно. Вклад в генерацию газа *талынджанским* очагом невелик, продолжительность периода газообразования 30 млн лет, $R=31$ усл. ед.

Вероятность очагов генерации УВ, выделенных по геотемпературному критерию, не противоречит результатам испытаний глубоких скважин на исследуемой территории. Непромышленные притоки нефти получены при испытании *ургальской свиты*, плёнки нефти – при испытании *чемчукинской свиты*.

Повышенные газопоказания зафиксированы при испытании *чемчукинской, чагдамынской и ургальской* свит. По данным бурения скважины 1А получен промышленный приток газа из *кындальской* свиты. Вполне вероятно, что углеводороды, генерируемые нижнемеловыми комплексами, могли мигрировать и аккумулировать в тектонически экранированных ловушках, образовавшихся во фронте Адниканского *надвига* (рис. 1).

Сопоставительным анализом результатов настоящей работы, выполненной с использованием *российского* комплекса палеотемпературного моделирования ТеплоDialog, с предшествующей оценкой территории исследований, выполненной ранее с применением *импортной системы* PetroMod, установлено, что термический режим прогнозируемых очагов генерации УВ (продолжительность периодов нефте- и газообразования, максимальные температуры периодов интенсивной генерации нефти и газа) отличается несущественно. Для примера сопоставления ниже представлена оценка термического режима очагов генерации УВ в районе скважины 1А, полученная ранее с использованием системы PetroMod [9].

Для отложений *ургальской* свиты: период ВЗГ – 128–110 млн лет назад; периоды ГЗН – 110–100 млн лет назад, с 91 млн лет назад по настоящее время; период НЗГ – 100–91 млн лет назад.

Для отложений *чагдамынской* свиты: периоды ВЗГ – 119–106 млн лет назад, 75–67 млн лет на-

зад, с 35 млн лет назад по настоящее время; периоды ГЗН – 106–75 млн лет назад, 67–35 млн лет назад.

Для отложений *чемчукинской* свиты: периоды ВЗГ – 110–100 млн лет назад; с 85 млн лет назад по настоящее время; период ГЗН – 100–85 млн лет назад.

Для отложений *йорекской* свиты: период ВЗГ – 105–20 млн лет назад. Фаза нефтеобразования места не имела.

Если провести сопоставление результатов *ТермоDialog* и *PetroMod* по всем трем скважинам (1А, 1С и 1ПР), то перечни выделенных по геотемпературному критерию очагов генерации нефти (*талынджанский, ургальский, чагдомынский*) и очагов газогенерации (*ургальский, чагдомынский, чемчукинский, йорекский*) полностью совпадают.

Заметное отличие результатов моделирования *ТермоDialog* и *PetroMod* состоит в том, что в системе *PetroMod* получены периоды ВЗГ и НЗГ более широкие. По-видимому, это обусловлено разными подходами к определению граничных условий при моделировании тектонической и тепловой истории отложений осадочного бассейна, о чем говорилось в разделах введения и методики исследований. Вместе с тем, можно отметить, что рассчитанные в *ТермоDialog* значения плотности глубинного теплового потока (45–49 мВт/м²) согласуются со значениями современной плотности теплового потока, полученными с помощью *PetroMod* (48–49 мВт/м²).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маргулис Л.С. Нефтегазоперспективные толщи Дальнего Востока России // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2012. – Т. 7. – № 4. URL: http://www.ngtp.ru/rub/2/65_2012.pdf (дата обращения 01.08.2018)
2. Razvozhayeva E.P., Kirillova G.L., Prokhorova P.N. Comparative analysis of fragments of the Mesozoic East Asian continental margin: The Kyndal (Bureya Basin, Russia) and Suibin (Sanjiang Basin, China) Troughs // Russian Journal of Pacific Geology. – 2014. – V. 8. – № 6. – P. 404–422.
3. Осадочные бассейны Востока России. Т. 4. Буреинский осадочный бассейн: геолого-геофизическая характеристика, геодинамика, топливно-энергетические ресурсы / гл. ред. А.И. Ханчук, отв. ред. Г.Л. Кириллова. – Владивосток: Дальнаука, 2012. – 360 с.
4. Hantschel T., Kauerauf A.I. Fundamentals of basin and petroleum systems modeling. – Heidelberg: Springer, 2009. – 476 p.
5. Galushkin Yu. Non-standard Problems in Basin Modelling. – Switzerland: Springer, 2016. – 274 p.
6. Reconstruction of the Cenozoic History of Hydrocarbon Fluids from Rifting Stage to Passive Continental Margin Stage in the Huizhou Sag, the Pearl River Mouth Basin / Yajun Li, Shu Jiang, Zhenglong Jiang, Hao Liu and Bingxi Li // Geofluids. – 2017. – UNSP 4358985. – 32 p.
7. Galushkin Yu.I., Sitar K.A., Kunitsyna A.V. Numerical modeling of the organic matter transformation in the sedimentary rocks of the northeastern Sakhalin shelf // Oceanology. – 2011. – V. 51. – № 3. – P. 491–501.
8. Historical-geological modeling of hydrocarbon generation in the mesozoic–cenozoic sedimentary basin of the Kara sea (basin modeling) / A.E. Kontorovich, L.M. Burshtein, N.A. Malyshev,

Выводы

1. Геотермия Кындальского грабена, начиная с юрского времени, благоприятствовала процессам генерации жидких углеводородов в породах осадочного чехла, которые могли начаться около 107 млн лет назад, в середине альба. Наиболее интенсивно нефтегенерация происходила в период 107–40 млн лет назад, до середины эоцена. На сегодняшний день температурные условия генерации жидких углеводородов сохраняются для *талынджанского* очага.
2. Наибольшая продолжительность температурных периодов, благоприятных для газообразования, наблюдается в *чемчукинском* очаге. В настоящее время условия генерации газа сохраняются для *ургальского* и *чагдомынского* очагов.
3. Результаты выделения по геотемпературному критерию очагов генерации нефти и очагов газогенерации, полученные с использованием систем *ТермоDialog* и *PetroMod*, во многом и в основном совпадают.
4. Названные системы характеризуются *разными* подходами к рассмотрению тектоно-седиментационных и термических условий генерации УВ. Поэтому результаты настоящих исследований являются дополнительной аргументацией положительных перспектив нефтегазоносности верхнеюрско-нижнемеловых отложений Буреинского бассейна.

- P.I. Safronov, S.A. Gus'kov, S.V. Ershov, V.A. Kazanenkov, N.S. Kim, V.A. Kontorovich, E.A. Kostyreva, V.N. Melenevsky, V.R. Livshits, A.A. Polyakov, M.B. Skvortsov // Russian Geology and Geophysics. – 2013. – V. 54. – № 8. – P. 1179–1226.
9. Razvozhayeva E.P., Prokhorova P.N., Lapkovskii V.V. Numerical Modeling of the Tectonic and Thermal History of the Kyndal Graben of the Bureya Basin (Far East of Russia) // Russian Journal of Pacific Geology. – 2017. – V. 11. – № 3. – P. 205–222.
10. Mesozoic–Cenozoic Climate and Neotectonic Events as Factors in Reconstructing the Thermal History of the Source-Rock Bazhenov Formation, Arctic Region, West Siberia, by the Example of the Yamal Peninsula / V.I. Isaev, A.A. Iskorkina, G.A. Lobova, V.I. Starostenko, S.A. Tikhotskii, A.N. Fomin // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. – 2018. – V. 54. – № 2. – P. 310–329.
11. Generalization of the Rayleigh-Tikhonov stationary geothermal problem for a horizontal layer / V.I. Starostenko, R.I. Kutas, V.N. Shuman, O.V. Legostaeva // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. – 2006. – V. 42. – № 12. – P. 1044–1050.
12. Хант Дж. Геохимия и геология нефти и газа. – М.: Мир, 1982. – 704 с.
13. Royden L., Keen C.E. Rifting process and thermal evolution of the continental margin of eastern Canada determined from subsidence curves // Earth and Planet. Sci. Letters. – 1980. – V. 51. – P. 342–361.
14. Геотермия арктических морей / М.Д. Хуторской, В.Р. Ахмедзянов, А.В. Ермаков, Ю.Г. Леонов, Л.В. Подгорных, Б.Г. Поляк, Е.А. Сухих, Л.А. Цыбуля. – М.: ГЕОС, 2013. – 232 с.
15. Искоркина А.А. Палеоклиматические факторы реконструкции термической истории нефтематеринской баженовской свиты арктического региона Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 8. – С. 59–73.

16. Модель катагенеза органического вещества (на примере баженовской свиты) / Л.М. Бурштейн, Л.В. Жидкова, А.Э. Конторович, В.Н. Меленевский // Геология и геофизика. – 1997. – Т. 38. – № 6. – С. 1070–1078.
17. Лобова Г.А., Попов С.А., Фомин А.Н. Локализация прогнозных ресурсов нефти юрско-меловых НПК Усть-Тымской мегападины // Нефтяное хозяйство. – 2013. – № 2. – С. 36–40.
18. Шкала геологического времени / У.Б. Харленд, А.В. Кокс, П.Г. Ллевеллин, К.А.Г. Пиктон, А.Г. Смит, Р. Уолтерс. – М.: Мир, 1985. – 140 с.
19. Yalcin M.N., Littke R., Sachsenhofer R.F. Thermal history of sedimentary basins. – Berlin: Springer Verlag, 1997. – 167 p.
20. Фомин А.Н. Катагенез органического вещества и нефтегазонасыщенность мезозойских и палеозойских отложений Западно-Сибирского мегабассейна. – Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2011. – 331 с.
21. Тектоно-седиментационная интерпретация данных геотермии при выявлении и оценке позднеэоценовой эрозии на арктических месторождениях углеводородов (п-ва Ямал) / В.И. Исаев, В.И. Старостенко, Г.А. Лобова, А.Н. Фомин, А.К. Исагалиева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 7. – С. 19–31.
22. Strakhov V.N., Golizdra G.Ya., Starostenko V.I. Theory and practice of interpreting potential fields: Evolution in the 20th century // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. – 2000. – V. 36. – № 9. – P. 742–762.
23. Estimation of the Oil-and-Gas Potential of Sedimentary Depression in the Far East and West Siberia Based on Gravimetry and Geothermy Data / R.Yu. Gulenok, V.I. Isaev, V.Yu. Kosygin, G.A. Lobova, V.I. Starostenko // Russian Journal of Pacific Geology. – 2011. – V. 5. – № 4. – P. 273–287.
24. Thermal structure of lithosphere in Central Asian and Pacific belts and their adjacent cratons, from data of geoscience transects / P.Yu. Gornov, M.V. Goroshko, Yu.F. Malyshev, V.Ya. Podgornyi // Russian Geology and Geophysics. – 2009. – V. 50. – № 5. – P. 485–499.
25. Guo C., Qin Y., Lu L. Terrestrial heat flow and geothermal field characteristics in the Bide-Santang basin, western Guizhou, South China // Energy Exploration & Exploitation. – 2018. – V. 36. – № 5. – P. 1114–1135.

Поступила 31.10.2018 г.

Информация об авторах

Прохорова П.Н., аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Развозжаева Е.П., кандидат геолого-минералогических наук, заведующая лабораторией тектоники осадочных бассейнов Института тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН.

Исаев В.И., доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 553.98:550.8:551.76:552.5(571.62)

GEOTHERMY AND ESTIMATION OF HYDROCARBON POTENTIAL OF THE BUREYA BASIN (RUSSIAN FAR EAST)

Polina N. Prokhorova¹,
prokhorova.polina1988@gmail.com

Elena P. Razvozhayeva²,
rep@itig.as.khb.ru

Valeriy I. Isaev¹,
isaevvi@tpu.ru

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

² Institute of Tectonics and Geophysics named after Yu.A. Kosygin,
65, Kim Y. Chen street, Khabarovsk, 680000, Russia.

The relevance. The Bureya sedimentary basin is the most interesting in respect of oil and gas intermountain basin of frontier mainland of Russian Far East. An upbeat assessment of prospects of oil and gas field discovery in the basin is proved by the results of previous prospecting work and scientific research.

The aim of this paper is further argumentation of hydrocarbon prospects of upper Jurassic-lower Cretaceous deposits in the Bureya basin based on the use of domestic basin modeling software *TeplDialog*, having original features.

Study object is middle-upper Jurassic, upper Jurassic-lower Cretaceous and Cretaceous sedimentary sequences of the Kyndal graben, the most studied structure in the Bureya fore deep. The previous investigations have revealed that the whole Jurassic-Cretaceous section of the Bureya basin is involved in oil-and-gas formation.

Methods. In the software *TeplDialog* the paleotemperature modeling method is implemented based on the numerical solution of heat-transfer equation of a horizontally layered solid with a movable upper boundary. Mathematical model includes climatological secular trend of temperatures on the earth surface (boundary condition) and paleotemperatures from vitrinite reflectance evaluation (observational). The method does not require a priori information about the nature and magnitude of the deep heat flow, the heat flow is determined by the solution of the geothermal inversion within the framework of parametric description of the sedimentation history and the history of the thermophysical properties of sedimentary strata.

Results. The study found that geothermy of graben since Jura permitted formation of liquid hydrocarbons in the sedimentary cover rocks, which could begin about 107 million years ago, in the middle of the Alb. The most intensive oil generation took place in the period of 107–40 million years ago, until the middle of the Eocene. Temperature conditions for the generation of liquid hydrocarbons are still the same for talyndzhansky kitchen. Maximal duration of temperature periods, favourable for gas formation is observed in chemcukinsky kitchen. The conditions for gas generation are still the same for urgalsky and chegdomynsky kitchens. The results obtained using the domestic software *TeplDialog* and previously obtained in software *PetroMod*, strongly aligned. These computer programs are characterized by different approaches to consideration of tectonic-sedimentation and thermal conditions of hydrocarbon generation. Therefore, the results of this study are an additional argument for the positive prospects of oil and gas potential of the upper Jurassic-lower Cretaceous deposits of the Bureya basin.

Key words:

Upper Jurassic-lower Cretaceous deposits, geothermal mode, hydrocarbon kitchens, Bureya sedimentary basin, Russian Far East.

REFERENCES

1. Margulis L.S. Oil and gas prospective strata of Russian far East. *Oil and gas geology. Theory and practice*, 2012, vol. 7, no. 4. In Rus. Available at: http://www.ngtp.ru/rub/2/65_2012.pdf (accessed 1 August 2018).
2. Razvozhayeva E.P., Kirillova G.L., Prokhorova P.N. Comparative analysis of fragments of the Mesozoic East Asian continental margin: The Kyndal (Bureya Basin, Russia) and Suibin (Sanjiang Basin, China) Troughs. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2014, vol. 8, no. 6, pp. 404–422.
3. *Osadochnye bassejny Vostoka Rossii. Vol. 4. Burejnskiy osadochny bassejn: geologo-geofizicheskaya kharakteristika, geodinamika, toplivno-energeticheskie resursy* [Series «Sedimentary basins of East Russia». Vol. 4. The Bureya sedimentary basin: geological-geophysical characteristics, geodynamics, and fuel and energy resources]. Editor-in-chief academician A.I. Khanchuk, ed. by G.L. Kirillova. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2012. 360 p.
4. Hantschel T., Kauerauf A.I. *Fundamentals of basin and petroleum systems modeling*. Heidelberg, Springer, 2009. 476 p.
5. Galushkin Yu. *Non-standard Problems in Basin Modelling*. Switzerland, Springer, 2016. 274 p.
6. Yajun Li, Shu Jiang, Zhenglong Jiang, Hao Liu and Bingxi Li. Reconstruction of the Cenozoic History of Hydrocarbon Fluids from Rifting Stage to Passive Continental Margin Stage in the Huizhou Sag, the Pearl River Mouth Basin. *Geofluids*, 2017. UNSP 4358985. 32 p.
7. Galushkin Yu.I., Sitar K.A., Kunitsyna A.V. Numerical modeling of the organic matter transformation in the sedimentary rocks of the northeastern Sakhalin shelf. *Oceanology*, 2011, vol. 51, no. 3, pp. 491–501.
8. Kontorovich A.E., Burshtein L.M., Malyshev N.A., Safronov P.I., Gus'kov S.A., Ershov S.V., Kazanenkov V.A., Kim N.S., Kontorovich V.A., Kostyreva E.A., Melenevsky V.N., Livshits V.R., Polyakov A.A., Skvortsov M.B. Historical-geological modeling of hydrocarbon generation in the mesozoic-cenozoic sedimentary basin of the Kara sea (basin modeling). *Russian Geology and Geophysics*, 2013, vol. 54, no. 8, pp. 1179–1226.
9. Razvozhayeva E.P., Prokhorova P.N., Lapkovskii V.V. Numerical Modeling of the Tectonic and Thermal History of the Kyndal

- Graben of the Bureya Basin (Far East of Russia). *Russian Journal of Pacific Geology*, 2017, vol. 11, no. 3, pp. 205–222.
10. Isaev V.I., Iskorkina A.A., Lobova G.A., Starostenko V.I., Tikhotskii S.A., Fomin A.N. Mesozoic–Cenozoic Climate and Neotectonic Events as Factors in Reconstructing the Thermal History of the Source-Rock Bazhenov Formation, Arctic Region, West Siberia, by the Example of the Yamal Peninsula. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2018, vol. 54, no. 2, pp. 310–329.
 11. Starostenko V.I., Kutas R.I., Shuman V.N., Legostaeva O.V. Generalization of the Rayleigh-Tikhonov stationary geothermal problem for a horizontal layer. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2006, vol. 42, no. 12, pp. 1044–1050.
 12. Khant Dzh. *Geokhimiya i geologiya nefti i gaza* [Geochemistry and geology of oil and gas]. Moscow, Mir Publ., 1982. 704 p.
 13. Royden L., Keen C.E. Rifting process and thermal evolution of the continental margin of eastern Canada determined from subsidence curves. *Earth and Planet. Sci. Letters*, 1980, vol. 51, pp. 342–361.
 14. Khutorskoy M.D., Akhmedzyanov V.R., Ermakov A.V., Leonov Yu.G., Podgornykh L.V., Polyak B.G., Sukhikh E.A., Tsybulya L.A. *Geotermiya arkticheskikh morey* [Geochemistry of the Arctic seas]. Moscow, GEOS Publ., 2013. 232 p.
 15. Iskorkina A.A. Paleoclimate factors of reconstructing thermal history of the petromaternal bazhenov suite of the Arctic region in Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 8, pp. 59–73. In Rus.
 16. Burshteyn L.M., Zhidkova L.V., Kontorovich A.E., Melenevskiy V.N. Model of organic matter catagenesis (on the example of Bazhenov formation). *Geology and Geophysics*, 1997, vol. 38, no. 6, pp. 1070–1078. In Rus.
 17. Lobova G.A., Popov S.A., Fomin A.N. Localization of predicted oil resources in the Jurassic and Cretaceous hydrocarbon play of Ust'-Tym megadepression. *Oil Industry*, 2013, no. 2, pp. 36–40. In Rus.
 18. Kharlend U.B., Koks A.V., Llevellin P.G., Pikton K.A.G., Smit A.G., Uolters R. *Shkala geologicheskogo vremeni* [Geologic time scale]. Moscow, Mir Publ., 1985. 140 p.
 19. Yalcin M.N., Littke R., Sachsenhofer R.F. *Thermal history of sedimentary basins*. Berlin, Springer Verlag, 1997. 167 p.
 20. Fomin A.N. *Katagenez organicheskogo veshchestva i neftegazonosnost mezozoysskikh i paleozoysskikh otlozheniy Zapadno-Sibirskogo megabasseyna* [Organic matter catagenesis and petroleum potential of Mesozoic and Paleozoic deposits of the West Siberian megabasin]. Novosibirsk, IPGG SB RAS Publ., 2011. 331 p.
 21. Isaev V.I., Starostenko V.I., Lobova G.A., Fomin A.N., Isagalieva A.K. Tectonic-sedimentation interpretation of the geothermics data when identifying and assessing the late Eocene erosion on the Arctic hydrocarbon fields (Yamal peninsula). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 7, pp. 19–31. In Rus.
 22. Strakhov V.N., Golizdra G.Ya., Starostenko V.I. Theory and practice of interpreting potential fields: Evolution in the 20th century. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2000, vol. 36, no. 9, pp. 742–762.
 23. Gulenok R.Yu., Isaev V.I., Kosygin V.Yu., Lobova G.A., Starostenko V.I. Estimation of the Oil-and-Gas Potential of Sedimentary Depression in the Far East and West Siberia Based on Gravimetry and Geothermy Data. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2011, vol. 5, no. 4, pp. 273–287.
 24. Gornov P.Yu., Goroshko M.V., Malyshev Yu.F., Podgorniy V.Ya. Thermal structure of lithosphere in Central Asian and Pacific belts and their adjacent cratons, from data of geoscience transects. *Russian Geology and Geophysics*, 2009, vol. 50, no. 5, pp. 485–499.
 25. Guo C., Qin Y., Lu L. Terrestrial heat flow and geothermal field characteristics in the Bide-Santang basin, western Guizhou, South China. *Energy Exploration & Exploitation*, 2018, vol. 36, no. 5, pp. 1114–1135.

Received: 31 October 2018.

Information about the authors

Polina N. Prokhorova, postgraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

Elena P. Razvozzhaeva, Cand. Sc., head of the Laboratory of Sedimentary Basin Tectonics, Institute of Tectonics and Geophysics named after Yu.A. Kosygin.

Valeriy I. Isaev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 552.578.2.061.1.08(571.16)

ЛИТОЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КОЛЛЕКТОРОВ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ НА ЮГО-ВОСТОКЕ ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ПРОВИНЦИИ (ТОМСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Недоливко Наталья Михайловна¹,
nedolivko@tpu.ru

Перевертайло Татьяна Геннадьевна¹,
ptg@tpu.ru

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

Актуальность исследования продиктована необходимостью расширения ресурсной базы Западно-Сибирского региона, в том числе и Томской области, за счет вовлечения в разработку трудноизвлекаемых запасов нефти, сосредоточенных в нефтематеринской баженовской свите (титон-берриасс).

Цель исследования: выявить особенности литологического состава и строения баженовского резервуара на прогнозно-перспективной для добычи нефти территории Томской области.

Объект исследования: битуминозные отложения баженовской свиты, вскрытые бурением на локальном поднятии в Тамратской впадине (Нюрольский осадочный бассейн), Пудинский нефтегазоносный район Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции (Томская область), из которых получен приток нефти.

Методы: геофизические исследования, макрокопическое описание керна, петрографический и рентгенофазовый анализы.

Результаты. В продуктивном разрезе баженовской свиты выявлены границы распространения разуплотненных пород – коллекторов нефти и газа. Приведена их литологическая характеристика, установлены текстурно-структурные особенности и вещественный состав. Выделено семь литотипов: 1 – алеврито-силицитовые аргиллиты со следами жизнедеятельности илоядных животных и трубчатými раковинами; 2 – битуминозные силицито-аргиллиты с кремнистыми прослойками и остатками кремниевых водорослей; 3 – битуминозные силициты глинистые радиоляриевые; 4 – битуминозные силициты радиоляриевые с трубчатыми раковинами и кремнистыми прослойками; 5 – битуминозные аргиллиты силицитовые радиоляриевые со следами биотурбации и остатками криноидей; 6 – силицит-аргиллиты радиоляриевые с остатками водорослей; 7 – силицит-глинисто-карбонатные породы. Выяснено, что накопление осадков баженовской свиты осуществлялось при стабильно низкодинамичном застойном режиме седиментации в относительно глубоководных морских условиях восстановительной геохимической среды. Установлена связь минерального состава и содержания сапропелевого органического вещества с трансгрессивно-регрессивной цикличностью осадконакопления: наиболее обогащен кремнистым материалом и органическим веществом литотип 4, максимальное количество этих компонентов приходится на точку инверсии трансгрессивно-регрессивного цикла. Баженовский коллектор имеет смешанное происхождение, формировался при стадийном литогенезе (седиментогенез-катагенез) и постстадийных процессах. Пустотное пространство в нем представлено ультратонкими биопустотами и порами, межслоевыми и внутрислоевыми трещинами

Ключевые слова:

Нюрольский осадочный бассейн, Западная Сибирь, Томская область, титон-берриасс, баженовская свита, битуминозные аргиллиты, нефтематеринские породы, литотип, коллектор.

Введение

Проблемы поиска, разведки и добычи углеводородов из нетрадиционных коллекторов – низкопроницаемых битуминозных сланцев – в последние годы вызывают повышенный интерес. Этот интерес обусловлен огромными разведанными запасами углеводородного сырья, сосредоточенного в недрах России, США, Канады, Китая, Аргентины, Израиля, Ирана, Индии и других стран, а также огромными затратами, связанными с его извлечением.

Термин «сланец» носит собирательный характер и в действительности объединяет породы различного литологического состава: глинистые и кремнистые породы, доломиты, известняки, мергели и др. породы, имеющие различное происхождение и характеризующиеся даже в пределах одного месторождения большой вертикальной и латеральной изменчивостью. Например, широко известные сланцы Bakken и Exshaw play (США и Канада) состоят из переслаивания плотных долами-

тов, алевролитов, песчаников, сланцев и карбонатных коллекторов [1].

По условиям седиментации битуминозные сланцы могут быть морскими [2, 3] и озерными [3, 4] образованиями, что определяет литологический облик ассоциации сланцевых пород и их пространственную локализацию.

Поэтому разработка технологий добычи сланцевой нефти должна учитывать, прежде всего, происхождение, состав и свойства пород, вмещающих углеводороды.

В России перспективы добычи сланцевой нефти связываются с отложениями баженовской свиты (титон-берриас), сформированными в относительно глубоководных морских условиях. Они представляют собой уникальный геологический объект, простираясь на обширной (около 1 млн км²) территории Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции и характеризуюсь высоким (около 14 %) содержанием органического вещества, находящегося в твердом (около 12 %) и жидком (до 2,7 %) состоянии.

состояниях, соответственно в виде недозревшей – керогена II типа – и легкой извлекаемой нефти [5, 6]. Обладая низкими фильтрационно-емкостными свойствами, свита по промысловым характеристикам относится к разряду низкопроницаемых коллекторов, а запасы нефти, сосредоточенные в ней, – к трудноизвлекаемым.

В Томской области в связи с высокой выработкой нефти в традиционных юрских и меловых коллекторах, представленных алевролитами и песчаниками, вовлечение в разработку ресурсов баженовской нефти является одним из острых вопросов нефтегазодобывающей промышленности. Наличие жидких углеводородов в баженовской свите доказано на целом ряде месторождений Томской области (Снежном, Западно-Квензерском, Южно-Фестивальном). Наиболее перспективной территорией для обнаружения залежей нефти в баженовской свите является район Нюрольской впадины [7]. Согласно исследованиям И.В. Гончарова и др. [8, 9], Конторовича А.Э. и др. [10], породы баженовской свиты здесь обладают отличным генерационным потенциалом, среднее содержание органического углерода (Сорг) в них составляет 5...13 %. Вместе с тем промышленная нефтегазоносность отложений баженовской свиты на территории исследования не была установлена, причиной чему могут быть как особенности пород самой баженовской свиты, так и несовершенство применяемых технологий добычи сланцевой нефти. Выяснению литологических особенностей баженовского коллектора, содержащего трудноизвлекаемую нефть, и посвящена настоящая работа.

Объект исследования

Объект исследования – битуминозные отложения баженовской свиты, вскрытые бурением на одной из площадей, в тектоническом плане приуроченной к одноименному локальному поднятию на северо-востоке Тамратской впадины (юго-восток Нюрольского осадочного бассейна). В административном отношении территория располагается в Каргасокском районе Томской области, согласно принятому нефтегазогеологическому районированию, относится к Пудинскому нефтегазоносному району Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции. В одной из скважин после проведения гидроразрыва пласта был получен приток нефти.

Фактический материал и методы исследования

Выполнено макроскопическое описание керна; проведен петрографический анализ 28 шлифов (Шл.), отобранных в 2 скважинах (скв.) в интервале глубин (Гл.) 3118...3145 м (скв. 1) и 2788...2815 м (скв. 2) с использованием поляризационного микроскопа POLAM L-213M (изготовитель АО «ЛОМО», г. Санкт-Петербург); изучен фазовый состав пород (47 образцов) на рентгеновском дифрактометре GBC MMA 011. Сочетание этих методов позволяет установить особенности строения и состава пород и провести их систематизацию.

Результаты исследований

Отложения баженовской свиты толщиной 27 м согласно залегают на глинистых морских породах георгиевской свиты ($J_3 km_{gr}$), имеющих толщину 3,90...4,6 м и перекрывающих регионально продуктивный горизонт Ю₁. Вверх по разрезу баженовская свита постепенно сменяется морскими глинистыми отложениями куломзинской свиты ($K_1 b_{kl}$) толщиной около 40 м.

Согласно макроскопическому описанию керна, разрез сложен битуминозными аргиллитами темно-серыми с бурым оттенком и буровато-черными, однородными, тонкоплитчатыми с ровным и раковистым изломом и листоватыми с неотчетливой горизонтальной, пологоволнистой и линзовидной слоистостью за счет прослоев и послойно уплотненных линз карбонатного, фосфатного и кремнистого состава. В аргиллитах встречаются ростры и онихиты белемнитов, створки пелеципод, иногда трубчатые раковины (в диаметре до 1,5 мм). В нижней и верхней частях разреза в породах присутствуют следы жизнедеятельности типа *Chondrites*, принадлежащие мелким донным илюдным организмам. Повсеместно развита тонкая рассеянная и послойная сыпь, кристаллы и мелкие конкреционные стяжения пирита. В разрезе отмечается чередование плотных и дезинтегрированных пород, разбитых трещинами различной ориентировки на разноразмерные куски. Породы обладают сильным запахом, напоминающим запах керосина, поверхность их жирная на ощупь, на пальцах остается масляный след.

По результатам рентгенофазового анализа, минеральными компонентами изученных пород являются кварц – 12,1...66,7 %, альбит – 9,2...19,2 %, ортоклаз – 0,7...8,3 %; мусковит – 7,6...18,8 %, иллит – 4,4...13,9 %, хлорит – 0,9...6,9 %, каолинит – 0,9...3,7 %, анкерит – 0,5...4,6 % (иногда до 64,8 %), кальцит – 0,5...10 % (в единичных образцах до 17,6 и 47,6 %), пирит – 2,1...13,8 %. В отдельных пробах альбит, ортоклаз, хлорит, иллит, каолинит, мусковит, анкерит и кальцит отсутствуют. Содержание глинистого материала, к которому отнесены тонкодисперсные полевые шпаты, а также слюды и собственно глинистые минералы (хлорит, иллит, каолинит) в породах составляет от 18,9 до 61,9 %.

Аргиллиты характеризуются (рис. 1) высокими значениями электрического сопротивления на кривых бокового каротажа (LLD); слабо дифференцированной кривой самопроизвольной поляризации (PS), имеющей, в отличие от большинства разрезов баженовской свиты, отрицательное отклонение (что, согласно макроскопическому описанию керна, отвечает трещиноватым аргиллитам). Для них характерны высокие значения нейтрон-гамма каротажа (CFTC), отражающие низкое водосодержание и очень высокие значения гамма-каротажа (GR), обусловленные высокой радиоактивностью пород за счет содержания радиоактивных изотопов в глинистых (полевых шпатах, слю-

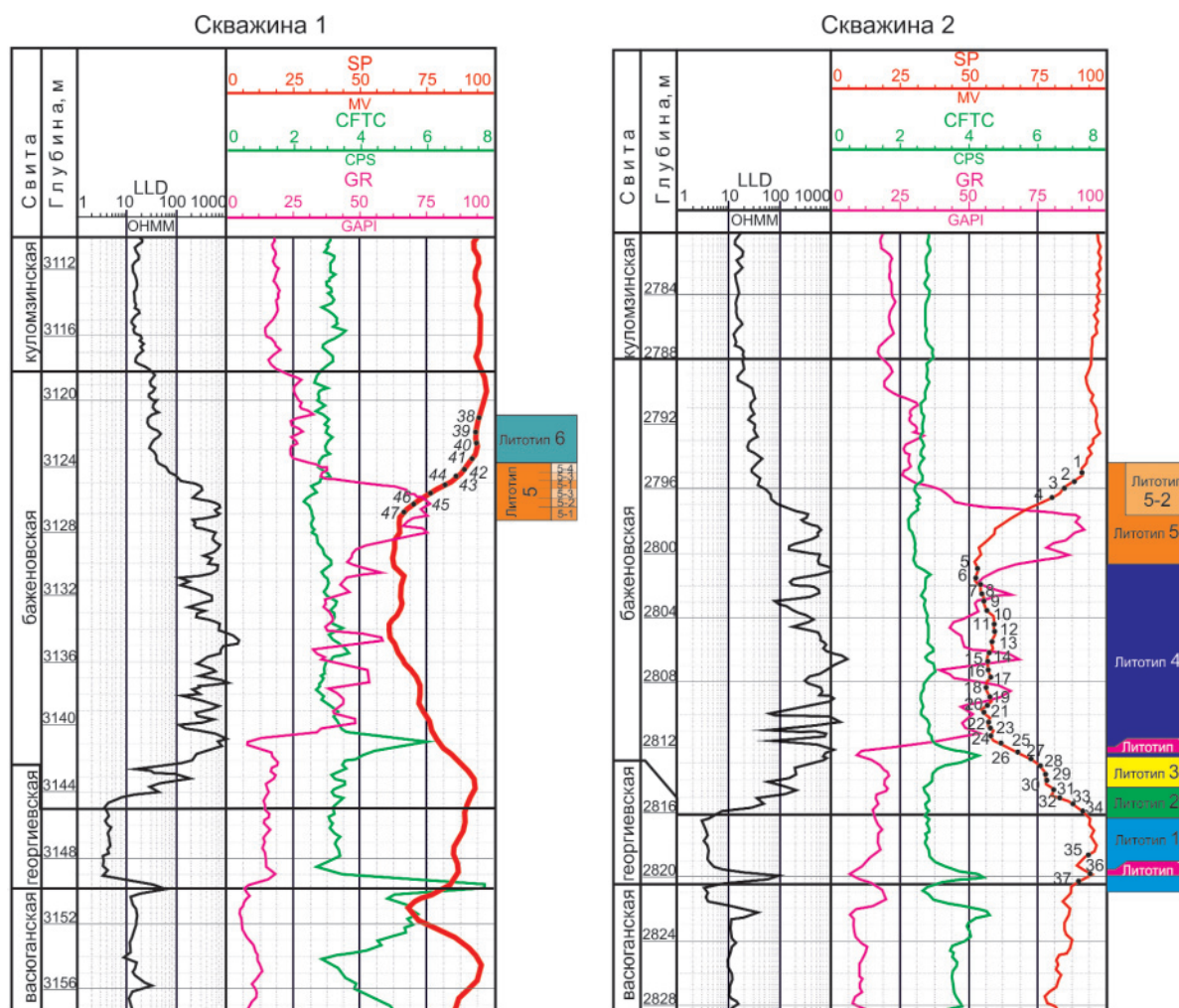


Рис. 1. Геофизическая характеристика и положение литотипов в разрезе баженовской свиты на территории исследования

Fig. 1. Geophysical characteristic and position of lithotypes in the Bazhenov Suite section in the study area

дах, иллите) и фосфатных минералах, так и за счет урана, сконцентрированного в рассеянном органическом веществе [11].

По литологическим особенностям и составу породобразующих компонентов в изученном разрезе выделено семь литотипов (рис. 1): литотип 1 характеризует отложения георгиевской свиты, литотипы 2–6 выделены в разрезе баженовской свиты, литотип 7 встречается в разрезе георгиевской и в нижней части баженовской свиты. Снизу вверх по разрезу литотипы представлены: алевро-силицитовыми аргиллитами со следами жизнедеятельности илоядных животных и трубчатых раковинами (литотип 1); битуминозными силицито-аргиллитами с кремнистыми прослойками и остатками кремниевых водорослей (литотип 2); битуминозными силицитами глинистыми радиоляриевыми (литотип 3); битуминозными силицитами радиоляриевыми с трубчатыми раковинами и кремнистыми прослойками (литотип 4); битуминозными аргиллитами силицитовыми радиоляриевыми со следами биотурбации и остатками криноидей (литотип 5); силицит-аргиллитами радиоляриевыми

с остатками водорослей (литотип 6); силицит-глинисто-карбонатными породами (литотип 7).

Литотип 1 (рис. 2, А) – алевро-силицитовые аргиллиты со следами биотурбации и трубчатыми раковинами – темно-серые, черные с бурым оттенком, однородные и скрыто слоистые, с округлыми послойно уплотненными конкрециями и сыпью пирита, следами жизнедеятельности мелких илоядных животных, остатками трубчатых (диаметром менее 1 мм) и створчатых раковин (кальцитизированных и пиритизированных), фосфатизированных онихитов и кальцитовых пиритизированных ростров (диаметром менее 0,5 см) белемнитов, редких кремнистых раковин радиолярий, сильно растворенных и пиритизированных.

Структура пород пелитовая, мелкоалевритовая (обломочный материал размером до 0,01...0,02 мм составляет 15 % породы), лепидобластовая за счет ориентированного чешуйчатого глинисто-гидролюдистого агрегата. Глинистый материал представляет тонкодисперсную смесь каолинита, иллита, мусковита, хлорита и полевых шпатов, составляет 58...61,8 % и преобладает над аллотигенным и ау-

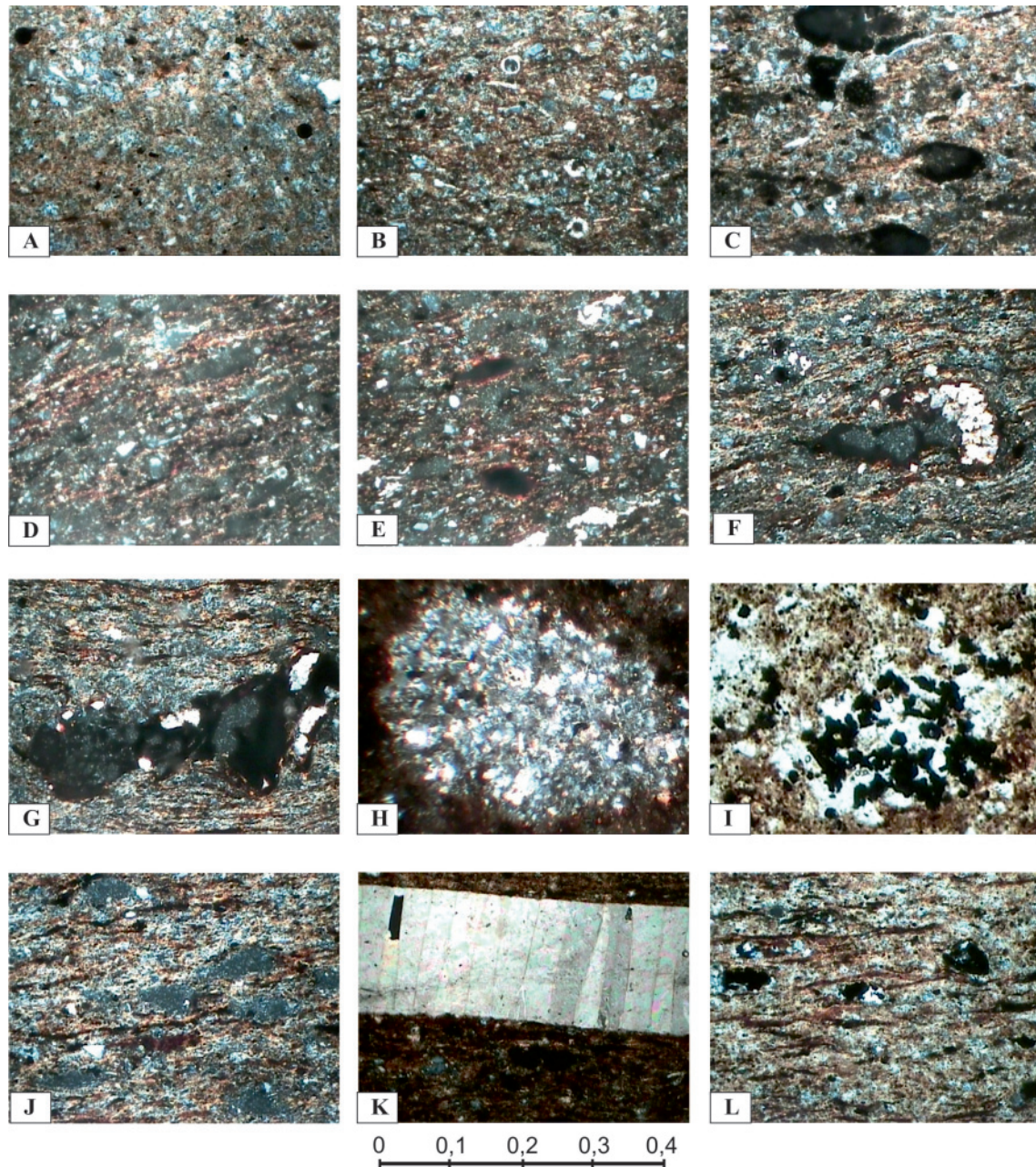


Рис. 2. Петрографические особенности литотипов баженовской свиты. Фото шлифов в скрещенных николях: А – литотип 1, алевропелитовая структура. Шл. 35. Скв. 2, Гл. 2818,8 м; В – литотип 2, спикулы губок, чешуйчатый агрегат. Шл. 32. Скв. 2, Гл. 2815,2 м; С – литотип 3, радиоларии, волокнисто-чешуйчатый агрегат. Шл. 30. Скв. 2, Гл. 2814,0 м; D – литотип 4, кремнистый материал, волокна гидрослюд. Шл. 25. Скв. 2, Гл. 2811,8 м; E – литотип 4, тонко рассеянное и сгустковое органическое вещество. Шл. 10. Скв. 2, Гл. 2803,6 м; F – литотип 5-1, обломок кремневой и фосфатизированной фауны. Шл. 45. Скв. 1, Глуб. 3127,0 м; G – литотип 5-1, карбонатная сыпь по кремнистому и фосфатизированному обломку фауны. Шл. 42. Скв. 1, Гл. 3125,4 м; H – литотип 5-2, ход илоеда с кремнисто-карбонатным заполнением. Шл. 46. Скв. 1, Гл. 3121,13 м; I – литотип 5-2, ход илоеда с пиритом. Шл. 4 (без анализатора). Скв. 2, Гл. 2800,4 м; J – литотип 5-3, чешуйчато-волокнистый агрегат. Шл. 45. Скв. 1, Гл. 3125,9 м; K – литотип 5-4, остаток стебля криноидеи. Шл. 42. Скв. 1, Гл. 3124,25 м; L – литотип 6, волокнисто-чешуйчатое строение, пиритизированные раковины радиоларий. Шл. 38. Скв. 1, Глуб. 3121,13 м

Fig. 2. Petrographic features of the Bazhenov suite lithotypes. Photo of the section is shown in crossed nicols: A – lithotype 1, aleuropelitic structure. Slide 35. Well 2, Depth 2818,8 m; B – lithotype 2, spicules of sponges, scaly aggregate. Slide 32. Well 2, Depth 2815,2 m; C – lithotype 3, radiolarians, fibrous-scaly aggregate. Slide 30. Well 2, Depth 2814,0 m; D – lithotype 4, siliceous material, hydromica fibers. Slide 25. Well 2, Depth 2811,8 m; E – lithotype 4, finely dispersed and clotted organic matter. Slide 10. Well 2, Depth 2803,6 m; F – lithotype 5-1, fragment of silicified and phosphatized fauna. Slide 45. Well 1, Depth 3127,0 m; G – lithotype 5-1, carbonate rash on silicified and phosphatized fragments of fauna. Slide 42. Well 1, Depth 3125,4 m; H – lithotype 5-2, the course of the glode with siliceous-carbonate filling. Slide 46. Well 1, Depth 3121,13 m; I – lithotype 5-2, the course of the glode with pyrite. Slide 4 (No analyzer). Well 2, Depth 2800,4 m; J – lithotype 5-3, scaly fibrous aggregate. Slide 45. Well 1, Depth 3125,9 m; K – lithotype 5-4, the remainder of the stalk of the crinoid. Slide 42. Well 1, Depth 3124,25 m; L – lithotype 6, fibrous-scaly structure, pyritized shells of radiolarians. Slide 38. Well 1, Depth 3121,13 m

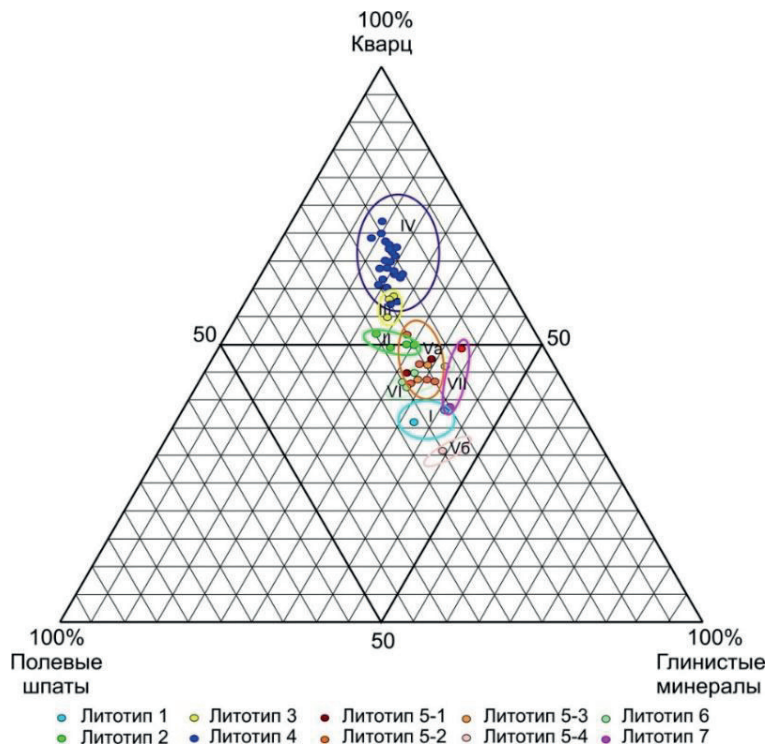


Рис. 3. Положение литотипов на треугольной диаграмме состава породобразующих компонентов баженовской свиты

Fig. 3. Lithotypes position on the triangle diagram of Bazhenov Suite rock-forming constituents composition

тигеным (слагающим раковины радиолярий) кварцем (34,7...34,9 %).

Пирит (3,5...7,1 %) рассеян в породе, приурочен к ходам илоедов, образует конкреции и псевдоморфозы по органическим остаткам. Встречаются единичные мелкие (менее 0,01 мм) неправильные и ромбоэдрические зерна доломита.

На треугольной диаграмме соотношения полевых шпатов, глинистых минералов и кварца (рис. 3) точки состава алевроито-силицитовых аргиллитов располагаются в поле I с высоким содержанием глинистого и полевошпатового материала и низким содержанием кварца.

Литотип 2 (рис. 2, В) – битуминозные силицито-аргиллиты с кремнистыми прослойками и остатками кремниевых водорослей – коричнево-черные с редкими фосфатизированными онихитами и рострами белемнитов, немногочисленными конических округло-уплощенными кремнистыми частично пиритизированными и карбонатизированными раковинами радиолярий, спиклами губок. Кремнистые прослойки прерывистые тонкие (менее 1 мм). Породы слабо пиритизированы (2,1...5,4 %) иногда слабо карбонатизированы (0...2,8 %). Структура их пелитовая и лепидобластовая за счет одинаковой ориентировки чешуйчатых агрегатов слюдястых минералов.

Соотношение глинистой (44,4...49,3 %) и кремниевой (47,6...48,5 %) составляющих в породах примерно одинаковое, поэтому на треугольной диаграмме (рис. 3) точки литотипа располагаются в поле II с содержанием кварца около 50 %.

Повсеместно присутствует рассеянное тонко диспергированное и сгустковое гелефицированное с аморфной структурой органическое вещество бурого цвета, распределенное равномерно, послойно, приуроченное к внутренним полостям раковин радиолярий. КERN разбит трещинами, насыщен нефтью, обладает запахом, напоминающим запах керосина, имеет жирную поверхность, пачкает руки, оставляя на них маслянистую пленку.

Литотип 3 (рис. 2, С) – битуминозные силицито-глинистые радиоляриевые – буровато-черные с неравномерной горизонтальной, линзовидной, полого-наклонной листоватой слоистостью, мелкими онихитами белемнитов, спиклами губок и слабо сохранными раковинами радиолярий, раздробленными, растворенными, перекристаллизованными, иногда тонко пиритизированными, с рассеянной сыпью пирита (2,9...3 %), иногда с пиритовыми конкреционными стяжениями. Породы в разной степени карбонатизированы: от 0,5 % – в нижней, до 10,8 % – в верхней части разреза.

В составе пород преобладает кремнистый (49,2...53,3 %) материал над глинисто-гидрослюдистым (37,1...43,2 %) волокнисто-чешуйчатым. Фигуративные точки на диаграмме (рис. 3) располагаются в поле III, занимая промежуточное положение между фигуративными точками 2 и 4 литотипов.

Рассеянное органическое вещество равномерно распределено в матрице породы, окрашивая ее в бурый цвет, реже встречается в концентрированной форме, образуя сгустки и послойные скопления.

Керн разбит субвертикальными и наклонными трещинами на крупные куски, на плоскостях наложения отмечается кальцит. Породы насыщены нефтью, имеют характерный запах, напоминающий запах керосина, жирные на ощупь, оставляют маслянистую пленку на руках.

Литотип 4 (рис. 2, D, E) – битуминозные силициты радиоляриевые с трубчатыми раковинами и кремнистыми прослойками – буровато-черные тонко отмученные с неотчетливой горизонтальной слоистостью, конкрециями и послойными присыпками (до 0,8 см толщиной) пирита, включениями ихтиофауны, ростров и фосфатизированных онихитов белемнитов, конусообразными трубчатыми раковинами (размерами по удлинению до 4 мм), раздробленными, растворенными и сильно перекристаллизованными кремнистыми скелетами радиолярий, спикулами губок.

В составе пород биогенный и слабо раскристаллизованный кремнистый материал (49,9...66,7 %) преобладает над волокнистым глинисто-гидрослюдистым (25,1...38,4 %). Пирит (3,6...10,3 %) присутствует в виде сыпи, псевдоморфоз по органогенным остаткам. Породы не карбонатизированы или содержат рассеянную сыпь кальцита и доломита (0...2,6 %), лишь в единичных прослоях содержание карбонатов возрастает до 4,5...9,6 % в основном за счет кальцита в органогенных остатках. Самое низкое содержание полевых шпатов (12,8 %) и глинистых минералов в целом (25,1 %), максимальное соотношение кремнистого и глинистого материала (72:28) и очень высокое содержание пирита (10,3 %) отмечено в образце 19 (глубина отбора 2808,93 м).

На треугольной диаграмме (рис. 3) точки литотипа обособляются в верхней части – поле IV.

Рассеянное органическое вещество бурого цвета насыщает породу, присутствует как в рассеянном, так и в концентрированном виде, образуя сгустки, часто ориентированные по наслоению, заполняет полости в раковинах радиолярий.

Керн расколот на послойные плитки, насыщен нефтью, имеет маслянистую поверхность и обладает сильным запахом нефти.

Литотип 5 (рис. 2, F–K) – битуминозные аргиллиты силицитовые радиоляриевые со следами биотурбации и остатками криноидей – темно-серые однородные, с онихитами белемнитов, спикулами губок, иногда с обломками окремненной фауны (литотип 5–1, рис. 2, F, G); следами жизнедеятельности донных илоядных организмов (литотип 5–2, рис. H, I); с тонкими (доли мм) прерывистыми кремнистыми прослойками, скоплениями радиолярий, высоким (до 10,3 %) содержанием пирита (литотип 5–3, рис. 2, J); с неокатанными обломками криноидей, сложенных полигональными (ячеи чашечек) и шестоватыми (стебли) агрегатами кальцита (литотип 5–4, рис. 2, K), и мелких двусторчатых раковин. Породы сложены в разной степени раскристаллизованным кремнистым, чешуйчато-волокнистым глинисто-гидрослюдистым,

а в участках биотурбации беспорядочно распределенным пелитовым и мелкоалевритовым (заполняет ходы и норки) материалом.

Содержание кремнистого материала в породах непостоянно и колеблется от 26,5 до 44,9 %, глинистого – 41,6...59,8 %. Породы пиритизированы (6,3...13,8 %), в разной степени карбонатизированы (1,4...10,6 %).

Фигуративные точки литотипа на диаграмме (рис. 3) сконцентрированы в поле Vб, лишь точка литотипа 5–4 смещена в сторону полевошпатовой и глинистой составляющих.

Породы насыщены бурым рассеянным органическим веществом. Повсеместно в них наблюдаются разно ориентированные трещины, отмечается нефтенасыщение.

Литотип 6 (рис. 2, L) – силицитовые аргиллиты радиоляриевые с остатками водорослей – темно-серые до черных, однородные, тонко отмученные, иногда послойно пиритизированные с пиритизированными органогенными обломками створчатых раковин, спикул губок, радиолярий, водорослей и редкими включениями фосфатизированных онихитов белемнитов. Структура пород лепидобластовая, образованная глинисто-слюдистым волокнистым агрегатом, между волокнами которого располагаются растворенные и сложенные кварцем и халцедоном пиритизированные раковины радиолярий, спикулы губок, в разной степени раскристаллизованный кремнистый материал, остатки водорослей, рассеянное бурое органическое вещество, пирит, терригенные обломки кварца и полевых шпатов.

Содержание глинистого материала (47,9...51,9 %) превалирует над содержанием кремнистого (37,1...40,1 %), содержание пирита – 6,3...8,9 %, кальцита – 2,3...3,9 %.

Литотип 7 – силицит-глинисто-карбонатные породы – под микроскопом не изучался. Согласно РФА, породы сложены на 12...24,3 % кремнистым и на 18,9...24,8 % глинистым материалом, 47,6...65,5 % приходится на карбонаты и в значительном количестве присутствует пирит – 3,3...3,5 %.

Обсуждение результатов

Формирование уникального баженовского коллектора обусловлено литогенетическими (седиментогенными, диагенетическими, катагенетическими) и тектоническими факторами.

Согласно общепринятым представлениям, формирование осадков баженовской свиты осуществлялось на фоне позднеюрской трансгрессии моря и медленного опускания дна морского бассейна в условиях теплого и влажного климата, способствовавшего развитию морских организмов [5, 12, 13].

На территории исследования на большем протяжении времени формирования отложений баженовской свиты осадконакопление осуществлялось при стабильно низкодинамичном застойном режиме седиментации в относительно глубоководных мор-

ских условиях восстановительной геохимической среды. Об этом свидетельствуют толщина относительно однородных осадков, их тонкодисперсный характер, остатки морской фауны, прежде всего, радиолярий, и постоянное присутствие, а иногда и повышенное содержание пирита – индикаторного минерала восстановительной обстановки.

Глинистые илы, накопившиеся в георгиевское время (литотип 1) в условиях слабого насыщения придонных вод кислородом, с течением времени сменялись более глубоководными осадками эпиконтинентального моря – радиоляриевыми илами, обогащенными кремнистым материалом биогенного и химического происхождения (литотипы 2 и 3). В ходе дальнейшего осадконакопления в составе донных осадков кремнистая составляющая постепенно стала преобладать (литотип 4), что обусловлено углублением бассейна седиментации и менее активным терригенным сносом по мере удаления от береговой линии. Инверсионной точкой трансгрессивно-регрессивного цикла седиментации, вероятно, послужило время накопления осадков, представленных образцом 19 с максимальным соотношением кремнисто-глинистой составляющей и высоким содержанием пирита. С этого момента осадки вновь постепенно обогащаются глинистыми компонентами, и в первую очередь терригенными полевыми шпатами.

Увеличение доли кремнистого материала и пирита может быть объяснено также с позиций усиления тектонической активности в титон-берриаское время, подтока вещества по дизъюнктивным нарушениям [14] или поступлением вулканогенного материала [15].

Отступление баженовского моря осуществлялось дискретно, что выразилось в разнообразии пород, слагающих литотип 5, знаменующих колебательный характер условий седиментации: от уменьшения глубины осадконакопления со слабым насыщением кислородом придонных вод, биотурбацией осадка донными животными (литотип 5–2) и криноидными остатками (литотип 5–4) до ее увеличения и более восстановительных условий с формированием прослоев, обогащенных радиоляриями и пиритом (литотип 5–3).

Наконец, в менее глубоководных условиях происходило формирование литотипа 6, в котором существенно увеличено содержание глинистого и алевритового материала и широко распространены остатки водорослей.

Карбонатность пород обусловлена присутствием обломков фауны, имеющей кальцитовый скелет, а также химическим осаждением, что выразилось в рассеянной минерализации и в замещении фаунистических остатков.

Практически все литотипы содержат в повышенном количестве рассеянное и концентрированное сапропелевое органическое вещество и могут быть в полной мере отнесены к разряду нефтематеринских. Биопродукентами явились планктонные (радиолярии и др.), бентосные (водоросли, мор-

ские лилии и др.) и нектонные (белемниты и др.) организмы, остатки которых постоянно встречаются в породах. Наиболее насыщены рассеянным органическим веществом породы литотипа 4, они же обогащены кремнистым материалом и раковинами радиолярий. Сохранность органического вещества обеспечивалась тонкодисперсной структурой пород и благоприятными условиями восстановительной среды. На положительное влияние восстановительных условий на сохранность органического вещества в нефтяных сланцах указывается в ряде работ [16–19].

Глубина погружения баженовской свиты на территории исследования достигает 2788...2815 м (скв. 4) и 3118...3145 м (скв. 3). Согласно И.В. Гончарову [8, 9], уровень катагенеза органического вещества соответствует в этом районе Нюрольского мегабассейна мезокатагенезу градации $МК_2$ и породы находятся в главной зоне нефтенакопления, по В.И. Исаеву и др. [20], они располагаются в очаге интенсивной генерации баженовской нефти.

До настоящего времени существует несколько точек зрения на тип коллектора в аргиллитах баженовской свиты. Баженовский коллектор сформировался как результат межслоевого пространства: (микро-) плитчатости, слойчатости и листоватости [5], часто его природу определяют, как трещинную [6], трещинно-поровую и поровую [21]; в карбонатных породах развит каверновый тип коллектора [22].

В изучаемом разрезе карбонатные породы распространены в нижней части и служат экраном, удерживающим углеводороды внутри баженовской свиты, они не растворены и не содержат пустот. Аргиллиты силицитовые, силициты и глинистые силициты продуктивного разреза обладают видимым межслоевым и трещинным пространством. Вместе с тем, с учетом только этих типов пустот, трудно объяснить наличие нефти в текстурно-однородных и не трещиноватых породах.

Обзор литературы по изучению эволюции пустотного пространства в нефтематеринских толщах [1, 23–28] показывает, что вопрос формирования коллекторских свойств в битуминозных отложениях, вступивших в главную фазу нефтеобразования, далеко не простой и требует тщательного анализа.

С нашей точки зрения, формирование пустотного пространства в аргиллитах баженовской свиты следует начинать рассматривать с момента седиментации.

Насыщенные водой тонкодисперсные илы баженовской свиты, вероятно, обладали высокой седиментогенной пористостью. В процессе диагенеза за счет уплотнения и оттока воды из осадка, а также при осаждении диагенетических минералов (кремнистых, пирита, карбонатов и др.) эта пористость значительно сокращалась, а возможно, была уничтожена.

Наличие в породах органогенных остатков способствовало формированию биопустотной пористости, образованной при микробальном разложе-

нии организмов в раннем диагенезе. Этот тип пористости зачастую сохранялся вплоть до катагенеза. Доказательством чему является повсеместная приуроченность органического вещества к внутренним полостям раковин радиолярий, спикул губок, макрофаунистических остатков.

В катагенезе в процессе термического созревания и термокаталитического преобразования органического вещества, особенно в условиях главной фазы нефтеобразования ($МК_1$ – $МК_3$), на которой находятся в настоящее время изучаемые породы ($МК_2$), пустотное пространство формировалось за счет деструкции твердого органического вещества (керогена). Известно, что при генерации нефти происходит существенное преобразование молекулярной структуры ОВ, сопровождающееся выделением газообразных (CO_2 , CH_4 , NH_3 , N_2 , H_2S) и жидких продуктов (нефтяные углеводороды и вода) и потерей массы исходного органического вещества. В результате объем твердой фазы органического вещества сокращается, а жидкой и газообразной, напротив, увеличивается. Как следствие этого, за счет уменьшения объема органического вещества образуется дополнительное свободное поровое пространство (так называемая органическая пористость), которое образует эффективную сеть пор и служит хранилищем генерированных углеводородов, удерживая их внутри материнской свиты.

В дальнейшем оставшиеся незалеченными в диагенезе биогенные поры и образованные в катагенезе органические поры расширяются вследствие давления на них выделившихся газообразных и жидких продуктов, образуются подовленные (доработанные) поры и коллектор тонкопорового типа с равномерно распределенным пустотным пространством.

С этим же процессом связывается и подновление (модификация) пор в минеральной части коллектора (в трещиноватых зернах, зернах с внутризерновыми порами), которые заполняет газ и нефть. При этом проницаемость пород во время генерации углеводородов может изменяться от микро- и наноуровня до уровня Дарси.

В ходе дальнейшего преобразования органического вещества и возрастания давления до критического происходил флюидоразрыв пород с образованием межслоевых и внутрислоевых трещин [5],

аналогично указанным в ряде экспериментальных работ [24–27]. Миграция осуществлялась преимущественно внутри баженовской свиты, надежно перекрытой снизу и сверху глинистыми и карбонатно-глинистыми флюидоупорами георгиевской и куломзинской свит. Следы миграции нефти неоднократно описывались в работах [5, 6, 14, 15, 18, 29, 30]. Увеличение объема пустотного пространства баженитов при их погружении на глубину более 2000 м может составлять от 4–5 до 12 % и более [31]. Вместе с тем трещинная проницаемость пород, связанная с процессом флюидоразрыва, увеличивается незначительно, до уровня миллиарди [25], из-за смыкания их стенок в процессе дальнейшего катагенетического уплотнения.

Вторичная трещинная пустотность, проявленная в расколе пород на куски и связанная с системой разно ориентированных трещин, обусловлена проявлением тектонических процессов [14, 15, 18, 31].

Таким образом, изученный баженовский коллектор сформирован в результате различных (первичных и вторичных) процессов и имеет смешанное происхождение.

Заключение

Нефтенасыщенные отложения баженовской свиты на юго-востоке Нюрольского осадочного бассейна (Тамратская впадина) имеют неоднородный литологический состав и представлены битуминозными силицито-аргиллитами с кремнистыми прослойками и остатками кремниевых водорослей; битуминозными силицитами глинистыми радиоляриевыми; битуминозными силицитами радиоляриевыми с трубчатыми раковинами и кремнистыми прослойками; битуминозными аргиллитами силицитовыми радиоляриевыми со следами биотурбации и остатками криноидей.

Баженовский коллектор имеет смешанное происхождение, пустотное пространство в нем формировалось в диагенезе, катагенезе и эпигенезе и представлено седиментогенными и диагенетическими биопустотами; катагенетическими порами, образованными за счет термокаталитического преобразования органического вещества при газонефтегенерации; катагенетическими (межслоевыми и внутрислоевыми) и тектоническими (межслоевыми и сквозными) трещинными пустотами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liu K., Ostadhassan M. Microstructural and geomechanical analysis of Bakken shale at nanoscale // *Journal of Petroleum Science and Engineering* 2017. – V. 153. – P. 133–144.
2. Evaluation of Eocene source rock for potential shale oil and gas generation in north Cambay Basin, India / S. Kumar, K. Ojha, R. Bastia, K. Garg, S. Das, D. Mohanty // *Marine and Petroleum Geology*. – 2017. – V. 88. – P. 141–154.
3. Effects of organic matter and mineral compositions on pore structures of shales: A comparative study of lacustrine shale in Ordos Basin and Marine Shale in Sichuan Basin, China / X. Tang, Z. Jiang, S. Jiang, Z. Li, Y. Peng, D. Xiao, F. Xing // *Energy Exploration and Exploitation*. – 2018. – V. 36. – № 1. – P. 28–42.
4. Origin of organic matter and paleo-sedimentary environment reconstruction of the Triassic oil shale in Tongchuan City, southern Ordos Basin (China) / D. Li, R. Li, Z. Zhu et al. – *Fuel*. – 2017. – V. 208. – P. 223–235.
5. Трофимук А.А., Карогодин Ю.Н. Баженовская свита – уникальный природный резервуар // *Геология нефти и газа*. – 1981. – № 4. – С. 29–33.
6. Баженовская свита. Общий обзор, нерешенные проблемы / Г.А. Калмыков, Н.С. Балущкина, И.С. Афанасьев, Е.В. Гаврилова, Е.М. Вирун // *Российские нефтегазовые технологии*. – 2011. – № 25. – С. 24–36.
7. Районирование мегавпадин юго-востока Западной Сибири по плотности ресурсов сланцевой нефти тогурской и баженовской

- материнских свит / В.И. Исаев, Г.А. Лобова, А.К. Мазуров, В.И. Старостенко, А.Н. Фомин // Геология нефти и газа. – 2018. – № 1. – С. 15–39.
8. Катагенез органического вещества пород баженовской свиты юго-востока Западной Сибири (Томская область) / И.В. Гончаров, В.В. Самойленко, Н.В. Обласов, С.В. Фадеева // Нефтяное хозяйство. – 2013. – № 10. – С. 32–37.
9. Гончаров И.В., Носова С.В., Самойленко В.В. Генетические типы нефтей Томской области // Химия нефти и газа: матер. V Междунар. конф. – Томск: СО РАН, 2003. – С. 10–14.
10. Распределение органического вещества в породах баженовского горизонта (Западная Сибирь) / А.Э. Конторович, Е.В. Пономарева, Л.М. Бурштейн и др. // Геология и геофизика. – 2018. – Т. 59. – № 3. – С. 357–371.
11. Номоконова Г.Г. Геофизическая характеристика и нефтеносность баженовской свиты // Геофизические методы при разведке недр: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 70-летию основания в Томском политехническом институте кафедры «Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых» – Томск, 20–23 апреля 2016. – Томск: Изд-во ТПУ, 2016. – С. 154–157.
12. Захаров В.А. Условия формирования волжско-берриаской высокоуглеродистой баженовской свиты по данным палеоэкологии // Эволюция биосферы и биоразнообразия. – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2006. – С. 552–568.
13. Shaminova M., Rychkova I., Sterzhanova U. Paleogeographic and litho-facies formation conditions of MidUpper Jurassic sediments in S-E Western Siberia (Tomsk Oblast) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Problems of Geology and Subsurface Development. – 2016. – V. 43. – 012001, 5 p.
14. Предтеченская Е.А., Злобина О.Н. Литолого-фациальные особенности баженовской свиты как «промежуточного» коллектора углеводородов в зонах дизъюнктивных нарушений // Современные проблемы седиментологии в нефтегазовом инжиниринге: труды III Всероссийского научно-практического седиментологического совещания. – Томск, 10–12 апреля 2017. – Томск: Изд-во ЦППС НД, 2017. – С. 113–122.
15. Петрография и минералогия глин аномально люминесцирующих прослоев баженовской свиты Западно-Сибирского осадочного бассейна / М.В. Шалдыбин, В.В. Крупская, А.В. Глотов и др. // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 2. – С. 36–40.
16. Organic geochemical and petrographic characteristics of the oil shales in the Lajjun area, Central Jordan: Origin of organic matter input and preservation conditions / M.H. Hakimi, W. H. Abdullah, M. Alqudah et al. – Fuel. – 2016. – V. 181. – P. 34–45.
17. Geochemical characteristics, redox conditions, and organic matter accumulation of marine oil shale from the Changliang Mountain area, northern Tibet, China / S. Zeng, J. Wang, W. Chen, C. Xinglei, F. Dong, D. Wang, C. Song, Z. Wang // Marine and Petroleum Geology. – 2015. – V. 64. – P. 203–221.
18. The mineralogy of the clayey-silty siliceous rocks in the Bazhenov Shale Formation (Upper Jurassic) in the west Siberian Basin, Russia: The role of diagenesis and possible implications for their exploitation as an unconventional hydrocarbon reservoir / M.V. Shalabybin, Y.M. Lopushnyak, I.V. Goncharov, M.J. Wilson, L. Wilson, B.G. Mendis // Applied Clay Science. – 2017. – № 136. – P. 75–89.
19. Occurrence of organic matter-rich deposits (Middle Jurassic to Lower Cretaceous) from Qalikuh locality, Zagros Basin, South-West of Iran: A possible oil shale resource / A. Rasouli, A. Shekarifard, F.J. Farahani, M.V. KÖk, M. Daryabandeh, M. Rashidi // International Journal of Coal Geology. – 2015. – V. 143. – P. 34–42.
20. Районирование баженовской свиты и клиноформ неокма по плотности ресурсов сланцевой и первично-аккумулятивной нефти (на примере Нюрольской мегавпадины) / В.И. Исаев, Г.А. Лобова, А.К. Мазуров, А.Н. Фомин, В.И. Старостенко // Геофизический журнал. – 2016. – № 3. – Т. 38. – С. 29–51.
21. Куляпин П.С., Соколова Т.Ф. Прогноз коллекторов в разрезе баженовской свиты по материалам керн и геофизических исследований скважин // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 1. – С. 118–133.
22. Соболева Е.В. Формирование состава нефтей пласта Ю₀ баженовской свиты Сальмского месторождения // Георесурсы. – 2017. – № 5. – С. 144–154.
23. Factors impacting on oil retention in lacustrine shale: Permian Lucaogou Formation in Jimusaer Depression, Junggar Basin / H. Pang, X.-q. Pang, L. Dong, X. Zhao // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – V. 163. – P. 79–90.
24. Pore-types and pore-network evolution in Upper Devonian-Lower Mississippian Woodford and Mississippian Barnett mudstones: Insights from laboratory thermal maturation and organic petrology / L.T. Ko, S.C. Ruppel, R.G. Loucks, P.C. Hackley, T. Zhang, D. Shao // International Journal of Coal Geology. – 2018. – V. 190. – P. 2–28.
25. Burnham A.K. Porosity and permeability of Green River oil shale and their changes during retorting // Fuel. – 2017. – V. 203. – P. 208–213.
26. Characterization of oil shale pore structure before and after pyrolysis by using X-ray micro CT / P. Tiwari, M. Deo, C.L. Lin, J.D. Miller // Fuel. – 2013. – V. 107. – P. 547–554.
27. Formation and development of the pore structure in Chang 7 member oil-shale from Ordos Basin during organic matter evolution induced by hydrous pyrolysis / L. Sun, J. Tuo, M. Zhang, C. Wu, Z. Wang // Fuel. – 2015. – V. 158. – P. 549–557.
28. Evaluation of the porous structure of Huadian oil shale during pyrolysis using multiple approaches / F.T. Bai, Y.H. Sun, Y.M. Liu, M.Y. Guo // Fuel. – 2017. – V. 187. – P. 1–8.
29. Specific features of Bazhenov suite sediments in south-eastern Nurolsk sedimentary basin (Tomsk Oblast) / N. Nedolivko, T. Perevertailo, Cunyi Li, R. Abramova // Problems of Geology and Subsurface Development: XIX International Scientific Symposium in honor of Academician M.A. Usov. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 27. – Tomsk, Russia, 6–10 April 2015. – 012014, 6 p.
30. Недоливко Н.М., Ежова А.В. Литогенетические типы отложений баженовской свиты на Южно-Майском локальном поднятии по результатам изучения керн скв. 413 (Томская область) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2015. – № 4. – С. 40–47.
31. Предтеченская Е.А., Злобина О.Н. О вещественном составе и механизме формирования «промежуточного коллектора» в доманикитах в зонах вертикальной миграции флюидов (на примере баженовской свиты Западной Сибири) // 5-е Кудрявцевские Чтения: Всероссийская конференция по глубинному генезису нефти и газа. – Москва, 17–19 октября 2016. – М.: Изд-во ЦГЭ, 2016. – 5 с.

Поступила 06.10.2018 г.

Информация об авторах

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

Перевертайло Т.Г., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 552.578.2.061.1.08(571.16)

LITHOLOGICAL AND PETROGRAPHIC CHARACTERIZATION OF BAZHENOV SUITE RESERVOIR ROCKS IN THE SOUTH-EAST OF THE WESTERN-SIBERIAN PROVINCE (TOMSK REGION)

Natalya M. Nedolivko¹,

nedolivko@tpu.ru

Tatyana G. Perevertaylo¹,

ptg@tpu.ru

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

The relevance of this research comes in response to the need to expand the resources of Western Siberia including Tomsk region, by the development of hard-to-recover oil reserves concentrated in the Bazhenov Suite (Tithonian-Berriasian).

The aim of the research is to reveal the features of the lithologic composition and structure of the Bazhenov reservoir rocks across the potentially prospective oil-producing Tomsk region.

Object: Bazhenov Suite bituminous deposits discovered by drilling at a local elevation in the Tamrat Basin (Nyuroł' sedimentary basin), the Pudinsky oil-and-gas-bearing region of the West Siberian oil and gas province (Tomsk Oblast), where an oil inflow was obtained.

Methods: geophysical studies, macroscopy core description, petrographic and X-ray analyzes.

Results. The paper introduces spatial distribution of decomposed rocks – oil and gas reservoirs – identified throughout the productive interval of the Bazhenov Suite. The study provides a detailed geophysical and petrographic description of rocks as well as their textural and compositional characteristics. Authors divide all rocks into seven lithotypes: 1) aleurit-silicitic argillites with rare tubicolous shells and «mud eater» fossils; 2) bituminous silicitic argillites with silicious bands and diatoms traces; 3) bituminous radiolarian argillic silicites; 4) bituminous radiolarian silicites with tubicolous shells and silicious bands; 5) bituminous radiolarian argillic silicites marked by bioturbation and crinoid traces; 6) radiolarian silicitic argillites with algae traces; 7) silicitic argillic carbonates. It was found that the accumulation of Bazhenov sediments was controlled by a low-dynamic stagnant sedimentation regime in relatively deep-sea conditions of the reducing geochemical environment. There is a correlation between both the mineral composition and the content of sapropelic organic matter with the transgressive-regressive sedimentation cyclicity: the 4th lithotype is the most enriched in siliceous material and organic matter, and the maximum amount of these components occurs at the point of inversion of the transgressive-regressive cycle. The Bazhenov collector having a mixed genesis was formed during the multi-stage lithogenesis (sedimentogenesis–catagenesis) and poststadial processes. The void space is represented by ultrathin bio-voids and pores as well as by both interlayer and intralayer fractures.

Key words:

Nyuroł' basin, Western Siberia, Tomsk region, Tithonian-Berriasian, Bazhenov suite, bituminous argillite, oil source rocks, lithotype, reservoir rock.

REFERENCES

- Liu K., Ostadhassan M. Microstructural and geomechanical analysis of Bakken shale at nanoscale. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 153, pp. 133–144.
- Kumar S., Ojha K., Bastia R., Garg K., Das S., Mohanty D. Evaluation of Eocene source rock for potential shale oil and gas generation in north Cambay Basin, India. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, vol. 88, pp. 141–154.
- Tang X., Jiang Z., Jiang S., Li Z., Peng Y., Xiao D. & Xing F. Effects of organic matter and mineral compositions on pore structures of shales: A comparative study of lacustrine shale in Ordos Basin and Marine Shale in Sichuan Basin, China. *Energy Exploration and Exploitation*, 2018, vol. 36, no. 1, pp. 28–42.
- Li D., Li R., Zhu Z. Wu X., Cheng J., Liu F., Zhao B. Origin of organic matter and paleo-sedimentary environment reconstruction of the Triassic oil shale in Tongchuan City, southern Ordos Basin (China). *Fuel*, 2017, vol. 208, pp. 223–235.
- Trofimuk A.A., Karogodin Yu.N. Bazhenov suite is the unique natural reservoir. *Geology of oil and gas*, 1981, no. 4, pp. 29–33. In Rus.
- Kalmykov G.A., Balushkina N.S., Afanasev I.S., Gavrilo E.V., Birun E.M. Bazhenovskaya svita. Obshchyy obzor, nereshennyye problemy [Bazhenov suite. General review. Unsolved problems]. *Rossiyskie neftegazovyye tekhnologii*, 2011, no. 25, pp. 24–36.
- Isaev V.I., Lobova G.A., Mazurov A.K., Starostenko V.I., Fomin A.N. Zoning of mega-depressions by shale oil generation density of Togur and Bazhenov source suites in the southeast of Western Siberia. *Oil and gas geology*, 2018, no. 1, pp. 15–39. In Rus.
- Goncharov I.V., Samoylenko V.V., Oblasov N.V., Fadeeva S.V. Catagenesis of organic matter of Bazhenov Formation rocks in the south-east of West Siberia (Tomsk region). *Oil industry*, 2013, no. 10, pp. 32–37. In Rus.
- Goncharov I.V., Nosova S.V., Samoylenko V.V. Geneticheskie tipy neftey Tomskoy oblasti [Genetic types of oil in Tomsk region]. *Khimiya nefi i gaza. Materialy V Mezhdunarodnoy konferentsii* [Chemistry of oil and gas. Proc. of International conference]. Tomsk, SO RAN Publ., 2003. pp. 10–14.
- Kontorovich A.E., Ponomareva E.V., Burshtein L.M., Gliniskikh V.N., Kim N.S., Kostyreva E.A., Pavlova M.A., Rodchenko A.P., Yan P.A. Distribution of organic matter in rocks of the Bazhenov horizon (West Siberia). *Geology and Geophysics*, 2018, vol. 59, no. 3, pp. 285–298. In Rus.
- Nomokonova G.G. Geofizicheskaya kharakteristika i neftenost bazhenovskoy svity [Geophysical characteristic and oil-bearing feature of Bazhenov suite]. *Geofizicheskie metody pri razvedke nedr. Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoy 70-letiyu osnovaniya v Tomskom politekhnicheskom institute kafedry «Geofizicheskie metody poiskov i razvedki mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh»* [Geophysical techniques at exploration. Proc. Of the All-Russian scientific conference with international participation, devoted to the 70th anniversary of foundation of the department «Geophysical methods of search and exploration of na-

- tural recourse fields» at Tomsk polytechnic institute]. Tomsk, 20–23 April 2016. Tomsk, TPU Publ. house, 2016. pp. 154–157.
12. Zakharov V.A. Usloviya formirovaniya volzhsko-berriasskoy vysokouglerodistoy bazhenovskoy svity po dannym paleoekologii [Conditions of formation of volzhsko-berriasskaya high-carbon bazhenov suite by the data of paleoecology]. *Evolutsiya biosfery i bioraznoobraziya* [Evolution of biosphere and biological diversity]. Moscow, Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK Publ., 2006. pp. 552–568.
 13. Shaminova M., Rychkova I., Sterzhanova U. Paleogeographic and litho-facies formation conditions of MidUpper Jurassic sediments in S-E Western Siberia (Tomsk Oblast). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Problems of Geology and Subsurface Development*, 2016, vol. 43, 012001, 5 p.
 14. Predtechenskaya E.A., Zlobina O.N. Litologo-fatsialnye osobennosti bazhenovskoy svity kak «promezhutochnogo» kollektora uglevodorodov v zonakh dizyunktivnykh narusheniy [Lithological and facial features of bazhenov suite as «intermediate» header of hydrocarbons in disjunctive fault areas]. *Sovremennye problemy sedimentologii v neftegazovom inzhiniringe. Trudy III Vserossiyskogo nauchno-prakticheskogo sedimentologicheskogo soveshchaniya* [Current problems in sedimentology in oil-and-gas engineering. Proc. of the III All-Russian scientific sedimentological meeting]. Tomsk, 10–12 April 2017. Tomsk, CPPS ND Publ., 2017. pp. 113–122.
 15. Shaldybin M.V., Krupskaya V.V., Glotov A.V., Dorieva O.V., Goncharov I.V., Samoylenko V.V., Deeva E.S., Lopushnyak Yu.M., Bether O.V., Zakusin S.V. Petrography and clay mineralogy of anomaly luminescent layers in Bazhenov suite of Western Siberia sedimentary basin. *Oil industry*, 2018, no. 2, pp. 36–40. In Rus.
 16. Hakimi M.H., Abdullah W.H., Alqudah M., Makeen Y.M. Organic geochemical and petrographic characteristics of the oil shales in the Lajjun area, Central Jordan: Origin of organic matter input and preservation conditions. *Fuel*, 2016, vol. 181, pp. 34–45.
 17. Zeng S., Wang J., Chen W., Xinglei C., Dong F., Wang D., Song C., Wang Z. Geochemical characteristics, redox conditions, and organic matter accumulation of marine oil shale from the Changliang Mountain area, northern Tibet, China. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, vol. 64, pp. 203–221.
 18. Shaldybin M.V., Lopushnyak Y.M., Goncharov I.V., Wilson M.J., Wilson L., Mendis B.G. The mineralogy of the clayey-silty siliceous rocks in the Bazhenov Shale Formation (Upper Jurassic) in the west Siberian Basin, Russia: The role of diagenesis and possible implications for their exploitation as an unconventional hydrocarbon reservoir. *Applied Clay Science*, 2017, no. 136, pp. 75–89.
 19. Rasouli A., Shekarifard A., Farahani F.J., Kök M.V., Daryabandeh M., Rashidi M. Occurrence of organic matter-rich deposits (Middle Jurassic to Lower Cretaceous) from Qalikh locality, Zagros Basin, South–West of Iran: a possible oil shale resource. *International Journal of Coal Geology*, 2015, vol. 143, pp. 34–42.
 20. Isaev V.I., Lobova G.A., Mazurov A.K., Fomin A.N., Starostenko V.I. Zoning of the Bazhenov suite and clinofoms of Neocomian according to the density resources of shale and primarily-ac-cumulated oil (Nurol megadepression as an example). *Geophysical journal*, 2016, vol. 38, no. 3, pp. 29–51. In Rus.
 21. Kulyapin P.S., Sokolova T.F. Reservoir identification in the Bazhenov Formation from well log and core data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 1, pp. 118–133. In Rus.
 22. Soboleva E.V. Formation of oil composition of the Yu₀ Bazhenov formation, Salym oil field. *Geosursy*, 2017, no. 5, pp. 144–154. In Rus.
 23. Pang H., Pang X.-q., Dong L., Zhao X. Factors impacting on oil retention in lacustrine shale: Permian Lucaogou Formation in Jimusaer Depression, Junggar Basin. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 163, pp. 79–90.
 24. Ko L.T., Ruppel S.C., Loucks R.G., Hackley P.C., Zhang T., Shao D. Pore-types and pore-network evolution in Upper Devonian-Lower Mississippian Woodford and Mississippian Barnett mudstones: Insights from laboratory thermal maturation and organic petrology. *International Journal of Coal Geology*, 2018, vol. 190, pp. 2–28.
 25. Burnham A.K. Porosity and permeability of Green River oil shale and their changes during retorting. *Fuel*, 2017, vol. 203, pp. 208–213.
 26. Tiwari P., Deo M., Lin C.L., Miller J.D. Characterization of oil shale pore structure before and after pyrolysis by using X-ray micro CT. *Fuel*, 2013, vol. 107, pp. 547–554.
 27. Sun L., Tuo J., Zhang M., Wu C., Wang Z. Formation and development of the pore structure in Chang 7 member oil-shale from Ordos Basin during organic matter evolution induced by hydrous pyrolysis. *Fuel*, 2015, vol. 158, pp. 549–557.
 28. Bai F.T., Sun Y.H., Liu Y.M., Guo M.Y. Evaluation of the porous structure of Huadian oil shale during pyrolysis using multiple approaches. *Fuel*, 2017, vol. 187, pp. 1–8.
 29. Nedolivko N., Perevertailo T., Li Cunyi and Abramova R. Specific features of Bazhenov suite sediments in south-eastern Nurolsk sedimentary basin (Tomsk Oblast). *XIX International Scientific Symposium in honor of Academician M.A. Usov «Problems of Geology and Subsurface Development»*. IOP Conf. Series: Earth and Environmental. Science Tomsk, Russia, 6–10 April 2015. Vol. 27, 012014, 6 p.
 30. Nedolivko N.M., Eshova A.V. Lithogenetic deposit types of the Bazhenov formation in the South-Maya local high from core data acquired in the well no. 413 (Tomsk Region). *Geology and mineral resources of Siberia*, 2015, no. 4, pp. 40–47. In Rus.
 31. Predtechenskaya E.A., Zlobina O.N. O veshchestvennom sostave i mekhanizme formirovaniya «promezhutochnogo kollektora» v domanikitakh v zonakh vertikalnoy migratsii flyuidov (na primere bazhenovskoy svity Zapadnoy Sibiri) [Material composition in mechanism of formation of «intermediate header» in Domanic in fluid vertical migration zones]. *5-e Kudryavtsevskie Chteniya: Vserossiyskaya konferentsiya po glubinnomu genezisu nefiti i gaza* [5th Kudryavtsev readings: All-Russian conference on oil and gas deep genesis]. Moscow, 2016. Moscow, TsGE Publ., 17–19 October 2016. 5 p.

Received: 6 October 2018.

Information about the authors

Natalya M. Nedolivko, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Tatyana G. Perevertaylo, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 550.8.053:519.2

ВЛИЯНИЕ РЕПРЕЗЕНТАТИВНОСТИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ НА РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕТОДОМ ДВОЙНОГО КРАГИНГА

Шестаков Валерий Владимирович¹,
valeriy.shestakov@inbox.ru

Степанов Дмитрий Юрьевич²,
stepanovdj70@gmail.com

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

² ООО Научно-аналитический центр «Недра»,
Россия, 634029, г. Томск, ул. Советская, 26.

Актуальность. При решении обратных геофизических задач важное положение занимает задача построения объемных моделей петрофизических параметров. Наибольшие затруднения при разработке методов решения этой задачи определяются неоднородностью реальной геологической среды, а их точность – недостаточностью сетки скважинных наблюдений. Приведен новый метод, отличительной особенностью которого является совместное использование данных наземной сейсморазведки и геофизических исследований скважин. Он опирается на опыт геостатистического подхода и, решая описанные проблемы, использует предположение о том, что сейсмические и скважинные данные, измеренные в пределах одного геологического объекта, могут иметь схожие ковариационные свойства. Вопросы надежности и эффективности метода двойного крагинга ранее не были опубликованы, хотя их исследование требуется для практического применения метода. Одним из первых вопросов здесь является оценка влияния репрезентативности исходных данных.

Цель работы: рассмотреть влияние репрезентативности исходных данных на качество моделирования методом двойного крагинга и возможные пути по разработке количественной меры оценивания репрезентативности.

Объекты: синтезированная модель куба сейсмического атрибута; данные 3D МОГТ и ГИС Конторовичского месторождения Томской области.

Методы: методы теории случайных функций, методы линейной алгебры, статистическое моделирование и вычислительный эксперимент.

Результаты. Аналитически доказано, что при наличии репрезентативной выборки данных ошибка моделирования равна нулю. Аналитически и численно доказано, что при наличии нерепрезентативной выборки скважин ошибка моделирования и множитель Лагранжа прямо пропорциональны весовым коэффициентам данных, недостающих для репрезентативности выборки. На основании этого факта было выдвинуто предположение о том, что множитель Лагранжа может быть использован в качестве меры репрезентативности используемой выборки. Это предположение было проверено на материалах Конторовичского месторождения Томской области, в рамках которого методом двойного крагинга последовательно осуществлялось моделирование с участием трех, пяти и семи скважин. При увеличении выборки от трех до семи скважин наблюдалось снижение величины множителя Лагранжа, что подтвердило правильность предположения.

Ключевые слова:

Статистическое моделирование, сейсмическая разведка, крагинг, петрофизическое моделирование.

Введение

Наиболее эффективным и часто применяемым инструментом исследования земной коры на сегодняшний день является сейсморазведка. Её лидерство обусловлено большой глубиной, густой сетью изученности, а также сравнительно невысокой стоимостью [1, 2]. Все сейсморазведочные методы основаны на регистрации и изучении упругих волн, искусственно возбуждаемых на поверхности земли. Распространяясь в земной коре во всех направлениях, эти волны преодолевают различные неоднородности и претерпевают процессы отражения, преломления и дифракции. В свою очередь, отраженные и преломленные волны, вернувшись к поверхности земли, регистрируются высокочувствительными датчиками – сейсмоприемниками, в виде сейсмограмм. Набор сейсмограмм, зарегистрированных в различных точках поверхности земли, обрабатывается, в результате чего формируются так называемые 2D или 3D сейсмические (геофизи-

ческие) поля [1, 3]. На их основе рассчитываются различные сейсмические атрибуты, необходимые для решения *обратных задач* сейсморазведки [4]: исследование строения земной коры, оценка перспектив нефтегазонасыщенности, картирование мелких ловушек нефти и газа, прогнозирование распространения коллекторов и др.

В число задач, решаемых с помощью сейсморазведочного подхода, также входит задача прогноза петрофизических параметров геологической среды. Эти параметры несут в себе чрезвычайно важную информацию о наличии или отсутствии нефтяных коллекторов и миграции флюидов в геологической среде, ввиду чего измеряются с помощью высокоточных и дорогостоящих каротажных методов, имеющих обобщенное название *Геофизические исследования скважин* (ГИС). ГИС направлены на изучение геологического строения земных недр, а также на измерение некоторых физических параметров пород вдоль стволов скважин

(таких как удельное электрическое сопротивление, радиоактивность, скорость распространения упругих волн и т. д.) [5]. В отличие от сейсмических полей, данные ГИС обычно измеряются на редкой, неравномерной сети и хранятся в виде набора кривых, привязанных к координатам стволов скважин. Однако, т. к. геологическая среда неоднородна и анизотропна, полное описание её петрофизических свойств требует наличия более информативной выборки данных, которую можно получить двумя способами. Первый способ – это бурение скважин по густой сети с дальнейшим проведением геофизических исследований. Его очевидные недостатки: дороговизна и высокая сложность реализации. Второй способ – решение задачи моделирования петрофизических свойств с применением математических методов интерполяции или аппроксимации.

Методы решения данной задачи известны и условно делятся на две группы: первые используются для проведения расчетов только данные ГИС [6], вторые основаны на совместном использовании сейсмических данных и данных ГИС. Эффективность первой группы методов в основном зависит от плотности сети скважин. Вторая группа методов дает существенно лучшие результаты для редкой сети скважин и на текущий момент развивается наиболее активно [7]. Среди методов второй группы выделяют:

- 1) методы прямого пересчета сейсмических атрибутов в параметры ГИС;
- 2) методы, основанные на машинном обучении и (или) нейронных сетях;
- 3) методы геостатистики.

В данной работе приведен краткий обзор преимуществ и недостатков перечисленных методов и анализ результатов моделирования алгоритмом «двойного крагинга», разработанного авторами статьи [8]. В условиях малого количества исходных данных ГИС одним из важных и еще не исследованных вопросов для подобных алгоритмов становится вопрос о репрезентативности исходных данных: её влиянии на точность моделирования и возможности оценки репрезентативности реальных материалов.

Обзор методов построения моделей геологических сред

Методы прямого пересчета сейсмических атрибутов в параметры ГИС в общем случае сводятся к установлению функциональной зависимости между петрофизическим параметром и одним или несколькими сейсмическими атрибутами [9]. Проблема этого подхода заключается в том, что на текущий момент на практике преимущественно используются линейные функции, эффективные в достаточно небольших пределах одного геологического образования. Для моделирования в рамках целого месторождения они неприменимы в связи с тем, что для отдельно взятой глубины и отдельно взятого объекта зависимости между сейсмическими

атрибутами и петрофизическими параметрами разнятся. Вдобавок любую взаимосвязь, как линейную, так и нелинейную, можно установить только в условиях хорошей изученности объекта. В противном случае о качественном моделировании не может быть и речи.

Методы машинного обучения и нейронные сети [1, 7, 9, 10], в отличие от методов прямого пересчета, основаны на минимизации ошибки осуществляемых расчетов, ввиду чего дают лучший результат и позволяют строить более правдоподобные модели. Как алгоритмы машинного обучения, так и нейронные сети для решения задачи прогноза петрофизических параметров обучаются по выборке сейсмических атрибутов. Обучение при этом организовано таким образом, чтобы прогнозные значения петрофизического параметра максимально совпадали с известными реальными аналогами. Основными преимуществами нейронных сетей и машинного обучения являются [11, 12]:

1. Гибкость. Обучение может осуществляться как для отдельно взятого пласта, так и для определенного интервала; с использованием одного или нескольких сейсмических атрибутов и петрофизических параметров.
 2. Высокая скорость расчета прогнозных параметров при наличии уже обученной сети (алгоритма).
- К недостаткам этих методов можно отнести:
- 1) необходимость переобучения для каждого отдельного месторождения, пласта, петрофизического параметра и т. д.;
 - 2) возможность несходности алгоритма обучения для определенного набора входных данных;
 - 3) реализацию аппроксимации, а не интерполяции скважинных данных.

Говоря о недостатках более подробно: первый – несущественен, т. к. влечет за собой лишь увеличение времени расчета и не влияет на качество моделей; второй – может быть компенсирован предварительным отбором исходных данных; третий – приводит к несоответствию реальных и прогнозных значений петрофизических параметров.

Последний недостаток является значимым и может быть устранен лишь с помощью интерполяционных методов, оптимальными из которых считаются *методы геостатистики* [13, 14]. Геостатистика, в общем, представляет собой технологию интерполяции пространственно-распределенных данных, использующую статистические методы. Большинство методов геостатистики базируются на применении вариограмм, которые в свою очередь описывают пространственную корреляцию прогнозируемого поля и рассчитываются в предположении о непрерывности и однородности исследуемого объекта [13]. Последнее некорректно по отношению к геологической среде, ввиду чего в условиях редкой сети данных ГИС применение классических геостатистических методов для прогноза петрофизических параметров приводит к грубому, далекому от реальности результату. Для

описания пространственно-неоднородной модели среды необходимо отказаться от вариограммного анализа данных ГИС и использовать ковариационный анализ сейсмического атрибута в скользящих пространственно-глубинных окнах. В основе такого подхода должно лежать предположение об идентичности или, по крайней мере, близости ковариационных свойств сейсмического атрибута и прогнозируемого параметра, т. к. они измеряются по одному и тому же физическому объекту. Метод, основанный на данных предположениях, разработан авторами статьи и реализован в виде алгоритма, описание которого излагается ниже.

Алгоритм двойного крагинга

В качестве базового уравнения геостатистика использует уравнение крагинга, которое в рамках рассматриваемой задачи может быть записано следующим образом [13]:

$$\hat{F}(x, y, z) = \sum_{i=1}^N w_i(x, y, z) f_i(z), \quad (1)$$

где x, y, z – пространственные координаты; $w_i(x, y, z)$ – весовая функция i -й скважины; $f_i(z)$ – известные кривые параметра ГИС в i -й скважине; $\hat{F}(x, y, z)$ – прогнозируемое значение параметра ГИС; N – количество скважин.

Минимальный средний квадрат ошибки решения уравнения (1) обеспечивается требованием

$$M[(F(x, y, z) - \hat{F}(x, y, z))^2] \rightarrow \min, \quad (2)$$

а несмещенность оценки – ограничением

$$\sum_{i=1}^N w_i(x, y, z) = 1, \quad (3)$$

где $F(x, y, z)$ – истинное значение параметра ГИС [13]. Анализ (2) в произвольной точке (x, y, z) приводит к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно неизвестных весовых функций:

$$C^f(z)W(x, y, z) = C^F(x, y, z), \quad (4)$$

где $C^f(z)$ – матрица ковариационных функций $C_{ij}^f(z) = M[f_i(z)f_j(z)]$ известных кривых ГИС; $W(x, y, z)$ – матрица весовых функций; $C^F(x, y, z)$ – матрица ковариационных функций $c_{ij}^F(x, y, z) = M[f_i(z)F(x, y, z)]$ известных кривых ГИС с параметром ГИС в точке прогноза (x, y, z) . Основная проблема геостатистического подхода заключается в необходимости моделирования $C^F(x, y, z)$ правой части системы (4), априори известной только в точках скважин.

В классическом крагинге предполагается, что прогнозируемое поле удовлетворяет условию однородности второго рода, т. е. ковариационные функции могут быть описаны функциями расстояний, а не координат. Это предположение позволяет проводить статистический анализ пространственной зависимости известных данных и использовать вместо ковариационных функций вариацию разницы значений прогнозируемого параметра,

зависящую только от удаленности точек поля [7, 8]. Однако переход от ковариации к вариации приводит к потере информации о пространственной неоднородности моделируемого объекта.

Такой подход можно не применять, если привлечь к моделированию данные наземной сейсморазведки $S(x, y, z)$, охватывающие густой сетью наблюдений прогнозируемую площадь среды. Аналогично (1) построим уравнением крагинга статистическую модель сейсмического атрибута по данным, измеренным только вблизи скважин:

$$\hat{S}(x, y, z) = \sum_{i=1}^N w_i^0(x, y, z) S_i(z), \quad (5)$$

где $w_i^0(x, y, z)$ – весовая функция сейсмического атрибута в точке i -й скважины; $S_i(z) = S(x, y, z)$ – кривая сейсмического атрибута вблизи точки i -й скважины; $\hat{S}(x, y, z)$ – прогнозируемое значение атрибута.

Для использования модели (5) необходимо принять предположение, что ковариационные свойства, как свойства внутренней изменчивости или взаимосвязи, сейсмических данных $S(x, y, z)$ и ковариационные свойства прогнозируемого параметра $F(x, y, z)$ идентичны, или хотя бы близки, т. к. измерены по одному и тому же объекту. Это позволяет утверждать, что система (4) в произвольной точке (x, y, z) будет эквивалентна системе, построенной на данных сейсморазведки [8]:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^N w_j^0(x, y, z) c_{ij}(z) + \mu(x, y, z) = \\ = c_{i0}(x, y, z), \quad i = \overline{1, N}, \\ \sum_{j=1}^N w_j^0(x, y, z) = 1, \end{cases} \quad (6)$$

где $c_{ij}(z) = M[S_i(z)S_j(z)]$ – ковариации сейсмического атрибута в точках скважин с координатами (x, y_i) и (x, y_j) на глубине z ; $c_{i0}(x, y, z) = M[S_i(z)S(x, y, z)]$ – ковариации сейсмического атрибута в точках скважин и в точке прогноза; $\mu(x, y, z)$ – множитель Лагранжа. Или в матричной форме:

$$C(z)W^0(x, y, z) = C^0(x, y, z),$$

где

$$C(z) = \begin{pmatrix} c_{11}(z) & \cdots & c_{1N}(z) & 1 \\ c_{21}(z) & \cdots & c_{2N}(z) & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ c_{N1}(z) & \cdots & c_{NN}(z) & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & 0 \end{pmatrix},$$

$$W^0(x, y, z) = \begin{pmatrix} w_1^0(x, y, z) \\ w_2^0(x, y, z) \\ \vdots \\ w_N^0(x, y, z) \\ \mu(x, y, z) \end{pmatrix},$$

$$C^0(x, y, z) = \begin{pmatrix} c_{10}(x, y, z) \\ c_{20}(x, y, z) \\ \vdots \\ c_{N0}(x, y, z) \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Хотя сейсмическое поле является неоднородным и нестационарным процессом, ранее было показано, что $S(x, y, z)$ в любой точке пространства является импульсным случайным процессом, для которого условие локальной стационарности допустимо в пределах длины волны λ [15]. Поэтому ковариацию можно вычислять путем осреднения в скользящем глубинном окне

$$c_{ij}(z) = M[S(x_i, y_i, z)S(x_j, y_j, z)] = \frac{1}{\lambda} \int_{z-\lambda/2}^{z+\lambda/2} S(x_i, y_i, \tau)S(x_j, y_j, \tau) d\tau.$$

Теперь, если сейсмические данные определены в точке прогноза, правая часть системы (6) определяется по реальным данным и моделирование ковариационных свойств не требуется.

Отметим, что область значений весовых коэффициентов в системах (4), (6) ничем не ограничена, что на практике приводит в отдельных областях к появлению «физически нереального» результата: $\hat{F}(x, y, z)$ приобретает значения, не входящие в область допустимых. Например, известно, что кажущаяся удельная проводимость, измеряемая индукционным каротажем (ИК), интенсивность естественного γ -излучения по гамма-каротажу (ГК), коэффициент пористости не могут иметь отрицательные значения [5]. Для учета подобных ограничений необходимо наложить дополнительное ограничение на все весовые коэффициенты:

$$w_i^0(x, y, z) \geq 0. \quad (7)$$

Очевидно, что при одновременном соблюдении (3) и (7) результат суммирования (1) не будет превышать пределов, определенных значениями исходных данных. Ввиду того, что (7) представляет собой неравенство, в явном виде добавить его в систему (6) невозможно. Поэтому поиск решения необходимо осуществлять итерационно с исключением из системы строк и столбцов тех слагаемых, которым соответствуют отрицательные весовые коэффициенты.

В случае нетривиального решения системы (6), согласно методу Крамера [16], неизвестные СЛАУ могут быть найдены с помощью определителя основной матрицы и определителя матрицы C_i , в которой i -й столбец заменен на столбец свободных членов

$$w_i^0(x, y, z) = \frac{\det(C_i)}{\det(C)}, \quad \mu(x, y, z) = \frac{\det(C_{N+1})}{\det(C)}.$$

В случае, когда прогнозная точка совпадает с k -й точкой скважины, столбец свободных членов будет совпадать с k -м столбцом основной матрицы

$c_{i0}(z) = c_{ik}(z)$ и, следовательно, $\det(C_k) = \det(C)$, а $\det(C_i) = 0$ для $\forall i \neq k$. Из чего следует, что решением будут являться $w_k^0(x_k, y_k, z) = 1$ и $w_i^0(x_k, y_k, z) = 0$ для $\forall i \neq k$, $\mu(x_k, y_k, z) = 0$. Подставляя полученное решение в формулу (1), получаем что $\hat{F}(x_k, y_k, z) = w_k^0(x_k, y_k, z)f_k(z) = f_k(z)$ в точках скважин прогнозное значение будет точно совпадать с заданным.

Вне точек скважин расхождение параметров реальной среды и прогнозной модели определяется двумя основными факторами: множество известных данных ГИС не является репрезентативным, и статистические свойства сейсмического атрибута не отражают в полной мере свойства прогнозного параметра. В данной работе рассматривается влияние только первого фактора. Репрезентативным множеством данных будем называть такое множество минимального объема, по которому можно с заданной точностью восстановить параметры среды в любой точке их линейной комбинацией (1).

Исследование алгоритма

По аналогии с анализом ошибок краинга можно привести дисперсию прогнозного значения [13, 14]:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{ок}}^2(x, y, z) &= M[(S_0(x, y, z) - \hat{S}(x, y, z))^2] = \\ &= \psi_s^2(x, y, z) - 2 \sum_{i=1}^N w_i(x, y, z)c_{0i}(x, y, z) + \\ &+ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N w_i(x, y, z)w_j(x, y, z)c_{ij}(x, y, z) = \\ &= \psi_s^2(x, y, z) - 2 \sum_{i=1}^N w_i(x, y, z)c_{0i}(x, y, z) + \\ &+ \sum_{i=1}^N w_i(x, y, z)c_{0i}(x, y, z) - \mu(x, y, z) = \\ &= \psi_s^2(x, y, z) - \sum_{i=1}^N w_i^0(x, y, z)c_{0i}(x, y, z) - \\ &- \mu(x, y, z), \end{aligned} \quad (8)$$

где $\psi_s^2(x, y, z)$ – вариация прогнозируемого поля. Второе слагаемое определяет взвешенную сумму ковариаций прогнозной точки и исходных данных и показывает, что ошибка прогнозирования будет меньше в тех точках, где существует ковариационная зависимость с известными данными. Значение третьего слагаемого – множителя Лагранжа – в литературных источниках не приводится и, как написано в [8], «само по себе интереса не представляет». При использовании геостатистических алгоритмов краинга ошибка (8) равна нулю только в точках, где определены скважины [14, 17]. В межскважинном пространстве величина $\sigma_{\text{ок}}^2$ определяется выбранной моделью вариограммы и, как правило, растет с удалением от скважин.

Для анализа ошибок алгоритма двойного краинга рассмотрим решение системы (6) в фиксированной точке (x_0, y_0, z_0) и примем общую статистическую модель сейсмических наблюдений в виде

линейной комбинации известных N значений, M неизвестных значений и случайного шума:

$$S_0(z) = I(z) + Q(z) + \eta(z) = \sum_{i=1}^N v_i S_i(z) + \sum_{j=1}^M v_j S_j(z) + \eta(z),$$

где $I(z)$ и $Q(z)$ – соответственно, известная и неизвестная составляющие; $\eta(z)$ – случайная составляющая модели. В данной работе примем, что между значениями сейсмического атрибута $S_i(z)$, между $S_i(z)$, между $S_i(z)$ и $S_j(z)$ может существовать корреляционная связь, но их совокупность представляет собой линейно-независимое множество. Актуальным и первым вопросом при исследовании метода является вопрос о репрезентативности исходных данных. В рамках описанной выше модели этот вопрос может быть перефразирован как вопрос о наличии или отсутствии неизвестной составляющей $Q(z)$. Поэтому в качестве первой модели исследования примем абстрактную ситуацию, когда все слагаемые модели известны, а случайная составляющая отсутствует (*модель репрезентативная*):

$$S_r(z) = \sum_{i=1}^N v_i S_i(z), \quad \sum_{i=1}^N v_i = 1,$$

где $S_r(z)$ – значение сейсмического атрибута в прогнозной точке; $S_i(z)$ – значение сейсмического атрибута в точке i -й скважины ($i=1, \dots, N$); v_i – вес i -го значения. Вариация первой модели

$$\psi_r^2 = M[S_r^2(z)] = \sum_{i=1}^N v_i \sum_{j=1}^N v_j M[S_i(z)S_j(z)] = \sum_{i=1}^N v_i \sum_{j=1}^N v_j c_{ij}. \quad (9)$$

Для такой модели элементы матрицы свободных членов C^0 представляются в виде линейной комбинации элементов основной матрицы (8):

$$\begin{aligned} c_{10} &= M[S_1(z)S_r(z)] = v_1 c_{11} + v_2 c_{12} + \dots + v_N c_{1N}, \\ c_{20} &= M[S_2(z)S_r(z)] = v_1 c_{21} + v_2 c_{22} + \dots + v_N c_{2N}, \\ &\vdots \\ c_{N0} &= M[S_N(z)S_r(z)] = v_1 c_{N1} + v_2 c_{N2} + \dots + v_N c_{NN}. \end{aligned} \quad (10)$$

Соответственно, матрицы C_i ($i=1, \dots, N$) с учетом условия нормирования весовых коэффициентов будут иметь вид

$$C_i = \begin{pmatrix} c_{11} & \dots & v_1 c_{11} + \dots + v_n c_{1N} & \dots & c_{1N} & 1 \\ c_{21} & \dots & v_1 c_{21} + \dots + v_n c_{2N} & \dots & c_{2N} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ c_{N1} & \dots & v_1 c_{N1} + \dots + v_n c_{NN} & \dots & c_{NN} & 1 \\ 1 & \dots & v_1 + \dots + v_n & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Учитывая, что определитель матрицы – это полилинейная функция строк или столбцов [18], определитель матрицы (11) можно разложить в виде следующей суммы:

$$\det(C_i) = v_1 \cdot 0 + v_2 \cdot 0 + \dots$$

$$\dots + v_i \det(C) + \dots + v_N \cdot 0 = v_i \det(C).$$

Анализируя матрицу C_{N+1} аналогичным способом, можно показать, что $\det(C_{N+1})=0$. Следовательно, в соответствии с формулами (10), решением СЛАУ (6) будут являться весовые коэффициенты принятой модели и нулевой множитель Лагранжа:

$$w_i^0(x_0, y_0, z_0) = v_i \frac{\det(C)}{\det(C)} = v_i, \quad \mu(x_0, y_0, z_0) = 0. \quad (12)$$

Таким образом, если для прогнозируемой точки (x_0, y_0, z_0) известные данные представляют собой репрезентативную выборку, ошибка оценивания с учетом (9), (10), (12) оказывается нулевой:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{OK}}^2(x_0, y_0, z_0) &= \psi_r^2(z_0) - \sum_{i=1}^N v_i c_{i0}(z_0) = \psi_r^2(z_0) - \sum_{i=1}^N v_i \sum_{j=1}^N v_j c_{ij} = 0. \end{aligned}$$

Во второй модели исследования предположим, что сейсмический атрибут является линейной комбинацией не только известных значений, но и одного неизвестного слагаемого (*модель нерепрезентативная*):

$$S_u(z) = \sum_{i=1}^N v_i S_i(z) + v_{N+1} S_{N+1}(z), \quad \sum_{i=1}^{N+1} v_i = 1,$$

где $S_u(z)$ – значение сейсмического атрибута в прогнозной точке; $S_{N+1}(z)$ и v_{N+1} – неизвестное значение сейсмического атрибута и его вес. Вариация второй модели

$$\begin{aligned} \psi_u^2 &= M[S_u^2(z)] = \sum_{i=1}^N v_i \sum_{j=1}^N v_j M[S_i(z)S_j(z)] + \\ &+ v_{N+1} \sum_{i=1}^N v_i M[S_i(z)S_{N+1}(z)] = \\ &= \sum_{i=1}^N v_i \left(\sum_{j=1}^N v_j c_{ij} + v_{N+1} c_{iN+1} \right). \end{aligned}$$

Проводя далее аналогичный анализ матриц C_i , C_{N+1} и C_0 получим следующее решение:

$$\begin{aligned} w_i^0(x_0, y_0, z_0) &= v_i + v_{N+1} \frac{\det(C_i)}{\det(C)}, \\ \mu(x_0, y_0, z_0) &= v_{N+1} \frac{\det(C_{N+1})}{\det(C)}. \end{aligned} \quad (13)$$

Таким образом, если для прогнозируемой точки (x_0, y_0, t_0) известные данные представляют собой нерепрезентативную выборку:

- найденные весовые функции отличаются от модельных аддитивной добавкой, пропорциональной весовому коэффициенту неизвестного значения;
- множитель Лагранжа отличен от нуля и прямо пропорционален весовому коэффициенту неизвестного значения.

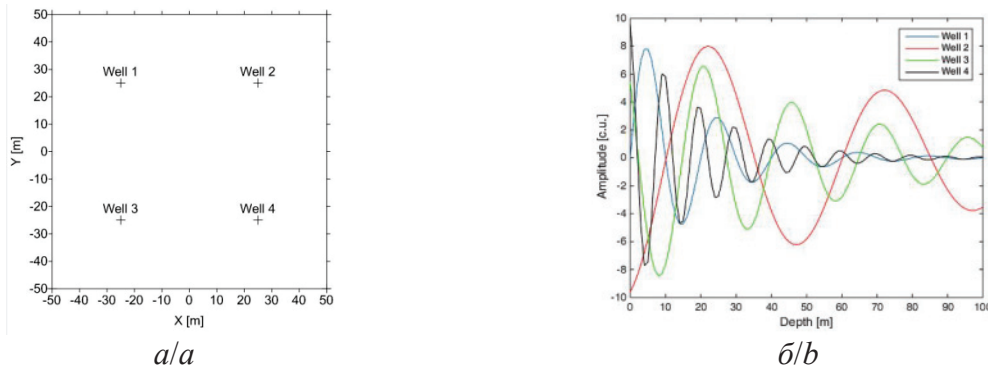


Рис. 1. Расположение модельных скважин на плоскости (а) и модельные значения сейсмического атрибута $S_i(z)$ в точках скважин (б)

Fig. 1. Model wells location in the plane (a) and seismic attribute model values $S_i(z)$ at the wells points (b)

Ошибка оценивания также становится отличной от нуля

$$\begin{aligned} \sigma_{OK}^2(x_0, y_0, t_0) &= \sum_{i=1}^N v_i \left(\sum_{j=1}^N v_j c_{ij} + v_{N+1} c_{iN+1} \right) - \\ &- \sum_{i=1}^N \left(v_i + v_{N+1} \frac{\det(U_i)}{\det(C)} \right) c_{i0}(t_0) - \mu(x_0, y_0, z_0) = \\ &= \sum_{i=1}^N v_i \left(\sum_{j=1}^N v_j c_{ij} + v_{N+1} c_{iN+1} \right) - \\ &- \sum_{i=1}^N \left(v_i + v_{N+1} \frac{\det(U_i)}{\det(C)} \right) \left(\sum_{j=1}^N v_j c_{ij} + v_{N+1} c_{iN+1} \right) - \\ &- \mu(x_0, y_0, z_0) = -\mu(x_0, y_0, z_0) - \\ &- \frac{v_{N+1}}{\det(C)} \sum_{i=1}^N \det(C_i) \left(\sum_{j=1}^N v_j c_{ij} + v_{N+1} c_{iN+1} \right) \end{aligned}$$

и прямо пропорциональна весовому коэффициенту неизвестного значения, определяется множителем Лагранжа и ковариациями не только известных значений, но и неизвестного значения с известными.

Численное исследование полученных соотношений проводилось на синтезированной модели сейсмических данных. В ограниченной пространственной области (100×100×100 м) было определено положение четырех вертикальных скважин (рис. 1, а). Значение сейсмического атрибута в скважинах моделировалось импульсом Берлаге с различными параметрами (рис. 1, б) [19]. Весовые функции каждой скважины $v_i(x, y)$ определялись численно из условий равенства единице в точке скважины и существования области нулевых весов – областей, где i -я скважина не участвует в моделировании (пример на рис. 3, а, в и 4, а). Куб сейсмических данных моделировался путем весового суммирования модельных значений атрибута всех четырех скважин на сетке 1×1 м (рис. 2):

$$S(x, y, z) = \sum_{i=1}^4 v_i(x, y) S_i(z).$$

Решение обратной задачи опиралось на предположение о наличии только трех скважин: № 2–4.

Скважина № 1 с координатами [–25; 25], расположенная в левой верхней части модели, считалась за неизвестную. Для каждой точки пространства решалась система (6). Примеры результатов расчета весовых коэффициентов представлены на рис. 3, б, в. Как и следовало ожидать, согласно (13), искажения оценок весовых функций наблюдаются в области, где наибольшее влияние имела первая скважина, и наоборот – в области, где первая скважина имела нулевой вес, весовые функции восстановлены точно.

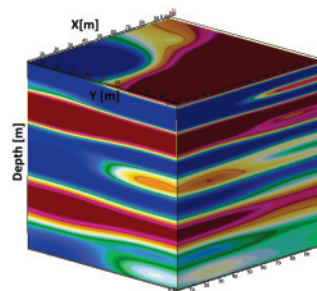


Рис. 2. Экспериментальная модель куба сейсмического атрибута

Fig. 2. Experimental model of the seismic attribute cube

Далее для определения ошибки моделирования проводилось создание куба сейсмического атрибута по оценкам весовых функций согласно (6):

$$\hat{S}(x, y, z) = \sum_{i=2}^4 w_i^0(x, y) S_i(z)$$

и вычисление дисперсии моделирования [20]

$$\sigma_{OK}(x, y) = \int_0^{100} (S(x, y, z) - \hat{S}(x, y, z))^2 dz.$$

Для сопоставления полученные распределения вынесены на рис. 4. Из рисунка видно, что в зонах, где вес $v_1(x, y) = 0$ (зона репрезентативности выборки из трех скважин № 2, 3, 4) множитель Лагранжа и ошибка моделирования равны нулю. В зонах, где вес $v_1(x, y) \neq 0$ (зона нерепрезентативности выборки из трех скважин), вес $v_1(x, y)$, множитель Лагранжа и ошибка моделирования имеют одинаковый характер распределения.

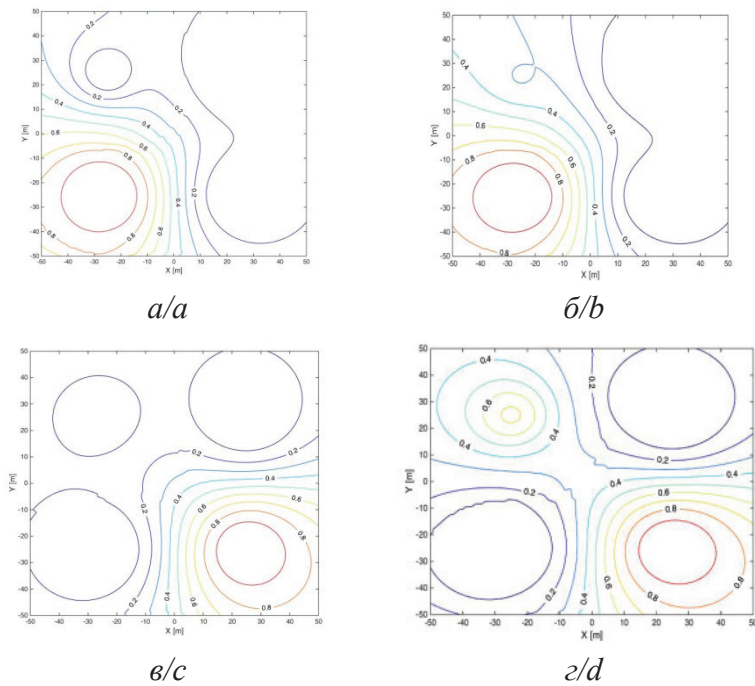


Рис. 3. Модельные весовые функции $v_3(x,y)$ (а), $v_4(x,y)$ (в) и оценки весовых функций $v_3^0(x,y)$ (б), $v_4^0(x,y)$ (г)
 Fig. 3. Model weight functions $v_3(x,y)$ (a), $v_4(x,y)$ (c) and estimates of weight functions $v_3^0(x,y)$ (b), $v_4^0(x,y)$ (d)

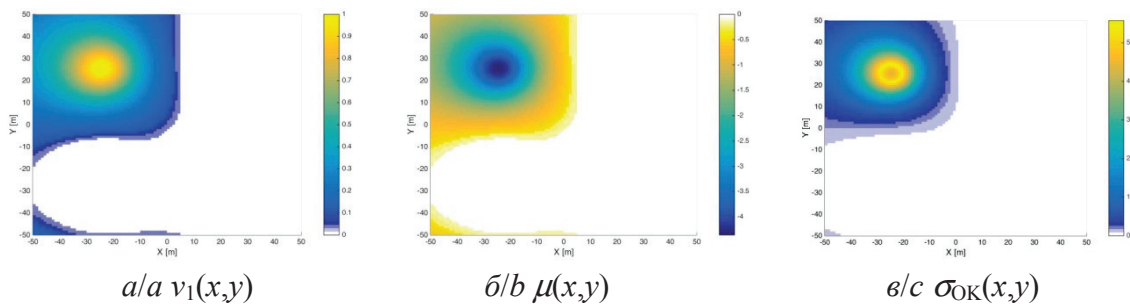


Рис. 4. Модельная весовая функция неизвестных данных (а), множитель Лагранжа (б) и дисперсия моделируемого куба (в)
 Fig. 4. Model weight function of unknown data (a), the Lagrange multiplier (b) and the variance of the simulated cube (c)

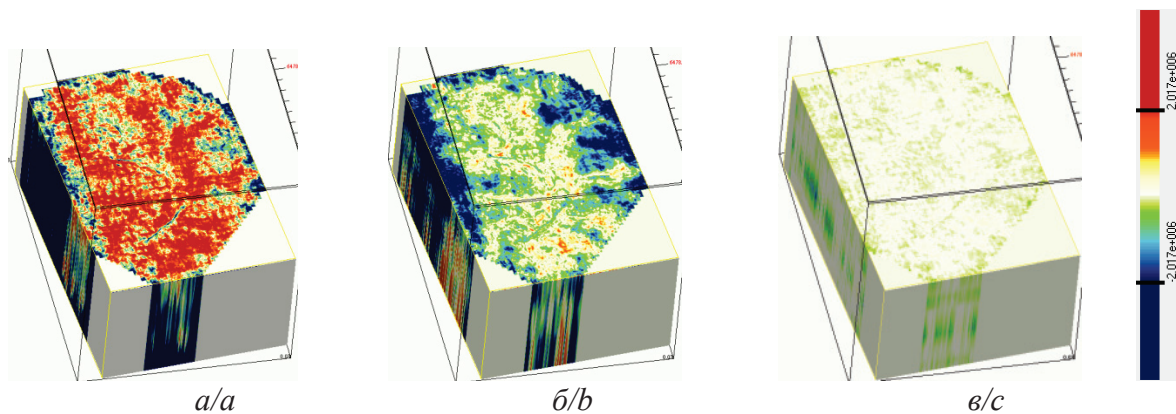


Рис. 5. Срез куба множителя Лагранжа $\mu(x,y,z)$ на уровне подошвы Баженовской свиты при моделировании по трем скважинам (а), пяти скважинам (б) и семи скважинам (в). Конторовичское месторождение Томской области (с разрешения ООО «Томскгеонефтегаз»)

Fig. 5. Cut of the Lagrange multiplier cube at the bottom level of the Bazhenovskaya formation when simulating three wells (a), five wells (b) and seven wells (c). Kontorovichskoe deposit of the Tomsk region (with the permission of ООО Tomskgeoneftegaz)

Таким образом, множитель Лагранжа можно считать мерой оценки репрезентативности исходного набора данных, т. е. их достаточности для моделирования в конкретной точке. Данное заключение было проверено на материалах 3D МОГТ Конторовичского месторождения Томской области, на территории которого пробурено семь скважин. В качестве сейсмического атрибута использовалась форма импульса волны, отраженной от подошвы Баженовской свиты, после специальных процедур повышения разрешенности сейсмической записи. Решение системы (6) искалось три раза. На первом этапе использовались данные только трех скважин (рис. 5, а). Множитель Лагранжа оказался близок по модулю к дисперсии исходных данных практически во всей анализируемой области, за исключением небольших узких зон, и показал нерепрезентативность такого набора. На втором этапе в систему (6) были добавлены две скважины, расположенные в центральной части площади (рис. 5, б), что привело к существенному снижению значения множителя Лагранжа не только вблизи скважин, но и на значительном удалении от них. На третьем этапе при моделировании использовались все семь скважин площади (рис. 5, в) – значение множителя Лагранжа по всей площади оказалось по модулю намного ниже дисперсии исходных данных и свидетельствует о репрезентативности этого набора скважин и достижении удо-

влетворительного качества моделирования практически во всем анализируемом объеме.

Заключение

Рассмотрены вопросы применения алгоритма двойного краинга при моделировании петрофизических свойств среды по данным ГИС и наземной сейсморазведки. Показано, что данный алгоритм относится к классу интерполяционных и, в отличие от известных геостатистических методов, опирается на неоднородную модель среды. Анализ ошибок прогнозирования параметра среды на моделях репрезентативной и нерепрезентативной выборки показал, что:

- в зонах, где исходные данные являются репрезентативными, ошибка моделирования методом двойного краинга будет равна нулю вне зависимости от удаления от скважин;
- «неинтересный» в теории геостатистики множитель Лагранжа прямо пропорционален весовой функции неизвестных данных и может быть использован в качестве меры оценки репрезентативности исходных данных.

Полученные выводы проверены на синтезированной модели сейсмического атрибута и материалах 3D МОГТ Конторовичского месторождения Томской области. Точность моделирования алгоритма двойного краинга будет определяться не столько плотностью и объемом исходных данных, сколько их репрезентативностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воскресенский Ю.Н. Полевая геофизика – М.: Недра, 2010. – 479 с.
2. Ермаков А.П. Введение в сейсморазведку. – Тверь: Изд-во ГЕРС, 2012. – 160 с.
3. Сейсморазведка. Справочник геофизика / под ред. И.И. Гурвича, В.П. Номоконова. – М.: Недра, 1981. – 464 с.
4. Кузнецов В.И. Элементы объемной (3D) сейсморазведки. 2-е изд. с изм. – Уфа: Инфореклама, 2012. – 272 с.
5. Косков В.Н., Косков Б.В. Геофизические исследования скважин и интерпретация данных ГИС. – Пермь, Перм. гос. техн. ун-т., 2007. – 304 с.
6. Беляков Е.О., Мухидинов Ш.В. Использование обобщенных зависимостей для построения петрофизических моделей фильтрационно-емкостных свойств с оценкой граничных параметров выделения коллекторов и определения их характера насыщенности // Петрофизика сложных коллекторов: проблемы и перспективы 2015; Сборник статей / сост. Б.Н. Еникеев. – М.: ООО «EAGE Геомодель», 2015. – 383 с.
7. Seismic-guided estimation of log properties (P. 3: A controlled study) / Ph.S. Shultz, Sh. Ronen, M. Hattori, Ch. Corbett // The leading Edge. – 1994. – V. 13. – Iss. 5. – P. 305–310.
8. Shestakov V.V., Ssolyatina G.A., Stepanov D.Ju. Three-dimensional models of geoenvironmental parameters // Advances in computer science research. – 2016. – V. 51: Information technologies in science, management, social sphere and medicine (ITSMSSM 2016). – P. 126–129.
9. Hampson D., Schuelke J., Quirein J. Use of Multi-Attribute Transforms to Predict Log Properties from Seismic Data // Geophysics. – 2001. – V. 66 (1). – P. 220–236.
10. Лаврик А.С., Логинов Д.В., Ванярхо М.А. Применение нейросетей для прогнозирования пористости в 3D кубах (расчет по сейсмическим атрибутам и каротажным данным) // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2012. – № 01 (39). – С. 54–57.
11. Samui P., Roy S.S., Balas V.E. Handbook of Neural Computation. – London: Academic press, 2017. – 631 p.
12. Bonaccorso G. Machine Learning Algorithms. – United Kingdom, Birmingham: Packt Publishing Ltd, 2017. – 333 p.
13. Matheron G. Traité de géostatistique appliquée. – Paris, France: Editions BGRM, 1962. – 460 p.
14. Демьянов В.В., Савельева Е.А. Геостатистика: теория и практика. – М.: Наука, 2010. – 328 с.
15. Степанов Д.Ю., Яппарова Е.А. Разрешающая способность и параметры веерной фильтрации при обработке сейсмических волновых полей // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 5. – С. 17–22.
16. Demmel J.W. Applied Numerical Linear Algebra. – California, Berkeley: University of California, 1997. – 435 p.
17. Ковалевский Е.В. Геологическое моделирование на основе геостатистики. – М.: EAGE, 2011. – 117 с.
18. Ильин В.А., Позняк Э.Г. Линейная алгебра. – М.: Наука, 1999. – 297 с.
19. Митрофанов Г.М. Обработка и интерпретация геофизических данных. – Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2017. – 168 с.
20. Rasch D., Schott D. Mathematical Statistics. – USA: John Wiley & Sons, 2017. – 672 p.

Поступила 10.11.2018 г.

Информация об авторах

Шестаков В.В., аспирант Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Степанов Д.Ю., кандидат технических наук, заместитель директора по науке ООО Научно-аналитический центр «Недра».

UDC 550.8.053:519.2

INFLUENCE OF INITIAL DATA REPRESENTATION ON THE RESULTS OF SIMULATION BY DOUBLE KRIGING METHOD

Valery V. Shestakov¹,
valeriy.shestakov@inbox.ru

Dmitry Yu. Stepanov²,
stepanovdj70@gmail.com

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

² Scientific Analytic Center «Nedra»,
26, Sovetskaya street, Tomsk, 634029, Russia.

The relevance. When solving inverse geophysical problems, the important task is to construct petrophysical parameters volumetric models. The greatest difficulties in developing the methods for solving this problem are determined by the inhomogeneity of the real geological environment, and their accuracy is defined by the inadequacy of the borehole observations grid. This article presents a new method, the distinguishing feature of which is the joint use of seismic exploration and well logging data. It is based on the geostatistical approach experience and solving the described problems uses the assumption that seismic and borehole data measured within a single geological object can have similar covariance properties. The reliability and effectiveness of the double kriging method have not been previously published, although their research is required for application of the method. One of the first questions here is to assess the impact of the input data representativeness.

The main aim is to consider the influence of the input data representativeness on the modeling quality by the double kriging method and possible ways of developing a quantitative measure of the representativeness estimation.

Objects: model of the seismic attribute cube; 3D CDP and GWL data of the Kontorovichsky Tomsk region deposit.

Methods: theory of random processes, methods of linear algebra, statistical modelling and simulation experiment.

Results. The authors have proved analytically that using the representative data sample entails a simulation error equal to zero. They proved analytically and practically that in the presence of an unrepresentative data sample, the simulation error and the Lagrange multiplier are directly proportional to the weight coefficients of the lacking data. On the basis of this fact, it was suggested that the Lagrange multiplier can be used as a measure of the used sample representativeness. This suggestion was practically verified on the Kontorovichskoye field materials of the Tomsk region, within the framework of which a simulation by double kriging method was carried out using three, five and seven wells. With the increase in the sample from three to seven wells, the value of the Lagrange multiplier was decreased, which confirmed the correctness of the proposed assumption.

Key words:

Statistical modelling, seismic exploration, kriging, petrophysical modeling.

REFERENCES

1. Voskresensky Yu.N. *Polevaya geofizika* [Field geophysics]. Moscow, Nedra Publ., 2010. 479 p.
2. Ermakov. A.P. *Vvedenie v seysmorazvedku* [Introduction to seismic exploration]. Tver, GERS Publ. house, 2012. 160 p.
3. Gurvich I.I., Nomokonov V.P. *Seysmorazvedka. Spravochnik geofizika* [Seismic exploration. Reference book of geophysics]. Moscow, Nedra Publ., 1981. 464 p.
4. Kuznetsov V.I. *Elementy obemnoy (3D) seysmorazvedki* [Elements of three-dimensional (3D) seismic survey]. 2nd ed. Ufa, Inforeklama Publ., 2012. 272 p.
5. Koskov V.N., Koskov B.V. *Geofizicheskie issledovaniya skvazhin i interpretatsiya dannykh GIS* [Geophysical well logging and interpretation of GWL data]. Perm, Perm State University Publ., 2007. 304 p.
6. Belyakov E.O., Muhidinov. Sh.V. *Ispolzovanie obobshchennykh zavisimostey dlya postroeniya petrofizicheskikh modeley filtratsionno-emkostnykh svoystv s otsenkoy granichnykh parametrov vydeleniya kollektorov i opredeleniya ikh kharaktera nasyshtchenosti* [Use of generalized dependencies for petrophysical models construction of filtration-capacitive properties with estimation of the boundary parameters of the reservoirs separation and their saturation character determination]. *Petrofizika slozhnykh kollektorov: problem i perspektivy* [Petrophysics of complex reservoirs: problems and prospects]. Compiler B.N. Enikeev. Moscow, EAGE Geomodel Publ., 2015. 383 p.
7. Shultz Ph.S., Ronen Sh., Hattori M., Corbett Ch. Seismic-guided estimation of log properties (P. 3: A controlled study). *The Leading Edge*, 1994, vol. 13, Iss. 5, pp. 305–310.
8. Shestakov V.V., Sysolyatina G.A., Stepanov D.Ju. Three-dimensional models of geoenvironmental parameters. *Advances in computer science research*, 2016, vol. 51: Information technologies in science, management, social sphere and medicine (ITSMSSM 2016), pp. 126–129.
9. Hampson D., Schuelke J., Quirein J. Use of Multi-Attribute Transforms to Predict Log Properties from Seismic Data. *Geophysics*, 2001, vol. 66 (1), pp. 220–236.
10. Lavrik A.S., Loginov D.V., Vanyarho M.A. *Primenenie neyrosetey dlya prognozirovaniya poristosti v 3D kubakh (raschet po seysmicheskim atributam i karotazhnym dannym)* [Application of neural networks to predict porosity in 3D cubes (calculation by seismic attributes and log data)]. *Instruments and systems of exploration geophysics*, 2012, vol. 1 (39), pp. 54–57.
11. Samui P., Roy S.S., Balas V.E. *Handbook of Neural Computation*. London, Academic press, 2017. 631 p.
12. Bonaccorso G. *Machine Learning Algorithms*. United Kingdom, Birmingham, Packt Publishing Ltd, 2017. 333 p.
13. Matheron G. *Traité de géostatistique appliquée* [Treatise of applied geostatistical]. Paris, France, BGRM Publ., 1962. 460 p.
14. Demyanov V.V., Saveleva E.A. *Geostatistika: teoriya i praktika* [Geostatistics: theory and practice]. Moscow, Nauka Publ., 2010. 328 p.

15. Stepanov D.Yu., Yapparova E.A. Resolving power and the parameters of fan filtration during processing of seismic wave fields. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2008, vol. 5, no. 5, pp. 17–22.
16. Demmel J.W. *Applied Numerical Linear Algebra*. California, Berkeley, University of California, 1997. 435 p.
17. Kovalevskiy E.V. *Geologicheskoe modelirovanie na osnove geostatistiki* [Geological modeling based on geostatistics]. Moscow, EA-GE Publ., 2011. 117 p.
18. Ilin V.A., Poznyak E.G. *Lineynaya algebra* [Linear algebra]. Moscow, Nauka Publ., 1999. 297 p.
19. Mitrofanov G.M. *Obrabotka i interpretatsiya geofizicheskikh dannykh* [Processing and interpretation of geophysical data]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2017. 168 p.
20. Rasch D., Schott D. *Mathematical Statistics*. USA, John Wiley & Sons, 2017. 672 p.

Received: 10 November 2018.

Information about the authors

Valery V. Shestakov, graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Dmitry Yu. Stepanov, Cand. Sc., deputy director for Science, Scientific Analytic Center «Nedra».

УДК 629.78:630.52:587/588:528.88

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПРИПОСЕЛКОВЫХ КЕДРОВНИКОВ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Пасько Ольга Анатольевна¹,
oap@tpu.ru

Токарева Ольга Сергеевна¹,
ost@tpu.ru

Алшаиби Ахмед Джамал Абдулрахман^{1,2},
ahmedalshaiiby88@gmail.com

Черникова Татьяна Юрьевна¹,
chernikova@green.tsu.ru

Кабраль Педро³,
pcabral@novaims.unl.pt

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

² Главное управление образования Диялы,
Ирак, 32001, г. Бакуба, пр. Альмухафада, 1.

³ Лиссабонский университет,
Португалия, г. Лиссабон, 1070–312.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью получения объективной, в т. ч. ретроспективной, информации о состоянии ценных лесных массивов, являющихся ботаническими памятниками природы, для организации их охраны от пожаров, болезней и вредителей.

Цель: мониторинг состояния припоселковых кедровников на примере Томской области с использованием методов наземного обследования и данных дистанционного зондирования Земли.

Объекты: 13 припоселковых кедровников, которые являются особо охраняемыми территориями, относятся к лесничествам филиала ОГУ «Томское управление лесами» Томской области и расположены на землях лесного фонда.

Методы: тематическое картирование территории; расчет показателя количества фотосинтетически активной биомассы NDVI (Normalize Difference Vegetation Index) по космическим снимкам среднего пространственного разрешения (30 м) со спутников Landsat 5 (камера TM), 7 (камера ETM+) и 8 (камера OLI), полученных в период с 2002 по 2015 гг. из архива Геологической службы США с использованием интернет-сервиса Earth Explorer; пространственный анализ данных с использованием геоинформационных технологий; статистическая обработка полученных результатов путем проведения корреляционного и регрессионного анализа.

Результаты. Дана комплексная оценка состояния 13-ти припоселковых кедровников; проведен анализ динамики значений NDVI в период с 2002 по 2017 гг. и установлены основные причины (незаконные вырубki, ветровалы, пожары и распространение вредителей); проведена группировка кедровников по их состоянию; установлены максимальные значения NDVI для Богашовского и Белоусовского кедровников, минимальные – для Аксеновского, Плотниковского и Протопоповского кедровников; показаны положительные корреляции между значениями NDVI и состоянием деревьев: высокая корреляция – с индексом жизненного состояния, и средняя – со средневзвешенной категорией состояния деревьев в древостое; достоверные корреляционные связи значений NDVI кедровников с количеством осадков и суммой температур не обнаружены (за исключением Аксеновского кедровника, характеризуемого как «сильно ослабленный»); предложенные подходы применимы к оценке любых кедровников.

Ключевые слова:

Кедровники, мониторинг, состояние, оценка, наземное обследование, данные дистанционного зондирования, NDVI.

Введение

Оценка состояния лесных массивов актуальна для многих регионов планеты [1], поскольку оно влияет на биоразнообразие, водный режим экосистем, депонирование диоксида углерода, климат, а также на эффективность лесохозяйственного и лесозаготовительного производства [2]. Соответствующая информация необходима для решения целого ряда научных и прикладных задач, в т. ч. по планированию охраны и защиты лесов, лесо-

пользованию и лесовосстановлению, а также по принятию адекватных и оперативных управленческих решений. В последние годы все большее применение в оценке лесных ресурсов находят данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса, позволяющие:

а) проводить мониторинг и инвентаризацию земель лесного фонда [3], в т. ч. осуществлять слежение за их санитарным и лесопатологическим состоянием;

- б) определять устойчивость экосистем к экстремальным воздействиям [4];
- в) сравнивать состояние больших массивов леса [4] в разные периоды времени – от практически реального до ретроспективного [5], и выявлять многолетнюю динамику их состояния в любой точке планеты, в т. ч. на труднодоступных территориях [6];
- г) повышать точность определения площади усыхающих древостоев;
- д) эффективно планировать наземное обследование [7].

В научных исследованиях широко используют данные, получаемые со спутников природно-ресурсного назначения [8–10]. Съёмочная аппаратура, установленная на этих спутниках, позволяет получать мультиспектральные снимки в различных диапазонах электромагнитного спектра. Для решения конкретных задач выбираются оптимальные комбинации каналов [11], наилучшим образом соответствующие специфике объектов исследований. Эффективными инструментами для обработки и анализа полученных данных служат геоинформационные системы и технологии [12, 13].

С помощью ДЗЗ ведется оценка изменения состояния лесных массивов под влиянием факторов природной и антропогенной природы, таких как изменение климата [14–16], ураганы [17], засухи, болезни и вредители [18], пожары [19–21], лесозаготовки и незаконные рубки леса [22]. К примеру, установлена деградация лесных массивов под действием урбанизации на юге Мексики [23], климатических изменений в Центральной Европе [24], Юго-Восточной Азии [25] и Канаде [25, 26]. Изучено влияние особенностей ландшафтов, породного состава, климата, свойств почвы и лесной подстил-

ки на возникновение и распространение лесных пожаров [24] в Швеции [27], России [28, 29] и горных массивах тропического пояса [30]. Пожары, болезни и вредители не только ведут к деградации леса, но и негативно влияют на коммерческие прогнозы объемов лесозаготовок [30–32]. В США космические снимки используют для наблюдений и прогнозов последствий неблагоприятных факторов на миллионах гектарах лесных массивов и для оценки нанесенного ущерба [1, 33]. В Мьянме в ряде регионов на 10 лет отменены все лесозаготовительные операции, контроль которых ведется с помощью ДЗЗ [34].

Мониторинг состояния лесных массивов особенно актуален для России, около половины территории которой занято лесами, а содержание древесины превышает 20 % мирового запаса. Низкий уровень охраны лесов от пожаров, болезней и вредителей ведет к ежегодному сокращению площади лесов на 2 млн га, поэтому в России особое внимание уделяется учету и оценке состояния лесных ресурсов [35, 36] и способности к лесовозобновлению [37, 38] хозяйственно ценных древесных пород [39], в том числе сосны кедровой сибирской (кедр сибирский) [40].

По площади кедровых лесов Томская область занимает третье место в Сибирском федеральном округе (3,6 млн га из 19,3 млн га лесных массивов). Карта-схема, показывающая расположение кедровников, приведена на рис. 1, А, внешний вид одного из них – на рис. 1, Б. Площадь потенциальных кедровников в Томской области достигает 2 млн га. Преобладают приспевающие и средневозрастные кедровники (39 и 41 % площади соответственно), спелые и перестойные кедровники занимают площадь в 14 % от общей площади кедровых лесов.

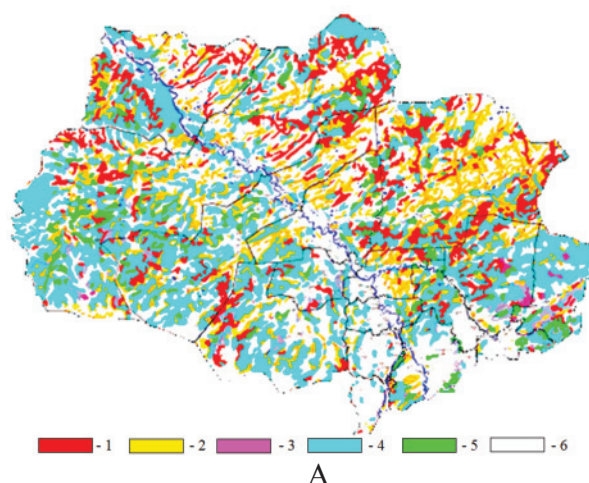


Рис. 1. Расположение кедровников на территории Томской области по данным ОГУ «Облкомприрода» (А): 1 – кедровый лес, 2 – сосновый лес, 3 – смешанный темнохвойный лес, 4 – смешанный лес с преобладанием мелколиственных пород, 5 – мелколиственный лес, 6 – незалесенные территории; и внешний вид Богашовского кедровника (Б)

Fig. 1. Location of cedar forests in the Tomsk region according to OGU «Oblkompriroda» (A): 1 – cedar forest, 2 – pine forest, 3 – mixed dark coniferous forest, 4 – mixed forest with predominance of small-leaved species, 5 – small-leaved forest, 6 – non-forested areas; and appearance of Bogashovskiy cedar forest (B)

Кедры характеризуются декоративностью, фитонцидностью и долговечностью (500–800 лет); древесина – прочностью и легкостью. Она используется в качестве строительного и поделочного материала. Хвоя, живица и орехи являются источником ценных природных соединений для получения лекарств, скипидара, канифоли и кондитерских изделий [41].

Среди популяций сосны сибирской важное научное [42], экономическое, экологическое [43], социальное и духовное [44] значение имеют кедровые насаждения припоселкового типа [45], максимально сохранившиеся на юге Томской области. Многие из них являются особо охраняемыми объектами и имеют статус памятников природы Томской области. Кедровники чувствительны к состоянию окружающей среды и часто используются в качестве биоиндикаторов [46]. Негативные воздействия природного и антропогенного характера вызывают изменения породного состава деревьев, их возраста, высоты, диаметра, класса бонитета и т. д. [43].

В кедровниках Томской области доля ослабленных деревьев составляет в среднем 30,6 %. В ряде из них отмечено сокращение лесопокрытой площади, к примеру, в Протопоповском – на 70 % из-за отчуждения ценных лесных земель под жилищное и производственное строительство вблизи населенных пунктов, неконтролируемого сбора урожая орехов, проведения превентивных выборочных санитарных рубок и т. д. [43].

Несмотря на относительную близость к областному центру и сравнительно небольшие площади кедровников, их сплошное и синхронное изучение только методами наземного обследования не представляется возможным. Лесопатологическое обследование, основанное на оценке дефолиации или дехромации крон репрезентативной выборки отдельных деревьев и определение интегральных характеристик состояния насаждений требует значительных финансовых, временных и трудовых ресурсов. Его регулярное проведение для оценки состояния даже ценных кедровников практически нереализуемо. В то же время применение методов ДЗЗ позволяет своевременно выявлять локализацию проблемных участков, их площади, оценивать динамику состояния растительного покрова и минимизировать расходы на их обнаружение.

Целью данного исследования является количественная и качественная оценки изменения состояния припоселковых кедровников Томской области за 15-летний период с 2002 по 2017 гг. с использованием данных ДЗЗ.

Объекты и методы исследований

Объектами исследования являются припоселковые кедровники, которые относятся к лесничествам филиала ОГУ «Томское управление лесами» Томской области. Они расположены между 56–61° с. ш. и 75–89° в. д. на землях лесного фонда и являются ботаническими памятниками природы. Опи-

сание кедровников приведено по паспортам, имеющимся в ОГБУ «Облкомприрода» (по состоянию на 01.01.2018 г.), по «Атласу особо охраняемых природных территорий Томской области» [47], а также по данным наземных обследований [42–45] (табл. 1). Расположение каждого кедровника привязано к конкретному населенному пункту или лесничеству, лесному кварталу (части лесного массива, отграниченной на местности, являющейся постоянной учетной и хозяйственной единицей) или выделу (участку, однородному по почвенно-грунтовым условиям и произрастающей на нем растительности) в соответствии с картами земель лесного фонда Томской области.

Таблица 1. Территориальная характеристика припоселковых кедровников, выбранных в качестве объектов исследования

Table 1. Territorial characteristics of the cedar forests, chosen as objects of study

| Название/Name | Расположение/Location |
|---|---|
| Нижне-Сеченовский Nizhne-Sechenovskiy | квартал (кв.) 139, за исключением 17 выдела, Темерчинского участкового лесничества Тимирязевского лесничества 139 quarter (sq), with the exception of allotment 17, Temerinska district forestry Timiryazev forestry |
| Трубачевский Trubchevskiy | в границах Томского района у пос. Трубачево within the boundaries of Tomsk region near the village Trubachevo |
| Петровский Petrovskiy | в границах Томского района у д. Петрово within the borders of the Tomsk region near the village Petrovo |
| Богашевское участковое лесничество Томского лесничества Bogashovskoe precinct forestry of Tomsk forestry | |
| Аксеновский Aksenovskiy | кв. 46, выделы 4 и 5 и кв. 48, выделы 2, 4, 6 46 sq., areas 4 and 5 and 48 sq., areas 2, 4, 6 |
| Белоусовский Belousovskiy | кв. 50, за исключением 13 выдела, и кв. 51, за исключением выделов 7, 8, 14, 15 и 17 50 sq, with the exception of areas 13, and 51 sq., with the exception of areas 7, 8, 14, 15 and 17 |
| Богашевский Bogashovskiy | кв. 33, выделы 7, 12, 21, 32, 35 и участки 4, 6, 10, 17, 18, 20, 34 выделов 33 sq., cells 7, 12, 21, 32, 35 and sections 4, 6, 10, 17, 18, 20, 34 sites |
| Вороновский Voronovskiy | кв. 39–41 урочища «Богашевское» 39–41 sq. of tract «Bogashevskoe» |
| Лоскутовский Loskutovskiy | кв. 32, за исключением выделов 6, 11, 23, 32 32 sq., with the exception of sites 6, 11, 23, 32 |
| Лесной парк у села Яр Forest Park near the village Yar | в окрестностях с. Яр in the vicinity of the village Yar |
| Магадаевский Magadaevskiy | кв. 31, за исключением 2, 10 выделов 31 sq., except 2, 10 areas |
| Петуховский Petukhovskiy | кв. 42, за исключением выдела 12, кв. 43, 44, за исключением выдела 3 и кв. 45 42 sq., with the exception of allotment 12, area 43, 44, with the exception of part 3, and 45 sq. |
| Плотниковский Plotnikovskiy | кв. 27–30 27–30 sq. |
| Протопоповский Protopopovskiy | кв. 25, за исключением выделов 11 и 12 и кв. 26, за исключением выделов 14 и 15 25 sq., with the exception of sites 11 and 12 and 26 sq., with the exception of areas 14 and 15 |

Породный состав и состояние изученных кедровников различны. В 2002 г. к наиболее ослабленным относились Аксеновский и Лоскутовский, к ослабленным – Белоусовский и Лучаново-Ипатовский, к здоровым – Богашевский и Магадаевский. Самыми старыми кедровниками являются Лоскутовский (127 лет), Аксеновский (126 лет), Протопоповский (122 года) и Петуховский (121 год), самым молодым – Магадаевский. Максимальная высота деревьев отмечена в Аксеновском, Вороновском, Петуховском и Протопоповском кедровниках (23,2–23,9 м), минимальная – в Магадаевском кедровнике, а также на отдельных участках Аксеновского и Лоскутовского кедровников (15,5–19,0 м). К высокобонитетным отнесены Вороновский, Лучаново-Ипатовский, часть Петуховского и Богашевского кедровников; к среднебонитетным – Аксеновский, часть Богашевского, Лоскутовского и Плотниковского кедровников. Наибольшие запасы древесины установлены в Протопоповском и частично в Аксеновском кедровнике (338–393 м³/га), минимальные – на отдельных участках Аксеновского и Лоскутовского кедровников (170–190 м³/га).

По представленным в паспортах схемам кедровников, датированным 2008 и 2009 гг. и содержащим их границы и координаты поворотных точек, построен тематический векторный слой цифровой карты территории, в котором каждый кедровник представлен в виде полигона. Географическая привязка схем и оцифровка границ кедровников выполнена с использованием программного обеспечения ERDAS IMAGINE 9.2 [48]. Фрагменты итоговой карты, показывающие расположение кедровников при их наложении на космический снимок, приведены на рис. 2. Итоговая карта представлена в системе координат картографической проекции UTM (зона 43, WGS84), используемой для космических снимков со спутников Landsat на данной территории.

Для оценки состояния припоселковых кедровников использован вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), являющийся показателем количества фотосинтетически активной биомассы. NDVI рассчитывается по данным космических снимков и имеет лучшую чувствительность к изменениям растительного покрова [49]. Его расчет базируется на двух стабильных участках спектральной кривой отражения сосудистых растений. Первый участок связан с максимумом поглощения хлорофиллом в красной области (0,6–0,7 мкм), второй – с максимумом отражения клеточными структурами листа в инфракрасной области (0,7–1,0 мкм). Значения NDVI вычислены по формуле:

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}},$$

где ρ_{nir} – значения коэффициента спектральной яркости пикселя в ближнем инфракрасном диапазоне; ρ_{red} – в красном диапазоне электромагнитного спектра [49].

Значения NDVI рассчитаны по космическим снимкам среднего пространственного разрешения (30 м) со спутников Landsat 5 (камера TM), Landsat 7 (камера ETM+) и Landsat 8 (камера OLI), которые широко используются для построения временных рядов данных при мониторинге состояния лесов [23–25, 50]. Исходные снимки уровня обработки L1T получены из архива Геологической службы США с использованием интернет-сервиса Earth Explorer [51], который предоставляет возможность задания границ исследуемой области для подбора снимков, указания координат снимков с использованием координатной системы WRS2, даты и/или временного интервала съемки, процента покрытия облачностью и т. д. Перечень использованных в работе снимков приведен в табл. 2. Их выбор обусловлен отсутствием облачности в момент съемки.

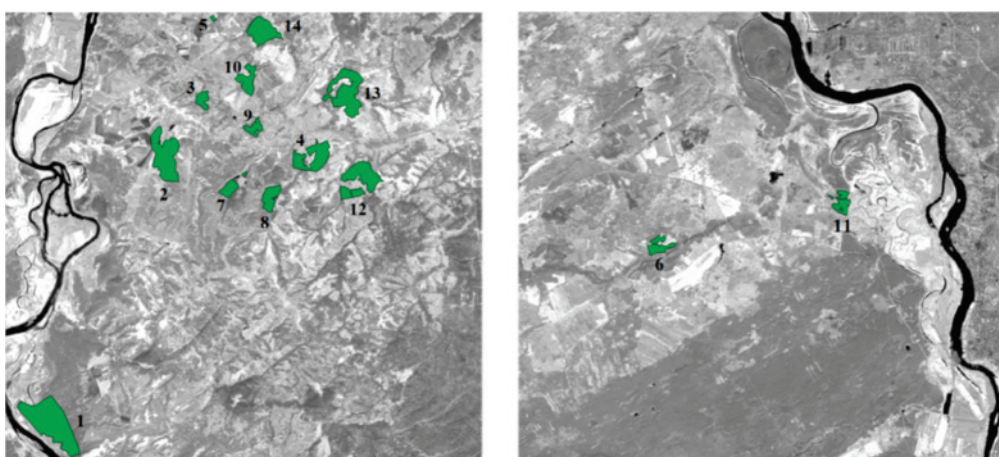


Рис. 2. Схема расположения припоселковых кедровников: 1 – Лесной парк у с. Яр, 2 – Лучаново-Ипатовский, 3 – Магадаевский, 4 – Нижне-Сеченовский, 5 – Трубачевский, 6 – Вороновский, 7 – Аксеновский, 8 – Белоусовский, 9 – Богашевский, 10 – Лоскутовский, 11 – Петровский, 12 – Петуховский, 13 – Плотниковский, 14 – Протопоповский

Fig. 2. Scheme of location of cedar forests: 1 – Forest Park near the village Yar, 2 – Luchanovo-Ipatovskiy, 3 – Magadaevskiy, 4 – Nizhne-Sechenovskiy, 5 – Trubachevskiy, 6 – Voronovskiy, 7 – Aksenovskiy, 8 – Belousovskiy, 9 – Bogashovskiy, 10 – Loskutovskiy, 11 – Petrovskiy, 12 – Petukhovskiy, 13 – Plotnikovskiy, 14 – Protopopovskiy

Таблица 2. Список используемых космических снимков

Table 2. List of used satellite images

| Дата съемки Shooting date | Номер Landsat Landsat Number | Номера снимков в соответствии с системой WRS2 (Path-Row) Numbers of images in accordance with the system WRS2 (Path-Row) |
|------------------------------|---------------------------------|---|
| 26.09.2002 | 7 | 148-21 |
| 28.08.2006 | 5 | |
| 31.08.2007 | | |
| 04.10.2008 | | |
| 07.10.2009 | | |
| 08.09.2010 | | |
| 27.09.2011 | 8 | |
| 14.07.2013 | | |
| 18.08.2014 | | |
| 20.07.2015 | | |
| 26.08.2107 | | |

Данные Landsat уровня обработки L1T поставляются в калиброванном виде, где значения пикселей каждого канала многозонального снимка представлены в виде безразмерных величин DN (Digital Number), пропорциональных интенсивности излучения, достигшего сенсора на борту спутника. Для корректного проведения исследований была проведена предварительная обработка данных, заключающаяся в радиометрической коррекции данных с использованием формул, приведенных в работах [52–55]. В результате значения DN были пересчитаны в значения отражательной способности (коэффициенты спектральной яркости) участков на поверхности Земли, покрываемых пикселем. Предварительная обработка данных и расчет значений NDVI выполнен в геоинформационной системе QGIS [56].

На следующем этапе рассчитаны средние значения NDVI внутри каждого полигона, представляющего кедровник на цифровой карте. Для этого проведен пространственный анализ данных с использованием инструмента «Зональная статистика» геоинформационной системы QGIS [56]. Алгоритм анализа данных приведен на рис. 3.

Проведена оценка корреляции межгодовой динамики значений NDVI с метеоусловиями вегетационного периода. Для этого ряды значений NDVI, усредненные для каждого вегетационного периода, сопоставлены с рядами усредненных температур и осадков за апрель–сентябрь каждого года по метеоданным, полученным с сайта «Погода и климат» [57]. Проведен расчет коэффициентов корреляций между показателями NDVI и состоянием деревьев (средневзвешенной категории состояния деревьев в древостое (СКС) и индексом жизненного состояния (ИЖС)) [по 43]. Объем выборки для расчета значений NDVI составил 154 единицы; для анализа силы связи межгодовой динамики значений NDVI с метеоусловиями вегетационного периода – 462 единицы; для корреляций между показателями NDVI, СКС и ИЖС также 462 единицы. Коэффициенты корреляции между рядами рассчитаны с доверительной вероятностью $\beta=0,95$. Значения среднеквадратических отклонений находятся в пределах от 0,017 до 0,043.

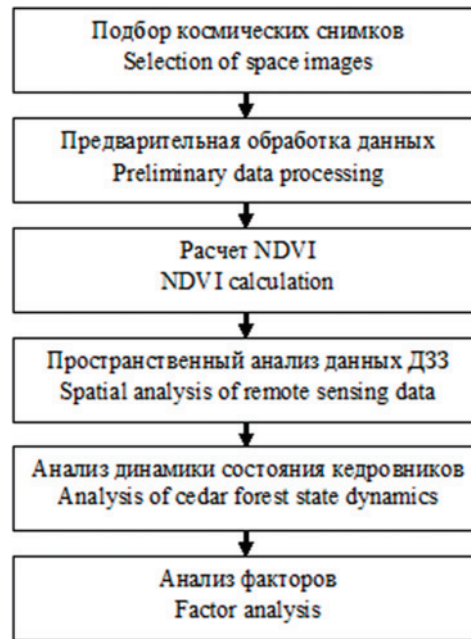


Рис. 3. Алгоритм анализа данных дистанционного зондирования Земли и данных наземных обследований для оценки состояния кедровников

Fig. 3. Algorithm of analysis of remote sensing data and ground truth data for assessment of cedar forest state

Результаты

Для анализа динамики значений NDVI с 2002 по 2017 г. данные представлены в виде графиков NDVI с нанесенными линиями трендов (рис. 4), описывающих тенденции динамики NDVI.

Тренды высокобонитетных кедровников описываются уравнениями (1) и (2):

$$y=0,006x+0,541; R^2=0,087$$

(Богашовский кедровник), (1)

$$y=0,006x+0,506; R^2=0,051$$

(Вороновский кедровник). (2)

Ход графиков Аксеновского и Петровского припоселковых кедровников заметно отличается от среднегрупповых, а тренды значений их NDVI описываются уравнениями (3) и (4):

$$y=-0,003x+0,502; R^2=0,015$$

(Аксеновский кедровник), (3)

$$y=-0,001x+0,555; R^2=0,002$$

(Петровский кедровник). (4)

Скорость роста значений NDVI кедровников в период с 2002 по 2017 г. составляет 6 у.е., Аксеновского – 3 у.е., причем в период с 2002 по 2015 г. значения его NDVI в 80 % наблюдений минимальны. Поскольку значения экстремумов графика характеризуют плотность и состояние лесных массивов, то по данным ДЗЗ самым ослабленным являлся Аксеновский кедровник, что было подтверждено данными наземных обследований. В 2011 г. произошло повреждение его лесных насаждений короедом шестизубчатым на площади 11,6 га. В 2013 г. вредитель распространился еще

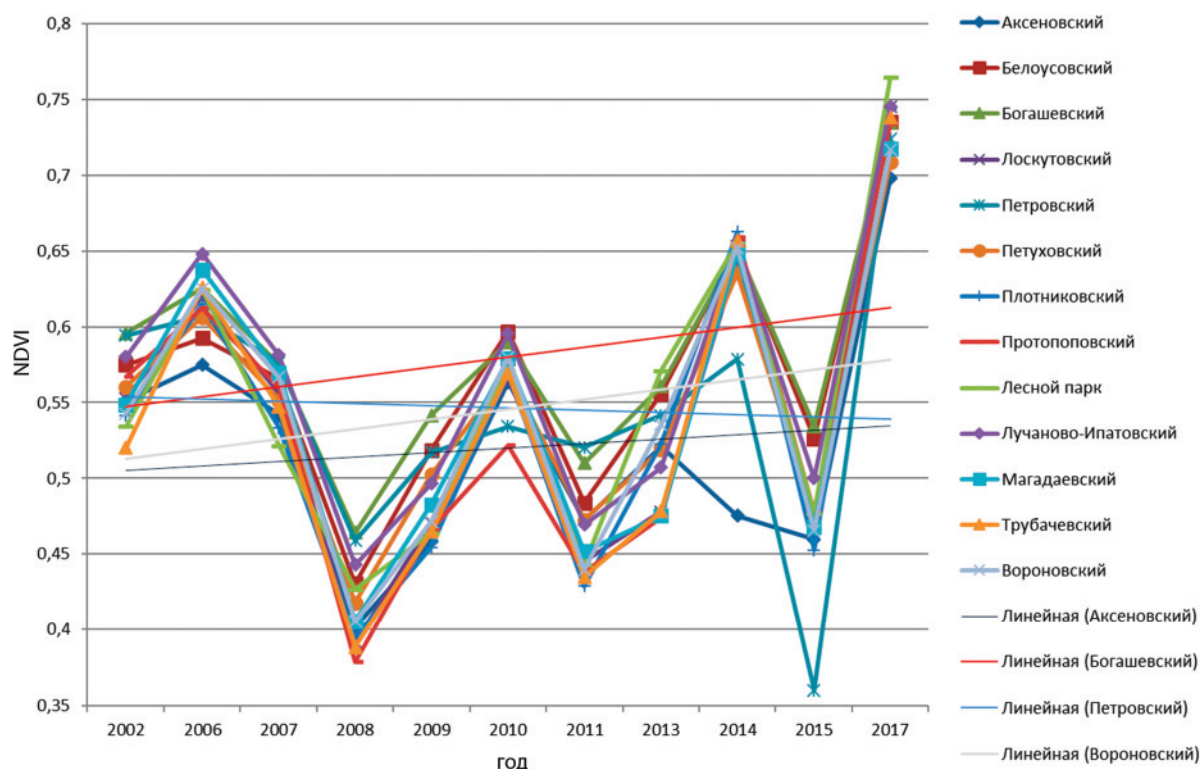


Рис. 4. Изменение значений NDVI припоселковых кедровников в 2002–2017 гг.

Fig. 4. Changes in NDVI values of cedar forests in 2002–2017

на 3 га. В 2014 г. площадь, охваченная вредителем, составила 67,5 га, т. е. 69 % всей площади кедровника. Изменения состояния Аксеновского кедровника нашли отражение в падении значений NDVI. Для предотвращения деградации кедровника в 2015 г. на площади 67,5 га были проведены санитарные рубки. В результате формирования новой поросли состояние лесного массива улучшилось, соответственно, произошел резкий рост значений NDVI и его выравнивание со среднегрупповым значением.

В отличие от Аксеновского, Петровский кедровник в период с 2002 по 2012 г. характеризовался более высокими значениями NDVI, что свидетельствует о его изначально хорошем состоянии. В кедровнике производили посадку молодых деревьев и осуществляли необходимый уход, благодаря чему он достиг максимального из всех изученных кедровников индекса жизненного состояния (более чем в 2 раза выше, чем у Аксеновского) и минимального показателя поврежденности. В 2014 г. значения NDVI резко упали вследствие начала дачного строительства в марте 2013 г. Также в 2014 г. в результате весеннего урагана произошел вывал леса на площади 8,5 га (8,4 % площади кедровника). Более 170 деревьев было повалено с отрывом от почвы всей корневой системы. Летом того же года на площади 0,4 га был зафиксирован очаг заражения короедом шестизубчатым. Следовательно, изначально здоровый Петровский кедровник оказался ослабленным в ре-

зультате негативных антропогенных и природных воздействий (вырубка, ветровал, повреждение энтомофагами).

Низкие значения NDVI зафиксированы также для Протопоповского кедровника, поврежденного пожарами, ветровалами и энтомофагами. Кроме того, его территория, как и территория Аксеновского кедровника, была пройдена санитарными рубками, а значительная часть полностью вырублена для предотвращения возрастной деградации. Это также нашло отражение в снижении значений их NDVI. Таким образом, проведенный ретроспективный анализ ДЗЗ позволил дать количественную оценку динамики состояния припоселковых кедровников, а наземные обследования – определить причины его изменения.

Установлено, что коэффициенты корреляции между рядами средних значений NDVI отдельных кедровников и соответствующими рядами средних гидротермических показателей недостоверны. Это свидетельствует о независимости процессов вегетации изученных кедровников от температуры воздуха и количества осадков и высоких адаптационных возможностях кедровников. Только для Аксеновского кедровника, характеризуемого как «сильно ослабленный», показана отрицательная корреляция средней силы между значениями NDVI и температурой воздуха. Следовательно, высокие температуры воздуха и засуха усиливали стресс и приводили к снижению уровня жизнедеятельности наиболее уязвимых деревьев и всей по-

пуляции в целом. Для здоровых кедров подобные нагрузки находились в пределах нормы реакции.

Для интегральной количественной индикации состояния древостоя наряду со значениями NDVI были использованы показатели ИЖС и СКС. Установлена достоверная средняя связь между показателями NDVI и СКС деревьев в древостое (+0,630) и высокая связь между NDVI и ИЖС древостоя (+0,790). Теснота наблюдаемой связи между значениями NDVI свидетельствует о корректности оценки жизнеспособности по данным ДЗЗ. СКС деревьев в древостое характеризует каждую категорию деревьев (здоровые, ослабленные и т. д.) с помощью суммы квадратов площадей поперечного сечения на высоте ствола 1,3 м [43]. ИЖС древостоя отражает объемы древесины каждой категории деревьев («здоровое», «ослабленное», «сильно ослабленное» «полностью разрушенное»). Он более прост, но менее точен, чем СКС (расчет по запасу), поскольку не учитывает деревья высотой до 1,3 м, а также деревья разных размеров. Этим объяснимы различия коэффициентов корреляций между СКС деревьев, ИЖС древостоя и NDVI. Установленные взаимосвязи позволяют использовать значения NDVI для предварительной оценки интегрального индикатора текущего состояния кедровников.

Выводы

1. Применение данных ДЗЗ позволяет ранжировать припоселковые кедровники Томской области по их состоянию. В период с 2002 по 2017 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. US Forest Service. URL: <https://www.fs.fed.us> (дата обращения: 20.02.2018).
2. Green Policy360-eOS. URL: <http://www.greenpolicy360.net> (дата обращения: 20.02.2018).
3. Полищук Ю.М., Хамедов В.А., Русакова В.В. Дистанционные исследования воздействия факельного сжигания попутного газа на лесорастительный покров нефтедобывающей территории с использованием вегетационного индекса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. – Т. 13. – № 1. – С. 61–69.
4. Dynamic Signaling of changes to forests using exponentially weighted moving average charts / E.B. Brooks, Y. Zhiqiang, A. Valerie, H. Randolph, T. Wynne // Forests. – 2017. – V. 8. – № 9. – P. 304–325.
5. Курганович К.А., Макаров В.П. Использование вегетационных индексов NDVI для оценки влияния пожаров на динамику растительности Цасуейского бора // Вестник ЗабГУ. – 2015. – № 02 (117). – С. 27–36.
6. Kovalev A., Tokareva O. Using MODIS NDVI products for vegetation state monitoring on the oil production territory in Western Siberia // MATEC Web of Conferences. – 2016. – V. 48. – № 05003. – P. 1–4. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20164805003> (дата обращения: 20.02.2018).
7. Yashchenko I.G., Peremittina T.O. Application of the Terra MODIS satellite data for environmental monitoring in Western Siberia // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences – ISPRS Archives. – 2016. – V. 41. – P. 185–187.

максимальные значения NDVI установлены для Богашовского и Белоусовского кедровников, минимальные – для Аксеновского, Плотниковского и Протопоповского.

2. Отсутствие достоверных корреляционных связей значений NDVI с количеством осадков и суммой температур свидетельствует об устойчивости кедровников к метеоусловиям вегетационного периода. Достоверная отрицательная связь между значениями NDVI и средней температурой воздуха выявлена только для Аксеновского кедровника, характеризующегося как «сильно ослабленный» и находящегося на границе адаптационных возможностей.
3. Выявлена средняя положительная связь между показателями NDVI и СКС деревьев в древостое (+0,630) и высокая средняя положительная связь между NDVI и ИЖС древостоя (+0,790).
Результаты, полученные в ходе работы, могут быть использованы для мониторинга и своевременного обеспечения сохранности припоселковых кедровников.

В перспективе планируются специальные исследования по развитию и уточнению полученной информации, в частности, по идентификации доли кедровых насаждений в получаемых значениях NDVI, анализу межсезонной и междекадной динамики значений NDVI кедровников и выявлению причин, их обуславливающих.

Работа выполнена в Томском политехническом университете в рамках программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета.

8. Сканэкс. URL: <http://scanex.ru/data/satellites/> (дата обращения: 20.02.2018).
9. Above-ground biomass prediction by Sentinel-1 multitemporal data in central Italy with integration of ALOS2 and Sentinel-2 data / G.V. Laurin, J. Balling, P. Corona, W. Mattioli, D. Papale, N. Puletti, M. Rizzo, J. Truckenbrodt, M. Urban // Journal of Applied Remote Sensing. – 2018. – V. 12. – № 1. – 016008. URL: <http://dx.doi.org/10.1117/1.JRS.12.016008> (дата обращения: 20.02.2018).
10. Mjachina K., Hu Z., Chibilyev A. Detection of damaged areas caused by the oil extraction in a steppe region using winter Landsat imagery // Journal of Applied Remote Sensing. – 2018. – V. 12 (1). – № 016017. – P. 1–14.
11. How similar are forest disturbance maps derived from different Landsat time series algorithms? / W.B. Cohen, S.P. Healey, Z. Yang, S.V. Stehman, C.K. Brewer, E.B. Brooks, N. Gorelick, C. Huang, M.J. Hughes, R.E. Kennedy, T.R. Loveland, G.G. Moisen, T.A. Schroeder, J.E. Vogelmann, C.E. Woodcock, L. Yang, Z. Zhu // Forests. – 2017. – V. 8. – № 4. – P. 98–122.
12. Polichtchouk Y., Tokareva O. Geoinformation analysis of atmosphere pollution impact on landscape of Siberian oil-producing territories // Proceedings of SPIE. – 2001. – V. 4341. – P. 571–576.
13. Марков Н.Г. Геоинформационные системы предприятий нефтегазовой отрасли: функциональность, архитектура и перспективы развития // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 9. – С. 16–32.
14. Kharuk V.I., Ranson K.J., Dvinskaya M.L. Response of Pinus sibirica and Larix sibirica to climate change in southern Siberian al-

- pine forest-tundra ecotone // *Scandinavian Journal of Forest Research*. – 2009. – V. 24. – № 2. – P. 421–426.
15. Climate-induced mortality of Siberian pine and fir in the Lake Baikal Watershed / V.I. Kharuk, S.T. Im, I.A. Petrov, A.S. Golyukov, K.J. Ranson, M.N. Yagunov // *Forest Ecology and Management*. – 2017. – V. 384. – P. 191–199. URL: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.10.050> (дата обращения: 20.02.2018).
 16. Millar C.I., Stephenson N.L. Temperate forest health in an era of emerging mega disturbance // *Science*. – 2015. – № 21. – P. 823–826.
 17. Windthrow detection in European forests with very high-resolution optical data K. / Einzmann, M. Immitzer, S. Böck, O. Bauer, A. Schmitt, C. Atzberger // *Forests*. – 2017. – V. 8. – № 1. – P. 21–53.
 18. Remote Sensing in Forest Health Protection: FHTET Report No. 00–03 August 2000 / W.M. Ciesla. – Salt Lake City, Fort Collins: USDA Forest Service, Remote Sensing Applications Center, Forest Health Technology Enterprise Team, 2000. – 266 p. URL: https://www.fs.fed.us/foresthealth/technology/pdfs/RemoteSensingForestHealth00_03.pdf (дата обращения: 20.02.2018).
 19. Ecological Foundations for Fire Management in North American Forest and Shrubland Ecosystems: General Technical Report PNW-GTR-779 March 2009 / J.E. Keeley, G.H. Aplet, N.L. Christensen, S.G. Conard, E.A. Johnson, P.N. Omi, D.L. Peterson, T.W. Swetnam. – Portland: USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Center, 2009. – 100 p. URL: https://www.fs.fed.us/pnw/pubs/pnw_gtr779.pdf (дата обращения: 20.02.2018).
 20. Chu T., Guo X., Takeda K. Effects of burn severity and environmental conditions on post-fire regeneration in siberian larch forest // *Forests*. – 2017. – V. 8. – № 3. – P. 76–91.
 21. Norman S.P., Koch F.H., Hargrove W.W. Review of broad-scale drought monitoring of forests: Toward an integrated data mining approach // *Forest Ecology and Management*. – 2016. – V. 380. – P. 346–358.
 22. Forest cover change and illegal logging in the Ukrainian Carpathians in the transition period from 1988 to 2007 / T. Kuemerle, O. Chaskovsky, J. Knorn, V.C. Radeloff, I. Kruhlov, W.S. Keeton, P. Hostert // *Remote Sensing of Environment*. – 2009. – V. 113. – P. 1194–1207.
 23. Romero-Sanchez M.E., Ponce-Hernandez R. Assessing and monitoring forest degradation in a deciduous tropical forest in Mexico via remote sensing indicators // *Forests*. – 2017. – V. 8. – № 9. – P. 302–304.
 24. Using intra-annual Landsat time series for attributing forest disturbance agents in Central Europe / J. Oeser, D. Pflugmacher, C. Senf, M. Heurich, P. Hostert // *Forests*. – 2017. – V. 8. – № 7. – P. 25–46.
 25. Assessment of Forest Degradation in Vietnam Using Landsat Time Series Data / J.E. Vogelmann, P.V. Khoa, D.X. Lan, J. Shermeyer, H. Shi, M.C. Wimberly, H.T. Duong, L.V. Huong // *Forests*. – 2017. – V. 8. – № 7 (7). – P. 238–258.
 26. The State of Canada's Forests. Annual Report / K. Einzmann, M. Immitzer, S. Böck, O. Bauer, A. Schmitt, C. Atzberger. – Ottawa: Canadian Forest Service, 2017. – 92 p.
 27. Hedwall P.O., Mikusiński G. Structural changes in protected forests in Sweden: implications for conservation functionality // *Canadian Journal of Forest Research*. – 2015. – V. 45. – № 9. – P. 1215–1224.
 28. Pasko O.A., Baranova A.V. Forest fire situation analysis over forest reserve land in Tomsk petroleum province // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2015. – V. 24 (1). URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/27/1/012040> (дата обращения: 20.02.2018).
 29. Chu T., Guo X., Takeda K. Effects of burn severity and environmental conditions on post-fire regeneration in siberian larch forest // *Forests*. – 2017. – V. 8. – № 3. – P. 76–83.
 30. Post-fire forest dynamics and climate variability affect spatial and temporal properties of spruce beetle outbreaks on a Sky Island mountain range / C.D. O'Connor, A.M. Lynch, D.A. Falk, T.W. Swetnam // *Forest Ecology and Management*. – 2015. – V. 336. – P. 148–162.
 31. Prediction of forest canopy and surface fuels from lidar and satellite time series data in a bark beetle-affected forest / B.C. Bright, A. Hudak, H. Meddens, T.J. Hawbaker, J.S. Briggs, R.E. Kennedy // *Forests*. – 2017. – V. 8. – № 9. – P. 322–345.
 32. Lidar and multispectral imagery classifications of balsam fir tree status for accurate predictions of merchantable volume / S. Yoga, J. Bégin, S. Benoit, D. Gatzolis // *Forests*. – 2017. – V. 8. – № 7. – P. 253–273.
 33. Observed and anticipated impacts of drought on forests insects and diseases in the United States / T.E. Kolb, C.J. Fettig, M.P. Ayres, B.J. Bentz, J.A. Hicke, R. Mathiasen, J.E. Stewart, A.S. Weed // *Forest Ecology and Management*. – 2016. – V. 380. – P. 321–334. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2016.04.051> (дата обращения: 20.02.2018).
 34. Attribution of disturbance agents to forest change using a Landsat time series in tropical seasonal forests in the Bago Mountains, Myanmar / K. Shimizu, O.S. Ahmed, R. Ponce-Hernandez, T. Ota, Z.C. Win, N. Mizoue, S. Yoshida // *Forests*. – 2017. – V. 8. – № 6. – P. 218–236.
 35. Kovyazin V., Romanchikov A., Pasko O. Comparative analysis of forest lands cadastral appraisal estimated with regards to wood and food resources // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2015. – V. 27 (1). URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/27/1/012039/meta> (дата обращения: 20.02.2018).
 36. Taxation indices of forest stand as the basis for cadastral valuation of forestlands / V. Kovyazin, V. Belyaev, O. Pasko, A. Romanchikov // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2014. – V. 21 (1). URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/21/1/012026> (дата обращения: 20.02.2018).
 37. Данчева А.В., Залесов С.В. Использование комплексного оценочного показателя при оценке состояния сосняков государственного лесного природного резервата «Семей Орманы» // *Известия С.-Пб ЛТА*. – 2016. – № 215. – С. 41–54.
 38. «Развитие лесного хозяйства на 2013–2020 годы» (с изменениями на 30 марта 2018 года). Правительство РФ. Постановление от 15 апреля 2014 года N 318. URL: <http://base.garant.ru/70644228/> (дата обращения: 20.09.2018).
 39. Хвойные породы мира. URL: <http://www.bizzcom.ru/whvoy/index.htm> (дата обращения: 20.02.2018).
 40. Бабич Н.А., Хамитов Р.С., Хамитова С.М. Селекция и семенная репродукция кедр сибирского. – Вологда; Молочное: ВГМХА, 2014. – 154 с.
 41. Rogachev A.D., Salakhutdinov N.F. Chemical composition of *Pinussibirica* (Pinaceae) // *Chemistry & Biodiversity*. – 2015. – V. 12. – № 1. – P. 1–53.
 42. Дебков Н.М. Припоселковые кедровники юга Западно-Сибирской равнины: история и современное состояние, рекомендации по устойчивому управлению. – М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2014. – 52 с.
 43. Бисирова Э.М., Кривец С.А. Комплексная характеристика состояния древостоев кедр сибирского в припоселковых кедровниках – памятниках природы Томской области // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. – 2010. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompleksnaya-harakteristika-sostoyaniya-drevostoev-ke-dra-sibirskogo-v-priposelkovykh-ke-drovnikah-pamyatnikah-pri-rody-tomskoy-oblasti> (дата обращения: 20.02.2018).
 44. Припоселковые кедровники и их социальное значение. URL: www.activestudy.info/priposelkovye-ke-drovniki-i-ix-socialnoe-znachenie (дата обращения: 20.02.2018).
 45. Бех И.А., Кривец С.Л., Бисирова Э.М. Кедр – жемчужина Сибири. – Томск: Изд-во «Печатная мануфактура», 2009. – 50 с.

46. Токарева О.С., Полищук Ю.М. Использование космических снимков для экологической оценки воздействия факельного сжигания попутного газа на нефтяных месторождениях Сибири // Оптика атмосферы и океана. – 2014. – Т. 27. – № 7. – С. 647–651.
47. Атлас особо охраняемых природных территорий Томской области. – Томск: Литературное бюро, 2017. – 134 с.
48. Erdas Imagine. URL: <https://innoter.com/software/erdas-ima-gine/> (дата обращения: 20.02.2018).
49. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS / J.W. Rouse, R.H. Haas, J.A. Scheel, D.W. Deering // 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium: Proc. Conf. – USA, Washington, 1973. – V. 1. – P. 309–317. URL: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19740022592.pdf> (дата обращения 20.02.2018).
50. Pasquarella V.J., Bradley B.A., Woodcock C.E. Near-Real-Time Monitoring of insect defoliation using Landsat time series // Forests. – 2017. – V. 8. – № 8. – P. 275–295.
51. USGS Earth Explorer. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov> (дата обращения: 20.02.2018).
52. LANDSAT 8 (L8) Data users handbook. URL: <https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf> (дата обращения: 20.02.2018)
53. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges // IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. – 2003. – V. 41. – № 11. – P. 2674–2677.
54. Landsat 7 Science Data Users Handbook. URL: https://landsat.gsfc.nasa.gov/wpcontent/uploads/2016/08/Landsat7_Handbook.pdf (дата обращения: 20.02.2018).
55. Коррекция материалов Landsat. URL: <http://gislab.info/qa/landsat-data-correction.html> (дата обращения: 20.02.2018).
56. QGIS-1.6. URL: <https://www.qgis.org/ru/site> (дата обращения: 20.02.2018).
57. Погода и климат. URL: <http://pogodaiklimat.ru> (дата обращения: 20.02.2018).

Поступила 10.11.2018 г.

Информация об авторах

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

Токарева О.С., кандидат технических наук, доцент отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Алшаиби А.Д.А., студент отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета; преподаватель Главного управления образования Диялы.

Черникова Т.Ю., аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Кабраль П., доктор прикладной математики, доцент Школы информационного менеджмента Лиссабонского университета.

UDC 629.78:630.52:587/588:528.88

ASSESSMENT OF STATE OF CEDAR FORESTS IN TOMSK REGION USING REMOTE SENSING DATA OF THE EARTH

Olga A. Pasko¹,
oap@tpu.ru

Olga S. Tokareva¹,
ost@tpu.ru

Ahmed J. A. Alshaibi^{1,2},
ahmedalshaiby88@gmail.com

Tatyana Yu. Chernikova¹,
chernikova@green.tsu.ru

Pedro Cabral³,
pcabral@novaims.unl.pt

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

² Directorate General of Education in Diyala,
1, Almuhafadah Avenue, Baqubah, 32001, Iraq.

³ Nova University of Lisbon, Nova Information Management School,
1070–312, Lisboa, Portugal.

The relevance of the research is caused by the necessity to obtain objective information on the condition of forests for their protection from fires, diseases and pests, as well as for forestry and logging production.

The aim of the research is the quantitative and qualitative assessment of changes in the condition of cedar forests on the example of the Tomsk region using ground survey methods and Earth remote sensing data.

The objects of the research are the 13 cedar forests located on forest lands and belonging to the forestry branch of institution «Tomsk forest management» in Tomsk region.

Methods: thematic mapping of the territory; calculation of the indicator of the number of photosynthetically active biomass NDVI (Normalize Difference Vegetation Index) on space images of medium spatial resolution (30 m) from the satellites Landsat 5 (camera TM), 7 (camera ETM+) and 8 (camera OLI), obtained in the period from 2002 to 2015 from the archive of the US Geological Survey using the Internet service Earth Explorer; spatial analysis of data using geographic information technologies; statistical processing of the obtained results by correlation and regression analysis.

Result. A comprehensive assessment of 13 cedar forests was given; the dynamics of NDVI values in the period from 2002 to 2017 was analyzed; the main reason (illegal logging, windfalls, fires and spread of pests) were determined; the cedar forests were grouped according to their status; the maximum values of NDVI were set for the Bogashovskiy and Belousovskiy cedar forests, the minimum values of NDVI were set for Aksenovskiy, Protopopovskiy, Plotnikovskiy cedar forests; positive correlations between NDVI values and tree state were shown: high correlation – with the vital index, and the average correlation – with the weighted average tree state category in the forest; reliable correlation of NDVI values of cedar trees with the amount of precipitation and the amount of temperatures have not been found (except for the Aksenovskiy cedar forest, characterized as «severely weakened»); the proposed approaches are applicable to the evaluation of any cedar forests.

Key words:

Cedar forests, monitoring, state, assessment, ground survey, remote sensing data, NDVI.

The research is carried out at Tomsk Polytechnic University within the framework of Tomsk Polytechnic University Competitiveness Enhancement Program.

REFERENCES

1. US Forest Service. Available at: <https://www.fs.fed.us> (accessed 20 February 2018).
2. Green Policy360-eOS. Available at: <http://www.greenpolicy360.net> (accessed 20 February 2018).
3. Polishchuk Yu.M., Khamedov V.A., Rusakova V.V. Remote studies of gas flaring impact on forest cover in oil-producing areas using vegetation index. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*, 2013, vol. 13, no. 1, pp. 61–69. In Rus.
4. Brooks E.B., Zhiqiang Y., Valerie A., Randolph H., Wynne T. Dynamic Signaling of changes to forests using exponentially weighted moving average charts. *Forests*, 2017, vol. 8, no. 9, pp. 304–325.
5. Kurganovich K.A., Makarov V.P. Ispolzovanie vegetatsionnykh indeksov NDVI dlya otsenki vliyaniya pozharov na dinamiku rastitelnosti Tsasucheiskogo bora [Using of vegetation indices NDVI for estimation of influence of fires on dynamics of vegetation of Tsasucheysky boron]. *Vestnik ZabGU*, 2015, no. 02 (117), pp. 27–36.

6. Kovalev A., Tokareva O. Using MODIS NDVI products for vegetation state monitoring on the oil production territory in Western Siberia. *MATEC Web of Conferences*, 2016, vol. 48, no. 05003, pp. 1–4. Available at: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20164805003> (accessed 20 February 2018).
7. Yashchenko I.G., Peremitina T.O. Application of the Terra MODIS satellite data for environmental monitoring in Western Siberia. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences – ISPRS Archives*, 2016, vol. 41, pp. 185–187.
8. Scanex. Available at: <http://scanex.ru/data/satellites/> (accessed 20 February 2018).
9. Laurin G.V., Balling J., Corona P., Mattioli W., Papale D., Puletti N., Rizzo M., Truckenbrodt J., Urban M. Above-ground biomass prediction by Sentinel-1 multitemporal data in central Italy with integration of ALOS2 and Sentinel-2 data. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2018, vol. 12, no. 1, 016008. Available at: <http://dx.doi.org/10.1117/1.JRS.12.016008> (accessed 20 February 2018).
10. Mjachina K., Hu Z., Chibilyev A. Detection of damaged areas caused by the oil extraction in a steppe region using winter Landsat imagery. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2018, vol. 12 (1), no. 016017, pp. 1–14.
11. Cohen W.B., Healey S.P., Yang Z., Stehman S.V., Brewer C.K., Brooks E.B., Gorelick N., Huang C., Hughes M.J., Kennedy R.E., Loveland T.R., Moisen G.G., Schroeder T.A., Vogelmann J.E., Woodcock C.E., Yang L., Zhu Z. How similar are forest disturbance maps derived from different Landsat time series algorithms? *Forests*, 2017, vol. 8, no. 4, pp. 98–122.
12. Polichtchouk Y., Tokareva O. Geoinformation analysis of atmosphere pollution impact on landscape of Siberian oil-producing territories. *Proceedings of SPIE*, 2001, vol. 4341, pp. 571–576.
13. Markov N.G. Geoinformation systems for oil and gas enterprises: functionality, architecture and development prospects. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 9, pp. 16–32. In Rus.
14. Kharuk V.I., Ranson K.J., Dvinskaya M.L. Response of Pinus sibirica and Larix sibirica to climate change in southern Siberian alpine forest–tundra ecotone. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2009, vol. 24, no. 2, pp. 421–426.
15. Kharuk I.V., Im S.T., Petrov I.A., Golyukov A.S., Ranson K.J., Yagunov M.N. Climate-induced mortality of Siberian pine and fir in the Lake Baikal Watershed. *Forest Ecology and Management*, 2017, vol. 384, pp. 191–199. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.10.050> (accessed 20 February 2018).
16. Millar C.I., Stephenson N.L. Temperate forest health in an era of emerging mega disturbance. *Science*, 2015, no. 21, pp. 823–826.
17. Einzmann K., Immitzer M., Böck S., Bauer O., Schmitt A., Atzberger C. Windthrow detection in European forests with very high-resolution optical data. *Forests*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 21–53.
18. Ciesla W.M. *Remote Sensing in Forest Health Protection: FHTET Report No. 00–03 August 2000*. Salt Lake City, Fort Collins, USDA Forest Service, Remote Sensing Applications Center, Forest Health Technology Enterprise Team, 2000. 266 p. Available at: https://www.fs.fed.us/foresthealth/technology/pdfs/RemoteSensingForestHealth00_03.pdf (accessed 20 February 2018).
19. Keeley J.E., Aplet G.H., Christensen N.L., Conard S.G., Johnson E.A., Omi P.N., Peterson D.L., Swetnam T.W. *Ecological Foundations for Fire Management in North American Forest and Shrubland Ecosystems: General Technical Report PNW-GTR-779 March 2009*. Portland, USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Center, 2009. 100 p. Available at: https://www.fs.fed.us/pnw/pubs/pnw_gtr779.pdf (accessed 20 February 2018).
20. Chu T., Guo X., Takeda K. Effects of burn severity and environmental conditions on post-fire regeneration in Siberian larch forest. *Forests*, 2017, vol. 8, no. 3, pp. 76–91.
21. Norman S.P., Koch F.H., Hargrove W.W. Review of broad-scale drought monitoring of forests: Toward an integrated data mining approach. *Forest Ecology and Management*, 2016, vol. 380, pp. 346–358.
22. Kuemmerle T., Chaskovskyy O., Knorn J., Radeloff V.C., Kruhlov I., Keeton W.S., Hostert P. Forest cover change and illegal logging in the Ukrainian Carpathians in the transition period from 1988 to 2007. *Remote Sensing of Environment*, 2009, vol. 113, pp. 1194–1207.
23. Romero-Sanchez M.E., Ponce-Hernandez R. Assessing and monitoring forest degradation in a deciduous tropical forest in Mexico via remote sensing indicators. *Forests*, 2017, vol. 8, no. 9, pp. 302–304.
24. Oeser J., Pflugmacher D., Senf C., Heurich M., Hostert P. Using intra-annual Landsat time series for attributing forest disturbance agents in Central Europe. *Forests*, 2017, vol. 8, no. 7, pp. 25–46.
25. Vogelmann J.E., Khoa P.V., Lan D.X., Shermeyer J., Shi H., Wimberly M.C., Duong H.T., Huong L.V. Assessment of Forest Degradation in Vietnam Using Landsat Time Series Data. *Forests*, 2017, vol. 8, no. 7 (7), pp. 238–258.
26. Einzmann K., Immitzer M., Böck S., Bauer O., Schmitt A., Atzberger C. *The State of Canada's Forests. Annual Report*. Ottawa, Canadian Forest Service, 2017. 92 p.
27. Hedwall P.O., Mikusiński G. Structural changes in protected forests in Sweden: implications for conservation functionality. *Canadian Journal of Forest Research*, 2015, vol. 45, no. 9, pp. 1215–1224.
28. Pasko O.A., Baranova A.V. Forest fire situation analysis over forest reserve land in Tomsk petroleum province. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 24 (1). Available at: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/27/1/012040> (accessed 20 February 2018).
29. Chu T., Guo X., Takeda K. Effects of burn severity and environmental conditions on post-fire regeneration in Siberian larch forest. *Forests*, 2017, vol. 8, no. 3, pp. 76–83.
30. O'Connor C.D., Lynch A.M., Falk D.A., Swetnam T.W. Post-fire forest dynamics and climate variability affect spatial and temporal properties of spruce beetle outbreaks on a Sky Island mountain range. *Forest Ecology and Management*, 2015, vol. 336, pp. 148–162.
31. Bright B.C., Hudak A., Meddens H., Hawbaker T.J., Briggs J.S., Kennedy R.E. Prediction of forest canopy and surface fuels from lidar and satellite time series data in a bark beetle-affected forest. *Forests*, 2017, vol. 8, no. 9, pp. 322–345.
32. Yoga S., Bégin J., Benoit S., Gatzliolis D. Lidar and multispectral imagery classifications of balsam fir tree status for accurate predictions of merchantable volume. *Forests*, 2017, vol. 8, no. 7, pp. 253–273.
33. Kolb T.E., Fettig C.J., Ayres M.P., Bentz B.J., Hicke J.A., Mathiasen R., Stewart J.E., Weed A.S. Observed and anticipated impacts of drought on forests insects and diseases in the United States. *Forest Ecology and Management*, 2016, vol. 380, pp. 321–334. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2016.04.051> (accessed 20 February 2018).
34. Shimizu K., Ahmed O.S., Ponce-Hernandez R., Ota T., Win Z.C., Mizoue N., Yoshida S. Attribution of disturbance agents to forest change using a Landsat time series in tropical seasonal forests in the Bago Mountains, Myanmar. *Forests*, 2017, vol. 8, no. 6, pp. 218–236.
35. Kovyazin V., Romanchikov A., Pasko O. Comparative analysis of forest lands cadastral appraisal estimated with regards to wood and food resources. *IOP Conference Series: Earth and Environ-*

- mental Science, 2015, vol. 27 (1). Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/27/1/012039/meta> (accessed 20 February 2018).
36. Kovyazin V., Belyaev V., Pasko O., Romanchikov A. Taxation indices of forest stand as the basis for cadastral valuation of forestlands. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2014, vol. 21 (1). Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/21/1/012026> (accessed 20 February 2018).
 37. Dancheva A.V., Zalesov S.V. The use of comprehensive evaluation index for assessing the condition of pine stands the State Forest Natural Reserve «Semey Ormany». *Izvestiya S.-Pb LTA*, 2016, no. 215, pp. 41–54. In Rus.
 38. *Razvitiye lesnogo khozyaistva na 2013–2020 gody (s izmeneniyami na 30 marta 2018 goda)*. *Pravitelstvo RF. Postanovlenie ot 15 aprelya 2014 goda N 318* [Development of forestry for 2013–2020 (with changes as of March 30, 2018). Government of the Russian Federation. Decision of April 15, 2014, no. 318]. Available at: <http://base.garant.ru/70644228/> (accessed 20 September 2018).
 39. *Khvoynye porody mira* [Conifers of the world]. Available at: <http://www.bizzcom.ru/whvoy/index.htm> (accessed 20 February 2018).
 40. Babich N.A., Khamitov R.S., Khamitova S.M. *Selektsiya i semennaya reproduktsiya kedra sibirskogo* [Selection and seed reproduction of Siberian cedar]. Vologda; Molochnoe, VGMKHA Publ., 2014. 154 p.
 41. Rogachev A.D., Salakhutdinov N.F. Chemical composition of Pinussibirica (Pinaceae). *Chemistry & Biodiversity*, 2015, vol. 12, no. 1, pp. 1–53.
 42. Debkov N.M. *Priposelkovye kedrovniki yuga Zapadno-Sibirskoi ravniny: istoriya i sovremennoe sostoyanie, rekomendatsii po ustoychivomu upravleniyu* [Cedar forests of neighborhood of villages of the South of West-Siberian Plain: history and current state, recommendations for sustainable management]. Moscow, World Wildlife Fund (WWF), 2014. 52 p.
 43. Bisirova E.M., Krivets S.A. Kompleksnaya kharakteristika sostoyaniya drevostoev kedra sibirskogo v priposelkovykh kedrovnikakh – pamyatnikakh prirody Tomskoy oblasti [The complex characteristic of state of Siberian stone pine forests near settlements – natural reserves of Tomsk oblast]. *Interekspo Geo-Sibir*, 2010. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompleksnaya-kharakteristika-sostoyaniya-drevostoev-kedra-sibirskogo-v-priposelkovykh-kedrovnikakh-pamyatnikakh-prirody-tomskoy-oblasti> (accessed 20 February 2018).
 44. *Priposelkovye kedrovniki i ikh sotsialnoe znachenie* [Cedar forests of neighborhood of villages and their social significance]. Available at: www.activestudy.info/priposelkovye-kedrovniki-i-ix-sotsialnoe-znachenie (accessed 20 February 2018).
 45. Bekh I.A., Krivets S.L., Bisirova E.M. *Kedr – zhemchuzhina Sibiri* [Cedar is the pearl of Siberia]. Tomsk, Pechatnaya manufaktura Publ., 2009. 50 p.
 46. Polishchuk Yu.M., Tokareva O.S. The use of satellite images for ecological estimate of flare firing of gas at oil fields of Siberia. *Optika Atmosfery i Okeana*, 2014, vol. 27, no. 07, pp. 647–651. In Rus.
 47. *Atlas osobo okhranyayemykh prirodnykh territoriy Tomskoy oblasti* [Atlas of specially protected natural territories of the Tomsk Region]. Tomsk, Literaturnoye byuro Publ., 2017. 134 p.
 48. *Erdas Imagine*. Available at: <https://innoter.com/software/erdas-imagine/> (accessed 20 February 2018).
 49. Rouse J.W., Haas R.H., Scheel J.A., Deering D.W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. *3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium. Proc. Conf. USA*, Washington, 1973. Vol. 1, pp. 309–317. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19740022592.pdf> (accessed 20 February 2018).
 50. Pasquarella V.J., Bradley B.A., Woodcock C.E. Near-Real-Time Monitoring of insect defoliation using Landsat time series. *Forests*, 2017, vol. 8, no. 8, pp. 275–295.
 51. *USGS Earth Explorer*. Available at: <https://earthexplorer.usgs.gov> (accessed 20 February 2018).
 52. *LANDSAT 8 (L8) Data users handbook*. Available at: <https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf> (accessed 20 February 2018).
 53. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 2003, vol. 41, no. 11, pp. 2674–2677.
 54. *Landsat 7 Science Data Users Handbook*. Available at: https://landsat.gsfc.nasa.gov/wpcontent/uploads/2016/08/Landsat7_Handbook.pdf (accessed 20 February 2018).
 55. *Korreksiya materialov Landsat* [Correction of Landsat materials]. Available at: <http://gislab.info/qa/landsat-data-correction.html> (accessed 20 February 2018).
 56. *QGIS-1.6*. Available at: <https://www.qgis.org/ru/site> (accessed 20 February 2018).
 57. *Pogoda i klimat* [Weather and Climate]. Available at: <http://pogodaiklimat.ru> (accessed 20 February 2018).

Received: 10 November 2018.

Information about the authors

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

Olga S. Tokareva, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Ahmed J. A. Alshaibi, student, National Research Tomsk Polytechnic University; teacher, Directorate Jeneral of Education in Diyala.

Tatyana Yu. Chernikova, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Pedro Cabral, PhD, Nova University of Lisbon.

УДК 622.279:681.5

МОДЕЛЬ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СКВАЖИНЕ С ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНЫМ НАСОСОМ

Соловьев Илья Георгиевич¹,
solovyev@ikz.ru

Говорков Денис Александрович^{1,2},
dagovorkov@mail.ru

Белашевский Сергей Сергеевич³,
s.belashevsky@gmail.com

Ведерникова Юлия Александровна²,
j_wedernik@mail.ru

¹ Федеральный исследовательский центр «Тюменский научный центр» СО РАН,
Россия, 625026, г. Тюмень, ул. Малыгина, 86.

² Тюменский индустриальный университет,
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

³ ООО «Единые системы»,
Россия, 630128, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 4г.

Актуальность исследования связана с проблемой эффективности контроля динамических режимов эксплуатации скважин, оснащенных частотно-регулируемым электроцентробежным насосом, при создании и вычислительной реализации моделей скважинной системы, работающих в режиме реального времени. Комплексная функциональность представленного в статье решения позволяет воспроизводить реальные формы поведения системы в переходных и равновесных режимах работы в условиях действий осложняющих факторов, что и является основой корректного параметрического оценивания с использованием данных натурного контроля режимных состояний.

Цель: построение комплексной гидродинамической модели типа «пласт–скважина–электронасос–устье», ориентированной на задачи диспетчерского контроля осложнённых режимов эксплуатации систем в условиях реального времени.

Методы: материального баланса, гидроупругой линейной фильтрации, гидростатики, линеаризованной кинетики потерь на трение, численного моделирования дифференциальных уравнений.

Результаты. Сконструированная и численно реализованная гидродинамическая модель скважины с электроцентробежным насосом воспроизводит целостную, логически обусловленную картину реального поведения системы в переходных и равновесных режимах эксплуатации в условиях действия осложняющих факторов. Упрощенный характер описания образующих компонент и связей позволяет реализовывать и применять функционально обновлённые инструменты контроля по месту в рамках информационных ресурсов диспетчерских служб предприятия.

Выводы. Комплексность и факторная полнота описания моделей являются основой конструирования алгоритмов и регламентов параметрической идентификации и последующего опознавания видов и уровней осложнений по данным реальной эксплуатации. Реализация вычислительного процесса в темпе с динамикой обновления данных контроля состояний и возмущений позволит использовать модель как виртуальный измеритель расширенного вектора состояния скважины в переходных и установившихся режимах работы.

Ключевые слова:

Гидродинамика притока, подъёмник, электроцентробежный насос, модель, гидростатические потери напора, продуктивность, осложняющие факторы.

Введение

Современные стандарты [1, 2] обустройства скважин средствами глубинного контроля и регулирования расширяют потенциалы эффективности новых регламентов управления процессами эксплуатации нефтедобывающих систем. Ожидаемый эффект во многом связан [3, 4] с созданием и цифровой реализацией автоматизированной технологии контроля гидродинамических параметров и состояний скважинной системы (СС) в условиях реального времени [5]. Разработка подобных решений основана на построении гидродинамической модели скважины [6], отражающей взаимовлияния составных компонентов системы и действия

внешних плохо предсказуемых факторов эксплуатации [7, 8]. Основные компоненты скважины, обустроенной электроцентробежным насосом (ЭЦН), включают:

- гидродинамику притока;
 - кинетику и гидростатику потерь напора в сегментах подъёмника: низ обсадной колонны (ОК), затрубное пространство (ЗТ), насосно-компрессорная труба (НКТ);
 - напорную характеристику частотно-регулируемого насоса;
 - параметры и состояния устья.
- Внешние по отношению к СС возмущающие факторы можно классифицировать как

- возмущения параметров притока: вариации среднепластового давления – p_R на контуре питания скважины, дрейф коэффициента продуктивности – w_R , рост обводнённости – β добываемой продукции;
- рост гидросопротивлений сегментов конструкции вследствие сорбирования парафинов, солей, механических примесей и прочих люпантов;
- снижение напора насоса вследствие абразивного износа;
- негативные проявления свободного газа из-за разгазирования нефти в насосе и на забое скважины.

Большее многообразие видов возмущений связывается с особенностями строения и работы притока скважины, а именно: одновременное дренирование нескольких горизонтов, неравномерность и неоднородность по фазному составу притока к горизонтальным сегментам забоя скважины, влияние конусов подошвенной воды и газа, прочие особенности конструкций и режимов работы. Детализация подобного класса возмущений в большей степени отвечает проблемам управления разработкой залежи и не входит в круг обсуждаемых ниже тем. С другой стороны, выделенный компонентный состав модели системы и виды осложнений соответствуют функционалу задач контроля процессов эксплуатации СС со стороны диспетчерских служб предприятия. Именно для данного класса задач контроля конструируется гидродинамическая модель скважины с ЭЦН. Фондоёмкие инструменты интегрированного термобарического анализа процессов и состояний нефтепромысловых систем [9, 10], реализуемые в виде информационно-аналитических центров компаний [11, 12], плохо подходят для задач оперативного контроля режимов в изменяющихся условиях эксплуатации. Система диспетчерского контроля и соответствующие инструменты модельного анализа и ситуационного прогнозирования целесообразно реализовывать по месту сбора первичной информации в рамках информационных ресурсов предприятия. Упрощения, связанные с переходом от пространственной детализации классического распределённого анализа к кусочно-линейным корреляциям между состояниями системы в ключевых точках подъёмника, с учётом балансовых равенств и факторов внешних возмущений, позволяет корректно воспроизводить графики состояния системы в равновесных и переходных режимах и надёжно выделять первопричины отклонений состояний от расчётных значений.

Барометрическая модель скважинной системы

На рис. 1 изображена функциональная схема скважины с ЭЦН, приведённая к вертикали, и соответствующий график распределения давлений по стволу скважины с включённым: $u=1$, и выключенным: $u=0$ насосом. Обозначения параметров и переменных состояния системы на схеме поясня-

ются в тексте по ходу изложения, единицы измерений указаны в таблице моделируемых примеров (таблица).

Модель притока представлена зоной окаймления пласта с давлением подпора – p_R , призабойной зоной (ПЗ) со средним давлением – $p(2,t)$ и забоем скважины с давлением – $p(1,t)$. Данная модель устанавливает связь между объёмными притоками жидкости в ПЗ – $q(2,t)$ и забой скважины – $q(t)$ в зависимости от перепада давлений в объявленных зонах. Для простоты обозначений явная зависимость переменных состояния от времени – t там, где это идёт без ущерба для понимания, будет опускаться. Основываясь на линейном законе упругой фильтрации [13–15], выписанном для выделенных конечных зон пласта, имеем

$$\begin{aligned} \tau(2) \frac{dp(2)}{dt} &= q(2) - q, \\ q(2) &= w(2)(p_R - p(2)), \\ q &= (1 - \beta_G(1))w(1)(p(2) - p(1)), \end{aligned} \quad (1)$$

где $\tau(2)$ – параметр объёмной гидроупругости ПЗ, а $w(1), w(2)$ – гидропроводности переходов «пласт–ПЗ» и «ПЗ–забой» по жидкости. В условиях разгазирования нефти на забое скважины, когда давление $p(1)$ становится ниже давления насыщения p_{GO} , продуктивность притока по жидкости уменьшается $(1 - \beta(1))w(1)$, за счёт частичного перекрытия фильтруемой зоны забоя свободным газом – $q_G(1)$ (не отождествлять с прорывом конуса газа из газовой шапки). По аналогии с [16], объёмная доля газа на забое – $\beta_G(1)$, определяется выражением

$$\begin{aligned} \beta_G(1) &= \frac{q_G(1)}{q_G(1) + q} = \frac{\mu_R(p_{GO} - p(1))_+}{p(1) + \mu_R(p_{GO} - p(1))_+}, \\ \mu_R &= (1 - \beta)G \frac{p_0}{p_{GO} - p_0}, \end{aligned} \quad (2)$$

что следует из линейной аппроксимации долевой

функции $\varphi_G(1) = \frac{(p_{GO} - p(1))_+}{p_{GO} - p_0}$ массы газа $m_G(1) = Y_G \varphi_G(1) q(1)$, вышедшего при давлении $p(1)$ в свободное состояние, с весовой оценкой [17] потока – $Y_G = (1 - \beta)\gamma_{G0}G$. Здесь G – газовый фактор нефти; $\gamma_{G0} = \chi_G p_0$ – удельный вес газа в нормальных термобарических условиях; χ_G – настроечный, с учетом pVT -диаграммы, параметр; $p_0 = 0,1$ МПа – давление атмосферное.

Модель «низа» колонны определяет потерю напора в интервале от забоя скважины на уровне перфорации – H_R , с давлением – $p(1)$, до уровня подвески насоса – H_N , с давлением на приеме – $p(3)$.

$$p(1) = p(3) + \gamma(H_R - H_N + r_K q), \quad (3)$$

где $\gamma = (1 - \beta)\gamma_0 + \beta\gamma_w$ – удельный вес газо-жидкостной смеси, средний по стволу скважины, с долевыми компонентами: γ_0 – удельный вес газированной нефти и γ_w – удельный вес попутной воды; $r_K = \rho_K(H_R - H_N)$ – гидросопротивление линеаризо-

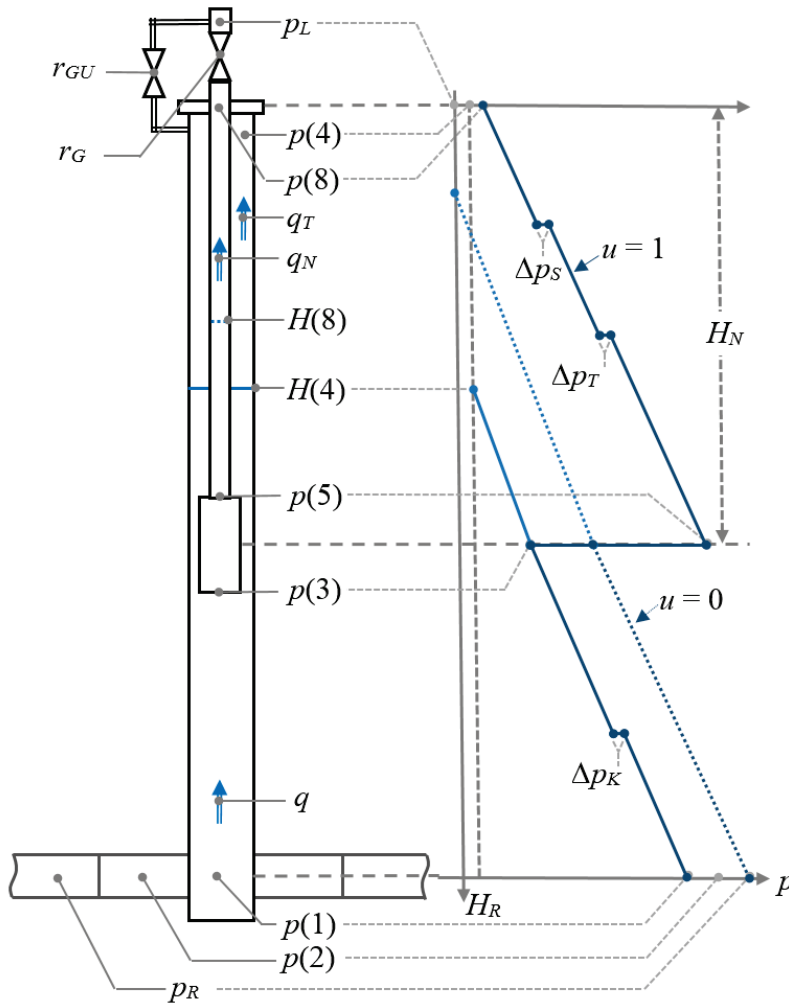


Рис. 1. Функциональная схема скважины с ЭЦН (Δp – потери напора на трение в соответствующих участках подъемника)

Fig. 1. Functional diagram of the ESP-equipped well (Δp is the pressure loss on friction in the corresponding sections of the lift)

ванной модели кинетических потерь на трение (ρ_K – настроечный коэффициент удельных потерь). Основная гидростатическая доля потерь приходится на вес столба газожидкостной смеси, а малые кинетические потери напора, аппроксимлируемые линейной формой, зависят от объемного расхода прокачиваемой жидкости – q .

По аналогичной схеме строится модель потерь напора в НКТ в интервале от выкида насоса, с давлением – $p(5)$, до устьевого штуцера, с давлением – $p(8)$:

$$p(5) = p(8) + \gamma(H_N - H(8) + r_{NS}q_N). \quad (4)$$

Здесь q_N – объемный расход жидкости в НКТ, $r_{NS} = r_N + r_s$ – суммарное гидросопротивление кинетических потерь в сегменте подъемника, составленное из $r_N = \rho_N H_N$ сопротивления НКТ и дополненное сопротивлением потерь r_s от сорбирования солей и прочих поллютантов. В случае переходных режимов, например, при выключении ЭЦН, в НКТ складываются условия обратного стравливания жидкости $q_N < 0$, если обратный клапан на выкиде

насоса негерметичен. Учитывая подобные ситуации, в модели сегмента (4) введена переменная динамического уровня жидкости в НКТ $H(8, t)$, подчиняющаяся уравнению

$$S_N \frac{d}{dt} H(8, t) = -1_8(t) q_N(t), \quad (5)$$

где S_N – площадь сечения НКТ, а $1_8(t)$ – идентификатор отсутствия подачи в линейный нефтесборник, определяется условием

$$1_8(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } (H(8) \geq 0) \vee ((H(8) = 0) \wedge (q_N \leq 0)); \\ 0, & \text{если } (H(8) = 0) \wedge (q_N > 0). \end{cases}$$

Погружные центробежные насосы типового исполнения критичны к избыточному объему свободного газа на приеме первой ступени. Если объемная доля газа у первой ступени $\beta_{GN}(t)$ превышает контрольное значение

$$\beta_{GN} > \beta_G^{LIM} \approx 0,25, \quad (6)$$

то велика вероятность выхода насоса в предаварийное состояние срыва подачи [18]. Для сохранения

функциональности ЭЦН в условиях действия газового фактора, погружные установки дополнительно обустраиваются газосепараторами [19], обеспечивающими возврат до семидесяти процентов захваченного на приеме газа в затрубное пространство. В названных условиях модель ЗТ, связывающая давления на приеме $-p(3)$ и устье $-p(4)$ (до перепускного клапана) с потоком жидкости в затрубье, может быть представлена следующим образом

$$p(3) = p(4) + \gamma(H_N - H(4) + (1 - 1_4)r_T q_T), \quad (7)$$

где кинетика потерь напора по жидкости с гидросопротивлением сегмента $-r_T = \rho_T H_N$ начинает учитываться после заполнения и последующей циркуляции жидкости $q_T = q - q_N > 0$ по затрубью, $1_4(t)$ – идентификатор отсутствия затрубной циркуляции, определяемый условием

$$1_4(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } (H(4) \geq 0) \vee ((H(4) = 0) \wedge (q_T \leq 0)); \\ 0, & \text{если } (H(4) = 0) \wedge (q_T > 0). \end{cases}$$

В приведённых соотношениях, как правило, ненулевое значение динамического уровня жидкости в ЗТ $H(4, t)$ (рис. 1) может исчезать: $H(4, t) \rightarrow 0$ с выключением ЭЦН, если изначально скважина фонтанирует. Вариации динамики уровня подчиняются уравнению

$$S_T \frac{d}{dt} H(4, t) = -1_4(t) q_T(t), \quad (8)$$

где S_T – площадь сечения ЗТ.

Модель устьевого штуцера определяет кинетику потерь напора, если имеет место истечение жидкости через него в нефтесборник с противодействием p_L

$$p(8) = p_L + \gamma(1 - 1_8)r_U q_N. \quad (9)$$

Здесь $1_8(t)$ – ранее определённый идентификатор отсутствия подачи в линейный нефтесборник.

В отличие от устьевого штуцера с гидросопротивлением r_U , устьевого перепускной клапан (рис. 1) с гидросопротивлением r_{GV} создаёт дополнительный подпор давления в затрубье, связанный с непрерывной подачей отсепарированной доли газа работающим насосом. Осложнение режима эксплуатации, вызванное падением уровня $H(4, t)$ ниже критической отметки срыва подачи

$$H(4, t) \rightarrow H_N - h^{LM}, \quad (10)$$

оказывается возможным вследствие постепенного роста давления $p(4)$ из-за перекрытия проходного сечения клапана газодрагатами. Отсюда модель устьевого перепускного клапана может быть представлена следующим образом

$$p(4) = p_L + \gamma(r_{GV} + r_{GS}) \times \left[(1 - 1_4)q_T + ik_s \varphi_G(3) \frac{Y_G}{\gamma} (q_N + q_T) \right], \quad (11)$$

где r_{GS} – дополнительное гидросопротивление, связанное с возможным осадконакоплением, $k_s \approx 0,7$ – коэффициент сепарации.

Модель насоса, представленная на рис. 2 трехзвенным кусочно-линейным графиком аппроксимации нормированной напорной характеристики, устанавливает связь между напором $-h_N$ (в метрах водяного столба), создаваемым насосом, и объёмным расходом прокачиваемой жидкости $-q_N$. Аналитическая форма представления модели имеет вид:

$$\begin{cases} h_N = u\omega^2 v_h h^0 \lambda_0(i) - \left(u\omega \frac{v_h h^0}{v_q q^0} \lambda_1(i) + 1_q r_p \right) q_N; \\ i = \arg\{q_N \in \omega v_q q^0 [qN(i+1), qN(i)]\}. \end{cases} \quad (12)$$

Здесь пара $\langle q^0, h^0 \rangle$ – соответствует номинальному режиму работы выбранного типоразмера насоса по расходу и напору; i – номер участка ломаной нормированной напорной характеристики с типовыми (рис. 2), в общем случае настраиваемыми параметрами $-\langle \lambda_0(i), \lambda_1(i) \rangle$; ω – относительная частота вращения вала двигателя (питающего напряжения), рассчитываемая по выражению $\omega = \Omega / \Omega_0$, где Ω – регулируемая угловая частота вращения вала двигателя, а Ω_0 – номинальная угловая частота; $u = \{0, 1\} = \{\text{ВЫКЛ}, \text{ВКЛ}\}$ – идентификатор работы ЭЦН; $1_q(t)$ – идентификатор возможного прототока, определяемый условием

$$1_q(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } q_N \leq 0; \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

r_p – гидросопротивление негерметичного обратного клапана на выкиде насоса; $\langle v_h, v_q \rangle$ – параметры деформации рабочей характеристики насоса по шкалам напора и расхода вследствие износа и засорения.

Замыкая приведённые соотношения (1)–(12) балансовым равенством «нагрузка=напор»

$$\frac{1}{\gamma} (p(5) - p(3)) = h_N, \quad (13)$$

приходим в итоге к искомой динамической модели СС с частотно-регулируемым ЭЦН. Изображённая на рис. 3 блок-схема модели фиксирует функционально-разделённую структуру данных исходных параметрических настроек, необходимых для запуска вычислительного процесса, входные управляющие воздействия, функционально разнесённые векторы возмущений и выходных состояний, воспроизводимых в процессе моделирования.

Вычислительный анализ

Перейдём к результатам вычислительного анализа динамики переходных режимов работы скважины с параметрами из таблицы. В первом варианте рассматривается скважина, обеспечивающая фонтанный режим добычи с $q_N = 14 \text{ м}^3/\text{сут}$, $q_T = 17 \text{ м}^3/\text{сут}$ при выключенном насосе и подачу $q_N = 81 \text{ м}^3/\text{сут}$ при включённом ЭЦН с номинальной относительной частотой вращения $\omega 1$. Во втором – скважина без фонтанирования. Рассматриваются режимы пуска после длительного останова и последующей вариации относительной частоты.

Графики переходных процессов для указанных моделей (рис. 4, 5) представляют собой результаты моделирования состояний скважины при последовательных пуске, останове, повторном пуске и вариации частоты вращения работающего насоса. Временные интервалы моделирования на каждом из указанных режимов выбраны так, что система выходит на стационарный режим по переменным состояниям ближе к концу интервала. На представленных далее графиках выделены наиболее интересные с точки зрения анализа временные диапазоны и моменты времени. В первом случае, на рис. 4, воспроизводятся переходные процессы при пусках и остановах ЭЦН фонтанирующей скважины, где отмечены следующие моменты времени и состояния.

1. Останов скважины из стационарного рабочего состояния. Начиная с момента $t_1=10,005$ (сут) динамический уровень $H(4,t)$ в ЗТ начинает подниматься (затруб заполняется жидкостью с притока), а в НКТ вследствие стравливания жидкости через негерметичный обратный клапан ЭЦН образуются «пустоты» $H(8, t) > 0$.
2. При $t_2=10,218$ забойное давление становится выше давления насыщения и влияние свободного газа на приток исчезает.
3. При $t_3=10,221$ уровни ГЖС в ЗТ и НКТ выравниваются, и далее происходит их совместное движение в сторону устья.
4. Вследствие разного гидросопротивления сегментов подъёмника полное заполнение ЗТ происходит раньше $t_{41}=10,324$, чем НКТ $t_{42}=10,334$. Включение дополнительного сопротивления перепускного клапана r_{GV} в канал циркуляции $q_T(t_{41}) > 0$ снижает интенсивность подачи из ЗТ, активизируя заполнение НКТ. После заполнения НКТ и подключения устьевого штуцера с гидросопротивлением r_U происходит вторичное перераспределение расходов в соответствии с суммарными сопротивлениями каналов подъёмника при одинаковом подпоре со стороны забоя.
5. В отличие от момента останова $t_1=10,005$, когда объём притока и стравливания из НКТ поступают в ЗТ, обеспечивая положительный скачок $q_T(t_1) > 0$, вторичный запуск скважины $t_5=20$ со стационарного состояния останова интенсифицирует обратный забор жидкости из ЗТ $q_T(t_5) > 0$,

обеспечивая момент повышенной подачи насоса $q_T(t_5) > 0$ при пуске.

Таблица. Параметры моделируемой скважинной системы
 Table. Parameters of the simulated well system

| Наименование, ед. изм. Name, units | Величина Value | Обозначение Notation |
|--|----------------------|-------------------------|
| <i>Фонтанирующая скважина / Fountain well</i> | | |
| Среднепластовое давление, МПа Average reservoir pressure, MPa | 28 | p_R |
| Глубина забоя по вертикали, м / Well depth, m | 3000 | H_R |
| Коэффициент гидропроводности притока из пласта в ПЗ скважины, м ³ /МПа·сут Reservoir productivity coefficient, m ³ /MPa·day | 12 | $w(1)$ |
| Коэффициент гидропроводности притока из ПЗ в забой скважины, м ³ /МПа·сут Inflow productivity coefficient, m ³ /MPa·day | 60 | $w(2)$ |
| Объёмная доля воды, ед. / Water cut, units | 0,3 | β |
| Удельный вес, МПа/м / Specific gravity, MPa/m | | |
| · нефти / oil | $0,68 \cdot 10^{-2}$ | γ_o |
| · воды / water | $1,1 \cdot 10^{-2}$ | γ_w |
| · газа / gas | $0,8 \cdot 10^{-5}$ | γ_{go} |
| Газовый фактор, ед. / Gas factor, units | 100 | G |
| Давление насыщения, МПа Saturation pressure, MPa | 25 | p_{GO} |
| Давление в линии нефтесбора, МПа Oil collector line pressure, MPa | 1,5 | p_L |
| Гидросопротивления, м ³ /(МПа·сут) Hydroresistances, m ³ /(MPa·day) | | |
| · обсадной колоны / casing | 0,2 | r_K |
| · НКТ / tubing | 1,6 | r_N |
| · затрубного пространства / annulus | 0,8 | r_T |
| · устьевого штуцера / wellhead tubing choke | 2 | r_U |
| · перепускного клапана wellhead annulus choke | 3 | r_{GV} |
| <i>Параметры насоса / Pump parameters</i> | | |
| · уровень подвески, м / pump depth, m | 2000 | H_N |
| · номинальный напор, м / nominal head, m | 1700 | h^0 |
| · номинальный дебит, м ³ /сут nominal rate, m ³ /day | 60 | q^0 |
| <i>Скважина без фонтанирования / Well without fountain</i> | | |
| Среднепластовое давление, МПа Average reservoir pressure, MPa | 21 | p_R |
| Давление насыщения, МПа Saturation pressure, MPa | 18 | p_{GO} |

6. В момент времени $t_6=20,11$ забойное давление $p(1, t_6)$ становится ниже давления насыщения p_{GO} и приток вновь входит в нелинейные условия действия газового фактора.

| i | 1 | 2 | 3 |
|-------------|------|-----|-----|
| qN | 5/3 | 4/3 | 2/3 |
| λ_0 | 10/3 | 2 | 3/2 |
| λ_1 | 2 | 1 | 1/4 |

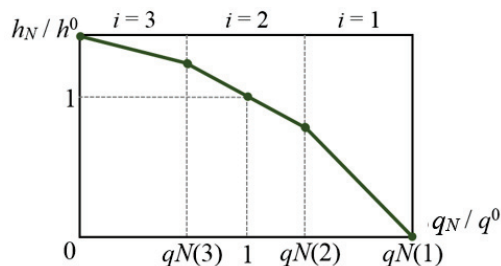


Рис. 2. График и таблица параметров нормированной напорной характеристики насоса q_N/q^0

Fig. 2. Chart and table of normalized pump discharge characteristic parameters q_N/q^0

На рис. 5 представлены графики переходных процессов при пуске и последующей вариации частоты вращения насоса для нефонтанирующей скважины, где выделены следующие временные моменты и состояния.

1. С пуском скважины из стационарного состояния останова при $t_1=20,005$ начинается заполнение НКТ жидкостью.
2. Момент полного заполнения НКТ и начала излива через устьевой штуцер в нефтесборник $t_2=20,042$. В данный момент имеет место скачкообразное снижение дебита в НКТ вследствие перепада давления на штуцере.
3. Понижение относительной частоты вращения вала насоса с 1 до 0,9 ед. в момент времени: $t_3=35$.

4. Восстановление частоты вращения вала насоса с 0,9 до 1 ед. в момент $t_4=36$.
 5. Повышение относительной частоты вращения вала с 1 до 1,1 ед. при $t_5=37$.
 6. В момент $t_6=37,72$ выход системы на условие «срыв подачи» по фактору избыточного содержания свободного газа у первой ступени насоса $\beta_{GN} > \beta_G^{LM} \approx 0,25$.
- Заметим, что все четыре временные шкалы графиков на рис. 4, 5 имеют разные масштабы.

Выводы

1. Несмотря на упрощенный характер описания составных компонент системы, построенная модель (1)–(13) отражает целостную и логически связанную картину поведения скважины с

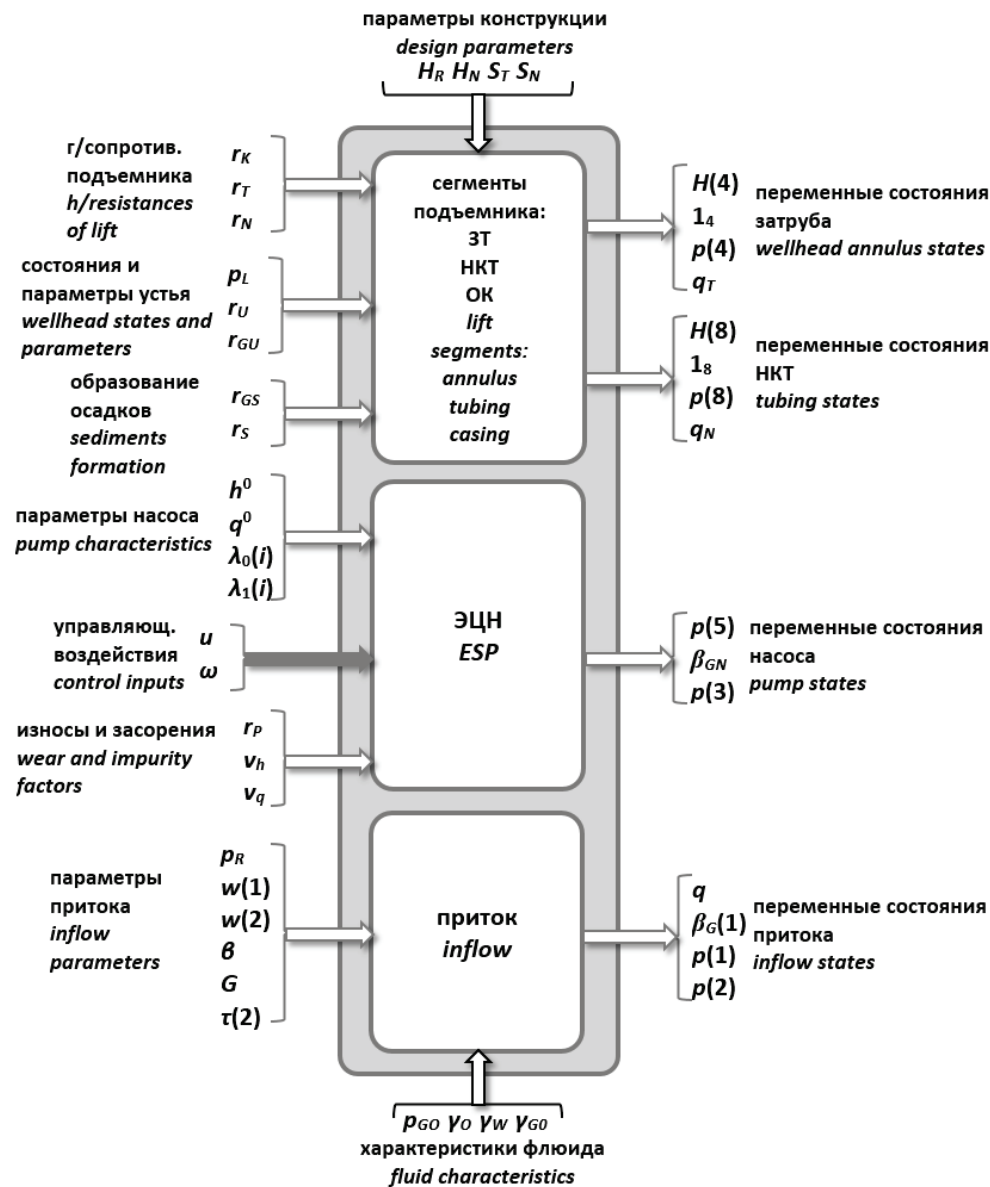


Рис. 3. Параметрические настройки, возмущения и входо-выходные состояния модели

Fig. 3. Parametric settings, disturbances and input-output states of the model

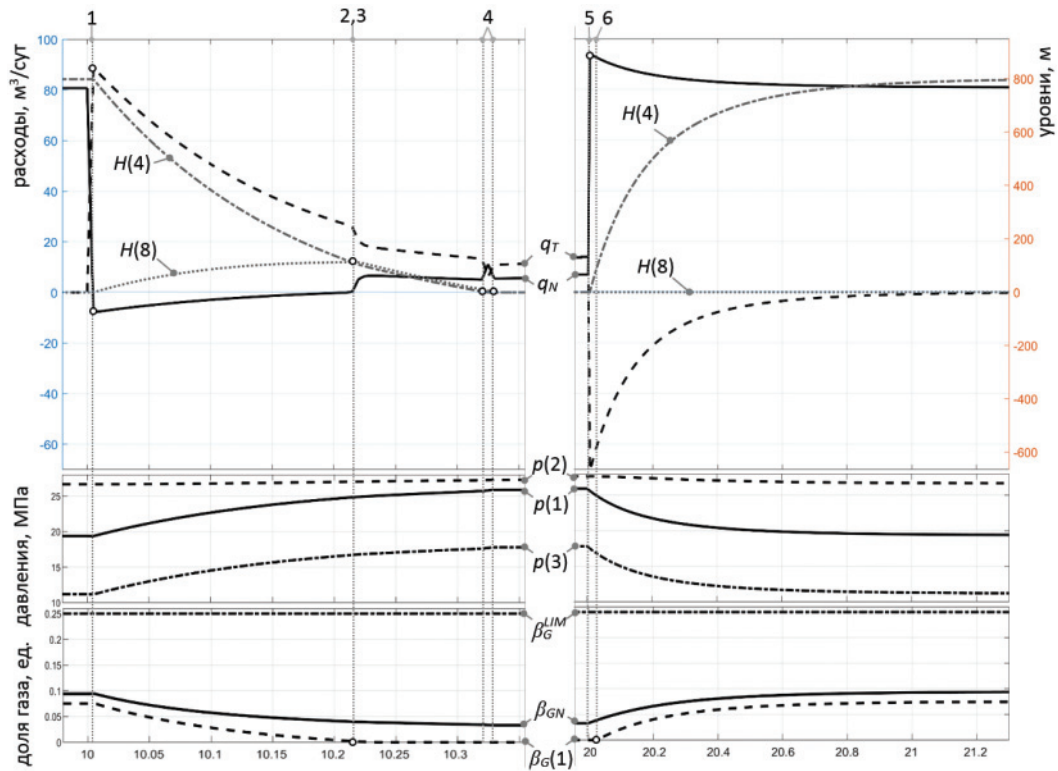


Рис. 4. Графики переходных процессов гидродинамических состояний в фонтанирующей скважине при пуске/останове
 Fig. 4. Charts of hydrodynamic states transient processes in flowing well at start/stop

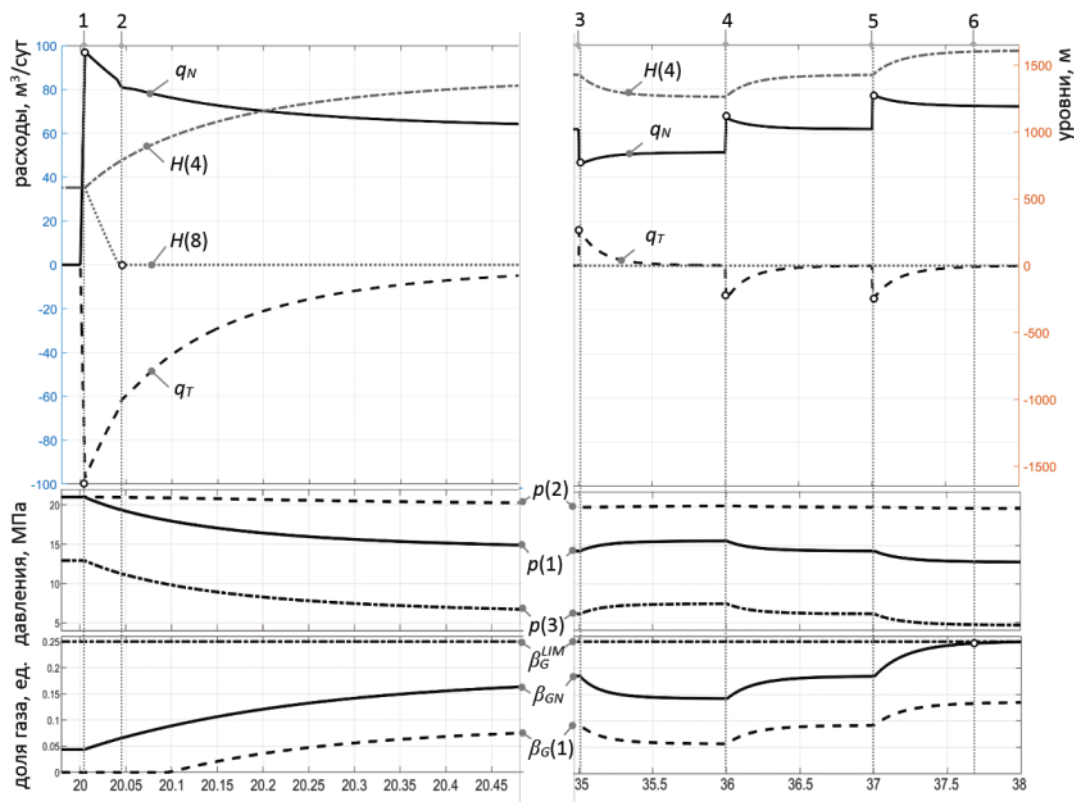


Рис. 5. Графики переходных процессов гидродинамических состояний в скважине без фонтана при смене частоты вращения насоса
 Fig. 5. Charts of hydrodynamic states transient processes in a well without a fountain due to pump rotation frequency changes

- частотно-регулируемым ЭЦН в переходных и равновесных режимах эксплуатации.
2. Компонентная и факторная полнота математического описания гидродинамики системы является необходимым условием конструирования алгоритмов и регламентов параметрического оценивания [15, 16] по обновляемым данным промыслового контроля с последующим доопределением видов и уровней осложнений. Разработка схем устойчивого параметрического оценивания [20, 21] – одно из важных направлений развития рассмотренного решения.

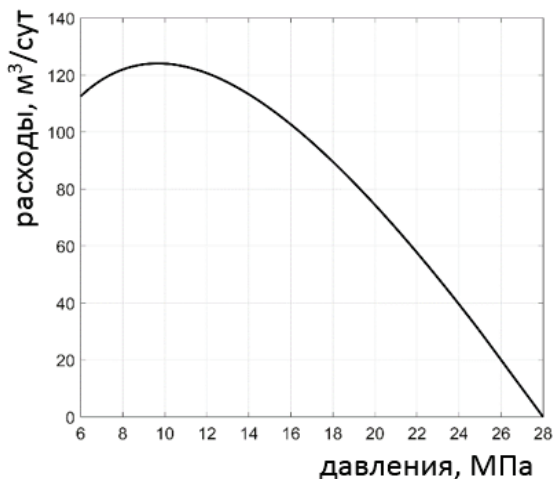


Рис. 6. Нелинейная кривая притока в условиях действия газового фактора на забое скважины

Fig. 6. Nonlinear inflow curve under the conditions of the gas factor at the well bore-hole

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Haberer S., Krasikov A., Lavrinenko A. ESP monitoring and control system implementation in Western Siberia Brownfield // SPE Russian oil and gas exploration & production technical conference and exhibition. – 2014. URL: <https://doi.org/10.2118/171151-MS> (дата обращения: 01.11.2018).
2. 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.
3. Топольников А.С. Интеллектуальная обработка данных (В) ТМС для интерпретации при проведении авто-ГДИС // Инженерная практика: Производственно-технический нефтегазовый журнал. – 2016. – Выпуск 10–11. URL: <http://glavteh.ru/авто-гдис-высокоточные-тмс/> (дата обращения 11.07.2018).
4. Live well models a tool for production optimization / R.V. Rachapudi, B.Y. Haider, T. Al-Mutairi, K.W. Al Deyain, M. Al-Yahya, A. Shakeel, K.R. Qureshey, M. Harith // SPE Middle East intelligent energy conference and exhibition. – Manama, Bahrain, 28–30 October, 2013. URL: <https://doi.org/10.2118/167469-MS> (дата обращения: 01.11.2018).
5. Real-time optimization approach for 15,000 ESP wells / S. Zolnik, A. Pashali, D. Markelov, M. Volkov // Intelligent energy conference and exhibition. – 2008. URL: <https://doi.org/10.2118/112238-MS> (дата обращения: 01.11.2018).
6. Сабиров А.А. Новые разработки в технике и технологии добычи нефти // Инженерная практика: Производственно-технический нефтегазовый журнал. – 2017. – Выпуск 01–02. URL: <http://glavteh.ru/новые-разработки-в-технике-и-технолог/> (дата обращения 11.07.2018)
7. Extending ESP run life in gassy wells application / B. Kadio-Morokro, F. Curay, J. Fernandez, V. Salazar // SPE electric submersible pump symposium. – 2017. URL: <https://doi.org/10.2118/185272-MS> (дата обращения: 01.11.2018).
8. Honório W., Lemos D., De Lima R. ESP control and monitoring system of heavy oil Peregrino Field // SPE artificial lift conference. – 2015. URL: <https://doi.org/10.2118/173929-MS> (дата обращения: 01.11.2018).
9. PIPESIM. Steady-State Multiphase Flow Simulator. URL: <http://www.software.slb.com/products/pipesim> (дата обращения: 01.11.2018).
10. Petroleum Experts Integrated Production Modelling software. URL: <http://www.petex.com> (дата обращения: 01.11.2018).
11. Digital oilfield down under: implementation of an integrated production monitoring and management system for the Maari Field / A.J. Marron, M. Milner, A. O'Hagan, S.S. Biniwale, R. Trivedi, T. Simpson, A.C. Tran // SPE/IATMI Asia Pacific oil & gas conference and exhibition. – 2015. URL: <https://doi.org/10.2118/176485-MS> (дата обращения: 01.11.2018).
12. Intelligent control system for gas-condensate field: a holistic automated smart workflow approach / V. Fomin, P. Kushmanov, P. Buryanov, M. Aksenov, N. Durygin, I. Solovyev, D. Govorkov,

- Y. Vedernikova, D. Iskakov // SPE Russian petroleum technology conference and exhibition. – 2016. URL: <https://doi.org/10.2118/181986-MS> (дата обращения: 01.11.2018).
13. Подземная гидромеханика / К.С. Басниев, Н.М. Дмитриев, Р.Д. Каневская, В.М. Максимов. – М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2005. – 496 с.
 14. Подземная гидравлика / К.С. Басниев, А.М. Власов, И.Н. Кочина, В.М. Максимов. – М.: Недра, 1986. – 303 с.
 15. Соловьев И.Г., Власов Д.А. Параметрическое оценивание модели гидродинамики плоскорадиального притока // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2012. – № 6. – С. 19–24.
 16. Соловьев И.Г., Говорков Д.А. Идентификация гидродинамических параметров скважины оборудованной погружным насосом с наблюдателем процесса разгазирования нефти в подъемнике. Основы методики I // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2009. – № 3. – С. 28–34.
 17. Соловьёв И.Г., Говорков Д.А., Ведерникова Ю.А. Режимы поведения скважин с ЭЦН при высоком газовом факторе // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2017. – № 6. – С. 28–34.
 18. Метод снижения влияния свободного газа на эффективность работы скважинного насоса / К.Р. Уразаков, А.М. Азизов, И.А. Мухин, А.В. Щелоков // Нефтегазовое дело. – 2017. – Т.15. – № 2. – С. 58–62.
 19. Хасанова Р.Д., Ивашов А.Ю., Вольцов А.А. Сепарационные установки для нефти с высоким газовым фактором // Инженерная практика: Производственно-технический нефтегазовый журнал. – 2016. – Вып. 12. URL: <http://glavteh.ru/сепарационные-установки-нефть-газ/> (дата обращения 11.07.2018).
 20. Сергеев В.Л., Ву К.Д. Адаптивная интерпретация результатов гидродинамических исследований с учетом влияния ствола скважины // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 9. – С. 70–77.
 21. Боловин Е.В., Глазырин А.С. Метод идентификации параметров погружных асинхронных электродвигателей установок электроприводных центробежных насосов для добычи нефти // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 1. – С. 123–131.
 22. Соловьёв И.Г., Говорков Д.А. Задачи и инструменты анализа и управления режимами эксплуатации скважин // НТЖ Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2013. – № 4. – С. 32–37.
 23. Белашевский С.С., Говорков Д.А., Соловьёв И.Г. Регламент периодического обслуживания осложнённого фонда скважин // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2018. – № 1. – С. 21–26.
 24. Solovyev I.G., Govorkov D.A. Mathematical model and computational analysis of hydrodynamics of the inflow to a horizontal segment-controlled well // Mathematical models and computer simulations – 2013. – V. 5. – № 1. – P. 1–6.

Поступила 07.11.2018 г.

Информация об авторах

Соловьёв И.Г., кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Тюменский научный центр» СО РАН.

Говорков Д.А., кандидат технических наук, старший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Тюменский научный центр» СО РАН; доцент Тюменского индустриального университета.

Белашевский С.С., главный специалист ООО «Единые системы».

Ведерникова Ю.А., кандидат технических наук, доцент Тюменского индустриального университета.

UDC 622.279:681.5

TRANSIENT PROCESSES MODEL OF A WELL WITH FREQUENCY-REGULATED ELECTRIC SUBMERSIBLE PUMP

Ilya G. Solovyev¹,
solovyev@ikz.ru

Denis A. Govorkov^{1,2},
dagovorkov@mail.ru

Sergey S. Belashevsky³,
s.belashevsky@gmail.com

Yulia A. Vedernikova²,
j_wedernik@mail.ru

¹ Tyumen Scientific Centre SB RAS,
86, Malygin street, Tyumen, 625000, Russia.

² Tyumen Industrial University,
38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russia.

³ United system,
4g, Kutateladze street, Novosibirsk, 630128, Russia.

The relevance of the research is related to the effectiveness of monitoring dynamic operating modes of wells equipped with a frequency-controlled electric submersible pump at development and computational implementation of well system models operating in real time. Complex functionality of the solution introduced in the article allows reproducing the systems real forms of behavior in transient and equilibrium operation modes under the impact of complicating factors, which is the basis of the correct parametric estimation using real-time control data of well operating states.

The main aim of the research is to construct a complex hydrodynamic model of the «reservoir–well–electric pump–wellhead» type, oriented to the tasks of complicated operating modes control of real-time systems.

Objects: material balance, linear filtration, hydrostatics, linearized kinetics of friction losses, numerical modeling of differential equations.

Methods. The constructed and implemented hydrodynamic model of electric submersible pump-equipped well reproduces a holistic and logical «portrait» of actual behavior of the system in transient and equilibrium operation modes under the impact of complicating factors. The simplified nature of model components and connections descriptions allows the implementation and usage of functionally updated monitoring applications within the information resources of the enterprise.

Results. Complexity and factor wholeness of the model description are the basis for designing algorithms and regulations for parametric identification and subsequent recognition of the types and levels of impacting complications on system using actual operation data. The implementation of the computational process in sync with the dynamics of state and disturbances control data update make it possible to use the model as a virtual measure of the extended vector of well states in transient and steady-state operating modes.

Key words:

Inflow hydrodynamics, lift, electric centrifugal pump, model, hydrostatic head losses, productivity, complicating factors.

REFERENCES

1. Haberer S., Krasikov A., Lavrinenko A. ESP monitoring and control system implementation in Western Siberia Brownfield. *SPE Russian oil and gas exploration & production technical conference and exhibition*, 2014. Available at: <https://doi.org/10.2118/171151-MS> (accessed 1 November 2018).
2. Pashali A.A., Aleksandrov M.A., Kliment'ev A.G., Yamalov I.R., Topolnikov A.S., Zhonin A.V., Kolonskikh 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.
3. Topolnikov A.S. Intellektualnaya obrabotka dannykh (V) TMS dlya interpretatsii pri provedenii avto-GDIS [Intelligent processing of telemetry data for interpretation during automatic well tests]. *Inzhenernaya praktika*, 2016, no. 10–11. Available at: <http://glavteh.ru/авто-гдис-высокочастотные-тмс/> (accessed 11 July 2018).
4. Rachapudi R.V., Haider B.Y., Al-Mutairi T., Al Deyain K.W., Al-Yahya M., Shakeel A., Qureshey K.R., Harith M. Live well models a tool for production optimization. *SPE Middle East intelligent energy conference and exhibition*. Manama, Bahrain, 28–30 October, 2013. Available at: <https://doi.org/10.2118/167469-MS> (accessed 1 November 2018).
5. Zdolnik S., Pashali A., Markelov D., Volkov M. Real-time optimization approach for 15,000 ESP wells. *Intelligent energy conference and exhibition*. 2008. Available at: <https://doi.org/10.2118/112238-MS> (accessed 1 November 2018).
6. Sabirov A.A. Novye razrabotki v tekhnike i tekhnologii dobychi nefiti [New developments in oil production technics and technology]. *Inzhenernaya praktika*, 2017, no. 01–02. Available at: <http://glavteh.ru/новые-разработки-в-технике-и-технолог/> (accessed 11 July 2018).
7. Radio-Morokro B., Curay F., Fernandez J., Salazar V. Extending ESP run life in gassy wells application. *SPE electric submersible*

- pump symposium*. 2017. Available at: <https://doi.org/10.2118/185272-MS> (accessed 1 November 2018).
8. Honório W., Lemos D., de Lima R. ESP control and monitoring system of heavy oil Peregrino Field. *SPE artificial lift conference*. 2015. Available at: <https://doi.org/10.2118/173929-MS> (accessed 1 November 2018).
 9. PIPESIM. Steady-State Multiphase Flow Simulator. Available at: <http://www.software.slb.com/products/pipesim> (accessed 1 November 2018).
 10. Petroleum Experts Integrated Production Modelling software. Available at: <http://www.petex.com> (accessed 1 November 2018).
 11. Marron A.J., Milner M., O'Hagan A., Biniwale S.S., Trivedi R., Simpson T., Tran A.C. Digital oilfield down under: implementation of an integrated production monitoring and management system for the Maari Field. *SPE/IATMI Asia pacific oil & gas conference and exhibition*. 2015. Available at: <https://doi.org/10.2118/176485-MS> (accessed 1 November 2018).
 12. Fomin V., Kushmanov P., Buryanish P., Aksenov M., Durygin N., Solovyev I., Govorkov D., Vedernikova Y., Iskakov D. Intelligent control system for gas-condensate field: a holistic automated smart workflow approach. *SPE Russian petroleum technology conference and exhibition*. 2016. Available at: <https://doi.org/10.2118/181986-MS> (accessed 1 November 2018).
 13. Basniev K.S., Dmitriev N.M., Kanevskaya R.D., Maksimov V.M. *Podzemnaya gidromekhanika* [Underground hydromechanics]. Izhevsk, Institute of computer research, 2005. 496 p.
 14. Basniev K.S., Vlasov A.M., Kochina I.N., Maksimov V.M. *Podzemnaya gidravlika* [Underground hydraulics]. Moscow, Nedra Publ., 1986. 303 p.
 15. Solovyev I.G., Vlasov D.A. Parametric estimation of a hydrodynamic model of even-radial inflow. *Automation, telemechanization and communication in oil industry*, 2012, no. 6, pp. 19–24. In Rus.
 16. Solovyev I.G., Govorkov D.A. Identification of hydrodynamic parameters of a well equipped with submersible pump using the observer of the oil degassing process in the lift. Basics of the methodology I. *Automation, telemechanization and communication in oil industry*, 2009, no. 3, pp. 28–34. In Rus.
 17. Solovyev I.G., Govorkov D.A., Vedernikova Yu.A. Operating modes of ESP-equipped wells under high gas factor. *Automation, telemechanization and communication in oil industry*, 2017, no. 6, pp. 28–34. In Rus.
 18. Urazakov K.R., Azizov A.M., Mukhin I.A., Shchelokov A.V. The method of reducing the influence of free gas on the performance of the downhole pump. *Oil industry*, 2017, vol. 15, no. 2, pp. 58–62. In Rus.
 19. Khasanova R.D., Ivashov A.Yu., Voltsov A.A. Separatsionnye ustanovki dlya nefi s vysokim gazovym faktorom [Separating installations for oil with a high gas factor]. *Inzhenernaya praktika*, 2016, no. 12. Available at: <http://glavteh.ru/сепарационные-установки-нефть-газ/> (accessed 11 July 2018).
 20. Sergeev V.L., Quang D.V. Adaptive interpretation of the results of hydrodynamic research considering a wellbore storage. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 9, pp. 70–77. In Rus.
 21. Bolovin E.V., Glazyrin A.S. Method for identifying parameters of submersible induction motors of electrical submersible pump units for oil production. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 1, pp. 123–131. In Rus.
 22. Solovyev I.G., Govorkov D.A. Tasks and tools of analysis and control of oil wells operational modes. *Automation, telemechanization and communication in oil industry*, 2013, no. 4, pp. 32–37. In Rus.
 23. Belashevskiy S.S., Govorkov D.A., Solovev I.G. Regulation of complicated wells periodical service. *Automation, telemechanization and communication in oil industry*, 2018, no. 1, pp. 21–26. In Rus.
 24. Solovyev I.G., Govorkov D.A. Mathematical model and computational analysis of hydrodynamics of the inflow to a horizontal segment-controlled well. *Mathematical models and computer simulations*, 2013, vol. 5, no. 1, pp. 1–6.

Received: 7 November 2018.

Information about the authors

Ilya G. Solovyev, senior researcher, Tyumen Scientific Centre SB RAS.

Denis A. Govorkov, senior researcher, Tyumen Scientific Centre SB RAS; associate professor, Tyumen Industrial University.

Sergey S. Belashevsky, main specialist, United system.

Yulia A. Vedernikova, associate professor, Tyumen Industrial University.

УДК 556.114:616.71(571.55)

НОВЫЕ ДАННЫЕ ОБ ЭЛЕМЕНТНОМ СОСТАВЕ ПРИРОДНЫХ ВОД В РАЙОНЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УРОВСКОЙ (КАШИНА–БЕКА) БОЛЕЗНИ (ЗАБАЙКАЛЬСКИЙ КРАЙ)

Замана Леонид Васильевич¹,
l.v.zamana@mail.ru

Рихванов Леонид Петрович²,
rikhvanov@tpu.ru

Соктоев Булат Ринчинович²,
bulatsoktoev@tpu.ru

Барановская Наталья Владимировна²,
nata@tpu.ru

Эпова Екатерина Сергеевна¹,
apikur1@ya.ru

Солодухина Мария Анатольевна¹,
mabn@ya.ru

Михайлова Лариса Альфредасовна³,
mihailova-la@mail.ru

Копылова Юлия Григорьевна²,
kyg@tpu.ru

Хвашевская Альбина Анатольевна²,
hvashevskaya@tpu.ru

¹ Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН,
Россия, 672002, г. Чита, ул. Недорезова, 16а.

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

³ Читинская государственная медицинская академия,
Россия, 672000, г. Чита, ул. Горького, 39а.

Актуальность. Болезнь Кашина–Бека, или уровская болезнь, известна уже более 160 лет, однако до сих пор не выявлена истинная причина, вызывающая развитие данного заболевания. На данный момент известно более 20 теорий и гипотез, объясняющих причины ее появления, ведущей из которых является биогеохимическая, впервые предложенная А.П. Виноградовым. Согласно данной теории, болезнь Кашина–Бека обусловлена влиянием фактора окружающей среды в виде недостатка или избытка химического элемента/соединений. В связи с этим актуальным является изучение химического состава компонентов природной среды в зоне проявления данной болезни.

Цель исследования: оценка химического состава природных вод, используемых для питьевого водоснабжения, на территории проявления болезни Кашина–Бека в Забайкальском крае.

Объекты: подземные и поверхностные воды.

Методы. Гидрогеохимический, элементный состав проб воды определен методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой.

Результаты. Изучено содержание 71 химического элемента, в том числе ранее не рассматриваемых для данной территории, в природных водах. Установлено, что воды, используемые для питьевого водоснабжения, характеризуются низким содержанием кальция, что может являться индикатором неблагополучия территории по этому заболеванию без отягчающего влияния как стронция, так фосфора и марганца. Содержания селена, как и йода, в изученных водах находятся ниже оптимального для питьевого использования уровня, что хорошо согласуется с литературными данными по Китаю, где в районах распространения болезни Кашина–Бека компоненты природной среды (воды, почвы, растительность) обеднены йодом. В данном случае недостаток йода может вызвать развитие эндемического зоба, на фоне которого уровская болезнь проявляется ярче.

Ключевые слова:

Уровская болезнь, болезнь Кашина-Бека, гидрогеохимия, элементный состав, подземные и поверхностные воды, кальций, селен, йод.

Введение

Вот уже более 160 лет после публикации заметки землемера И.М. Юренского в «Трудах вольного экономического общества» (1849) идут исследования уровской (название дано по месту ее первого выявления – р. Уров) болезни или болезни Кашина-Бека (по фамилиям врачей, впервые изучивших этот недуг – Н.И. Кашина и Е.В. Бека).

Болезнь Кашина-Бека («уровская» болезнь, «Big Bone Disease») представляет собой общее заболевание с преимущественным поражением костно-суставной системы в виде деформирующего хондроостеоартроза (Ф.П. Сергиевский, Н.И. Дамперов, Л.Ф. Кравченко и др.). Этот же диагноз обсуждается и сегодня [1]. Заболевание обычно начинается в период роста организма, развивается постепенно и медленно, протекает преимущественно хронически. В конечном итоге она приводит к нарушению функций опорно-двигательного аппарата и к ограничению трудоспособности.

Ареал распространения данной болезни на территории Забайкальского края охватывает бассейны рр. Уров, Урюмкан, Газимур, Унда, Зола, верховьев рр. Нижняя и Средняя Борзя и ряда других. Судя по схематичной карте (рис. 1), построенной по материалам Н.А. Дамперова [2], очаг болезни достаточно локализован. Согласно тем же материалам, средняя заболеваемость по территории составляла 33 %.

На этиологию заболевания за все время исследований высказано более 20 гипотез, которые можно разделить на несколько групп, основные из

которых это биогеохимические и микробиологические [1, 3, 4]. Высказываются точки зрения и о полиэтиологичности этого заболевания [5–12]. Начиная с 1940-х гг. ведущей гипотезой является биогеохимическая, впервые предложенная А.П. Виноградовым. Согласно ей, болезнь Кашина-Бека обусловлена особенностями химизма окружающей среды, вследствие которых наблюдается своеобразная реакция организма на избыток или недостаток того или иного химического элемента.

Из биогеохимических взглядов на природу данного заболевания следует отметить следующие гипотезы: 1) Са-Р, высказанную А.П. Виноградовым; 2) Са-Sr (Ba), предложенную В.В. Ковальским; 3) Р-Mn, обосновываемую А.В. Вощенко с коллегами. Во всех без исключения случаях природной средой, ответственной за заболеваемость населения, считается питьевая вода, а затем уже все остальные компоненты. Именно с качеством воды связывают заболеваемость местного населения. В ряде исследований фигурируют такие термины, как «здоровая» и «вредная (больная) вода», которые перешли и в научную литературу (А.П. Виноградов, Ф.П. Сергиевский и др.). Неслучайно, что одним из методов борьбы с этим недугом было переселение на «здоровые» воды (Н.И. Кашин и др.). В связи с этим изучению вод было уделено внимание многих исследователей (П.Н. Палей и др.). Одним из последних обобщений результатов гидрогеохимических съёмок, выполненных геологами на территории Забайкальского края при реализации общих и специальных тематических исследо-

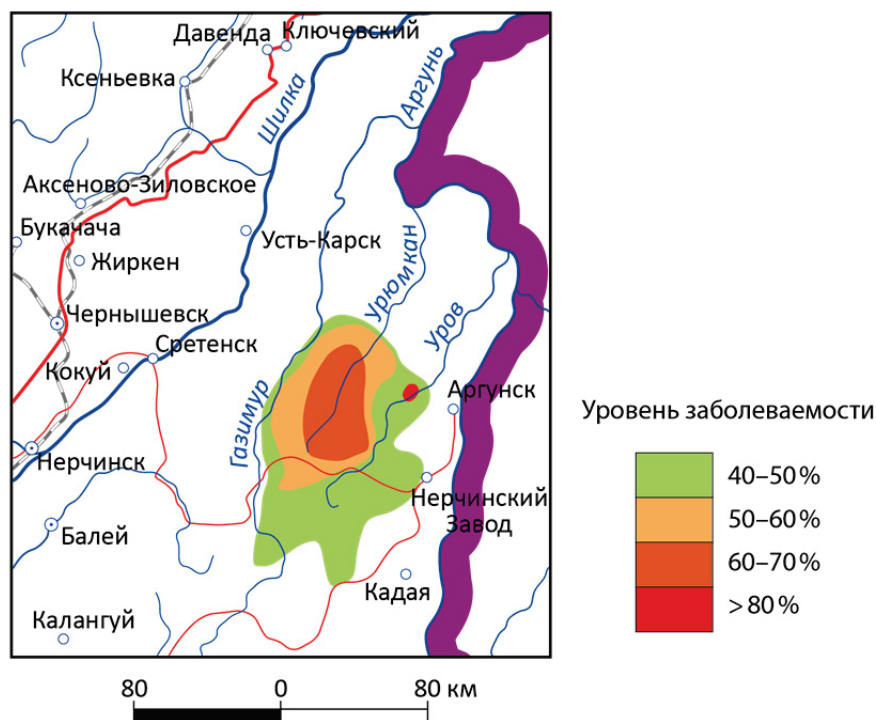


Рис. 1. Схематическая карта пространственного распространения болезни Кашина-Бека (основана на материалах карты [2])

Fig. 1. Schematic map of Kaschin-Beck disease spatial distribution (based on the map [2])

ваний, являются данные, опубликованные Л.В. Заманой [13–16]. С тех пор гидрогеохимические исследования за редким исключением не ведутся, так же как и сама проблема болезни Кашина–Бека по ряду причин, в том числе из-за уменьшения количества больных (А.В. Вощенко и др.), перестала обсуждаться в российской научной литературе.

В свою очередь эта болезнь, как показывает литературный поиск, имеет более широкую распространённость. Наибольшее ее распространение отмечено в Китае, где по различным оценкам около 2,5 миллионов человек подвержены этой болезни и более 30 миллионов проживают в районе ее проявления [17]. Другими регионами, где болезнь распространена, являются Северная Корея и, возможно, некоторые области в Африке [4, 18]. В мировой научной англоязычной литературе болезнь получила свою аббревиатуру (KBD – Kashin–Beck disease, Kaschin–Beck disease), а также еще одну гипотезу, объясняющую этиологию заболевания, – Se теория, которая является в настоящее время в Китае доминирующей. Согласно ей, главным фактором развития болезни Кашина–Бека является недостаток данного химического элемента в окружающей среде и его биодоступность [19–26].

Всё это предопределило необходимость вернуться к данной проблеме в России четверть века спустя после закрытия в 1993 г. специализированной Проблемной научно-исследовательской лаборатории (ПНИЛ) по изучению причин, диагностики и методов лечения уровской болезни.

Объекты и методы исследования

Опробование водных источников было выполнено в сентябре 2017 г. В пункты опробования включены постоянно или временно используемые для питьевого водоснабжения источники как подземных, так и поверхностных вод (табл. 1). В региональном плане все они относятся к территории распространения уровской эндемии, но характеризуются различными уровнями ее проявления.

Село Уровские Ключи входило в число исследованных А.П. Виноградовым пунктов [27] и относилось им, по его терминологии, к «здоровым». Село Тайна было взято по причине его включения в исследования А.В. Вощенко с коллегами [28, 29]: по состоянию на 1988 г. 30,4 % жителей было поражено этим заболеванием. Село Калга использовалось нами как условный фон. Были также опробованы минеральные углекислые воды курорта Ямкун, на котором лечились больные уровской болезнью.

Анализ проб воды выполнен в проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии научно-образовательного центра «Вода» Национального исследовательского Томского политехнического университета (аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.511901 от 09.09.2013 г.). Элементный состав проб определен методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) на масс-спектрометре NexION 300D согласно методике HСAM 480X (аналитик – Ю.Н. Буткевич).

Пробы для анализа предварительно не фильтровались. Из компонентов анионного состава в ре-

Таблица 1. Места отбора водных проб

Table 1. Water sampling sites

| Проба Sample | Место отбора Sampling location | Дополнительные сведения Additional data | Координаты/Coordinates | |
|------------------|--|---|------------------------|--------------|
| | | | с.ш./N | в.д./E |
| ЗАБ-1 ZAB-1 | с. Калга Kalga | гостиница, питьевая hotel, drinking water | 50°55'30,5" | 118°54'01,3" |
| ЗАБ-2 ZAB-2 | | р. Анчор, мост Aнchor river, bridge | 50°55'26,8" | 118°53'45,1" |
| ЗАБ-3 ZAB-3 | с. Уровские Ключи Urovskie Klyuchi | р. Уров, мост Urov river, bridge | 51°36'45,4" | 119°24'27,1" |
| ЗАБ-4 ZAB-4 | | родник spring | 51°41'37,6" | 119°27'57,5" |
| ЗАБ-5 ZAB-5 | | р. Уров, в черте села Urov river, within village boundaries | 51°41'33,0" | 119°27'54,0" |
| ЗАБ-6 ZAB-6 | | ул. Новая, вода привозная, централизованный источник водоснабжения Novaya street, imported water, centralized source of water supply | 51°41'34,4" | 119°27'48,0" |
| ЗАБ-7 ZAB-7 | с. Тайна Taina | ул. Центральная, вода привозная, централизованный источник водоснабжения Tsentrалnaya street, imported water, centralized source of water supply | 51°35'12,2" | 118°27'09,6" |
| ЗАБ-8 ZAB-8 | | ул. Центральная, д. 15, скважина глубиной 4 м 15, Tsentrалnaya street, well depth 4 m | 51°35'07,3" | 118°28'20,5" |
| ЗАБ-9 ZAB-9 | | р. Тайна, мост Taina river, bridge | 51°35'10,2" | 118°27'48,4" |
| ЗАБ-10 ZAB-10 | с. Газимурский Завод Gazimursky Zavod | р. Газимур, мост Gazimur river, bridge | 51°33'05,8" | 118°19'49,8" |
| ЗАБ-11 ZAB-11 | с. Ямкун Yamkun | курорт, озеро health resort, lake | 51°31'36,3" | 118°19'57,7" |
| ЗАБ-12 ZAB-12 | | курорт, ручей, вытекающий из озера health resort, effluent spring | 51°31'35,7" | 118°19'56,7" |

зультатах представлены только данные по сульфатному и хлоридному ионам, но из-за отсутствия этих компонентов в методике анализа полученные значения отнесены аналитиком к полуколичественным. Концентрации гидрокарбонат-иона для определения химического типа и минерализации воды вычислены по разности сумм эквивалентов найденных аналитически катионов и анионов. Разница между ними полностью отнесена на гидрокарбонат-ион. Другие анионы (F^- , NO_3^-) обычно содержатся в незначительных для определения типа и минерализации воды количествах, обычно не более 1 %-экв. Минерализация воды рассчитана по сумме весовых концентраций катионов и анионов. Наименование химического типа воды дано согласно отраслевому стандарту ОСТ 41–05–263–86 с более 20 %-эквивалентов по нарастанию концентраций ионов.

Всего было проанализировано содержание 71 компонента, в том числе редкоземельных элементов, платиноидов и многих других редких элементов, но в большинстве проб их содержание было ниже предела обнаружения. Данная информация показана дальше в обсуждении.

Результаты

Пересчет результатов анализов по компонентам ионного состава на эквивалентную форму показал, что по анионам суммы эквивалентов не до-

стигают и половины сумм по катионам. Поэтому в анионном составе гидрокарбонат-ион по всем пробам стал преобладающим. Расчетные концентрации HCO_3^- представлены в табл. 2. Для сравнения в таблицу включены данные по тому же роднику в с. Уровские Ключи (проба Ур-31) по результатам опробования от 05.07.1989 г. с аналитическими определениями всех макрокомпонентов. Как видно, наибольшие относительные расхождения концентраций по двум срокам отбора проб приходятся на сульфат- и хлор-ионы, но они могут быть обусловлены не только аналитическими погрешностями, но и режимными колебаниями состава воды. Эти расхождения из-за невысоких концентраций обоих компонентов существенно не влияют ни на величину общей минерализации, ни на определение химического типа воды. Рассчитанное аналогичным образом содержание HCO_3^- по пробе Ур-31 равно 305,6 мг/дм³, разница по сравнению с аналитически установленным значением практически в пределах ошибки измерения. Отсюда можно заключить, что вычисленные содержания гидрокарбонат-иона близки к реальным.

По анионному составу изученные воды гидрокарбонатные или сульфатно-гидрокарбонатные (табл. 3), по катионам – кальциевые или щелочноземельные с переменными соотношениями кальция и магния, за исключением пробы ЗАБ-7 с водой чисто натриевого состава.

Таблица 2. Химические характеристики вод в точках опробования

Table 2. Chemical characteristics of water at sampling sites

| Проба Sample | Компоненты ионного состава, мг/дм ³ / Components of the ion composition, mg/dm ³ | | | | | | | | M | Sr | Si |
|------------------|--|------------------|-----------------|----------------|------------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|-------|-------|-------|
| | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na ⁺ | K ⁺ | Fe ²⁺ | SO ₄ ²⁻ | Cl ⁻ | HCO ₃ ⁻ | | | |
| ЗАБ-1 ZAB-1 | 58,35 | 8,99 | 11,35 | 0,85 | 0,06 | 18,17 | 7,63 | 219,0 | 298,5 | 0,67 | 7,84 |
| ЗАБ-2 ZAB-2 | 43,88 | 6,65 | 7,22 | 1,65 | 0,24 | 12,77 | 4,43 | 164,7 | 224,1 | 0,34 | 7,21 |
| ЗАБ-3 ZAB-3 | 23,06 | 9,74 | 7,64 | 1,11 | 0,38 | 18,89 | 0,52 | 117,7 | 159,6 | 0,22 | 5,35 |
| ЗАБ-4 ZAB-4 | 53,1 | 30,14 | 3,3 | 2,73 | 0,05 | 11,18 | 1,52 | 311,1 | 413,3 | 0,11 | 4,86 |
| Ур-31 Ur-31 | 57,9 | 30,3 | 3,8 | 1,5 | 0,05 | 25,3 | 2,88 | 300,0 | 423,0 | 0,31 | 5,1 |
| ЗАБ-5 ZAB-5 | 23,92 | 11,04 | 6,6 | 1,29 | 0,26 | 17,93 | 0,77 | 125,7 | 187,7 | 0,2 | 5,09 |
| ЗАБ-6 ZAB-6 | 47,93 | 36,92 | 2,5 | 0,86 | 0,79 | 13,59 | 0,34 | 326,4 | 415,4 | 0,1 | 4,65 |
| ЗАБ-7 ZAB-7 | 3,78 | 0,40 | 153,1 | 0,31 | 1,83 | 124,3 | 0,44 | 265,4 | 549,5 | 0,037 | 3,58 |
| ЗАБ-8 ZAB-8 | 74,15 | 56,37 | 5,37 | 1,77 | 2,62 | 37,56 | 1,32 | 485,6 | 664,8 | 0,22 | 8,49 |
| ЗАБ-9 ZAB-9 | 45,72 | 25,26 | 7,31 | 1,63 | 0,28 | 54,67 | 1,29 | 218,4 | 354,6 | 0,38 | 5,28 |
| ЗАБ-10 ZAB-10 | 23,55 | 11,29 | 7,66 | 2,25 | 0,66 | 22,85 | 2,23 | 121,4 | 191,9 | 0,26 | 6,16 |
| ЗАБ-11 ZAB-11 | 202,1 | 175,3 | 12,97 | 4,74 | 1,37 | 66,19 | 1,52 | 1465 | 1929 | 0,98 | 11,61 |
| ЗАБ-12 ZAB-12 | 210,2 | 191,8 | 14,37 | 4,34 | 2,88 | 64,88 | 1,49 | 1582 | 2072 | 1,03 | 11,78 |

Примечание: М – минерализация.

Note: M – mineralization.

Таблица 3. Химический состав и отношения компонентов в водах
Table 3. Chemical composition and ratios of components in the waters

| Проба Sample | Формула химического состава Chemical composition formula | Ca/Sr | Ca/P |
|---------------------------------------|---|-------|-------|
| Поверхностные воды/Surface waters | | | |
| ЗАБ-2 ZAB-2 | HCO ₃ ⁻ 87,4 SO ₄ ²⁻ 8,7 Cl ⁻ 3,9 Ca ²⁺ 70,6 Mg ²⁺ 17,7 Na ⁺ 10 K ⁺ 1,3 | 129 | >627 |
| ЗАБ-3 ZAB-3 | HCO ₃ ⁻ 82,8 SO ₄ ²⁻ 16,8 Ca ²⁺ 49,3 Mg ²⁺ 38,4 Na ⁺ 14,2 K ⁺ 1,3 | 105 | >329 |
| ЗАБ-5 ZAB-5 | HCO ₃ ⁻ 84,1 SO ₄ ²⁻ 15,1 Ca ²⁺ 49 Mg ²⁺ 37,6 Na ⁺ 11,8 K ⁺ 1,2 | 120 | >342 |
| ЗАБ-9 ZAB-9 | HCO ₃ ⁻ 75,2 SO ₄ ²⁻ 23,9 Ca ²⁺ 48,1 Mg ²⁺ 44,1 Na ⁺ 6,7 | 120 | >653 |
| ЗАБ-10 ZAB-10 | HCO ₃ ⁻ 78,6 SO ₄ ²⁻ 19 Cl ⁻ 2,4 Mg ²⁺ 47,2 Ca ²⁺ 46,6 Na ⁺ 13 K ⁺ 2,4 | 91 | >336 |
| Подземные воды/Groundwater | | | |
| ЗАБ-1 ZAB-1 | HCO ₃ ⁻ 85,9 SO ₄ ²⁻ 9,1 Cl ⁻ 5 Ca ²⁺ 69,9 Mg ²⁺ 17,9 Na ⁺ 11,7 | 87 | >833 |
| ЗАБ-4 ZAB-4 | HCO ₃ ⁻ 95 SO ₄ ²⁻ 4,3 Ca ²⁺ 49,4 Mg ²⁺ 46,7 Na ⁺ 2,6 K ⁺ 1,3 | 483 | >759 |
| Ур-31 Ur-31 | HCO ₃ ⁻ 88,8 SO ₄ ²⁻ 9,6 Cl ⁻ 1,4 Ca ²⁺ 51,5 Mg ²⁺ 44,8 Na ⁺ 3 K ⁺ 0,7 | 187 | >5790 |
| ЗАБ-6 ZAB-6 | HCO ₃ ⁻ 94,9 SO ₄ ²⁻ 5 Mg ²⁺ 46,7 Ca ²⁺ 42,6 Na ⁺ 1,9 | 440 | >685 |
| ЗАБ-7 ZAB-7 | HCO ₃ ⁻ 63,6 SO ₄ ²⁻ 37,3 Na ⁺ 95,8 Ca ²⁺ 2,7 | 102 | >54 |
| ЗАБ-8 ZAB-8 | HCO ₃ ⁻ 90,7 SO ₄ ²⁻ 8,9 Mg ²⁺ 53,5 Ca ²⁺ 42,2 Na ⁺ 2,6 Fe ²⁺ 1 | 337 | >1059 |
| Курорт «Ямкун»/Health resort «Yamkun» | | | |
| ЗАБ-11 ZAB-11 | HCO ₃ ⁻ 94,4 SO ₄ ²⁻ 5,4 Mg ²⁺ 57,4 Ca ²⁺ 39,7 Na ⁺ 2,2 | 206 | >2887 |
| ЗАБ-12 ZAB-12 | HCO ₃ ⁻ 95 SO ₄ ²⁻ 4,9 Mg ²⁺ 58,5 Ca ²⁺ 38,5 Na ⁺ 2,3 | 204 | >3002 |

Согласно полученным данным, содержание Са в речных водах изменяется в пределах 23,1–45,7 мг/дм³, а минерализация – от 159,6 до 354,6 мг/дм³. Максимальные значения обоих показателей имеет вода в р. Тайна, что определяется влиянием на гидрохимические характеристики этой реки разработок россыпного и рудного золота в ее бассейне. В подземных водах опробованных источников водоснабжения, исключая привозную воду в с. Тайна, Са установлен в концентрациях 47,9–74,1 мг/дм³ при общей минерализации 295,8–694,8 мг/дм³. А.П. Виноградов по роднику в с. Уровские Ключи, по-видимому, тому же, что опробован нами, приводит содержание данного химического элемента в воде 5,2·10⁻³% [27], что соответствует 52 мг/дм³ и практически равно нашим данным (табл. 2).

Концентрации Sr, как одного из возможных отягчающих факторов уровской болезни по [27, 30], в опробованных пресных водах составили 0,037–0,67 мг/дм³, а содержания Р, избыток которого в кальций-фосфорном балансе является одной из причин заболевания по другой гипотезе [28, 31], во всех пробах оказались ниже предела обнаружения (0,07 мг/дм³). Из проанализированного списка 71 химического элемента в поверхностных водах 23 химических элемента (Be, P, Sc, V, Cu, Ga, Ge, Se, Br, Ag, Cd, Sn, Eu, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, W, Re, Tl) характеризуются содержаниями ниже

предела обнаружения, в подземных – 28 (Be, P, Sc, Ti, V, Ga, Se, Br, Y, Zr, Ag, Cd, Sn, La, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Re, Th). Аномальные концентрации имели только Мо (15 мкг/дм³) и U (0,019 мг/дм³) в водном источнике в с. Калга (табл. 4), что может быть вызвано наличием соответствующей рудной минерализации в зоне влияния водозабора или формирования фильтрационного потока к нему. Содержание других микроэлементов в исследованных водах не превышало фоновых значений, включая Mn, также отнесенный к этиологическим факторам болезни [28, 31]. Содержание Pb, на который, как и на Мо, рекомендовал обратить внимание А.П. Виноградов, только в одном случае (проба ЗАБ-7) достигло 1,2 мкг/дм³, что ниже допустимой нормы для питьевых вод (0,03 мг/дм³ по СанПиН 2.1.4.10749–01), хотя и самое высокое в выборке. Ве, элемент I класса токсичности, в пресных водах не обнаружен, но в углекислой воде его концентрация выше допустимой (0,0002 мг/дм³). Обращает на себя внимание повышенное содержание в водах Li, что и не удивительно для данного региона, обладающего ярко выраженной литиевой спецификой. Лантаноиды выявлены только в речных водах, исключая Се в пробе ЗАБ-7, при этом лишь в р. Газимур кроме La, Се и Nd установлены Pr, Sm и Gd в концентрациях, немногим более предела обнаружения (0,00005 мг/дм³). Наличие аналитически улавливаемых концентраций лантаноидов в речных водах связано, очевидно, с переходом их в водную фазу из взвешенных веществ и/или мелкодисперсных донных отложений.

Се в опробованных водах не обнаружен (менее 0,005 мг/дм³), что соответствует существующим оценкам территории как селенодефицитной [32, 33], и дальнейшее исследование этого компонента потребует использования методики его определения ниже 5 мкг/л. Данные по I, хотя и являются полуколичественными, подтверждают недостаток его в питьевых водах, по всем пробам его содержание не достигает оптимального уровня (>10 мкг/дм³ по [34]).

Гидрогеохимические характеристики тепловой (22–25 °С) минеральной воды курорта Ямкун мало отличаются от известных ранее. Состав воды гидрокарбонатный кальциево-магниевый, общая минерализация около 2 г/дм³. Содержания Fe и Si не достигают принятых бальнеологических норм для отнесения к лечебным по этим показателям (10 и 18 мг/дм³, соответственно), поэтому вода не соответствует ни дарасунскому, ни кукинскому бальнеологическим типам, выделенным в ГОСТ Р 54316–2011 по углекислым водам Забайкалья. Основным лечебным фактором ее служит углекислота и радон. Но для уровских больниц очевидно особое значение высокого содержания Са в воде. Обратим внимание на более высокие показатели минерализации и концентрации ряда элементов в стоке из озера, указывающие на поступление с глубины более богатых ими вод.

Обсуждение

Как отмечено выше, по гидрохимическим показателям выделяется используемая для водоснабжения привозная вода в с. Тайна. Наиболее высокое из всех проб содержание SO_4^{2-} в ней, предположительно, можно объяснить влиянием сульфидной минерализации на участке размещения водозаборного сооружения. На это указывает и повышенное содержание Zn, универсального индикатора сульфидного оруденения [35], а также Fe. Но природа сугубо натриевого состава пресной природной воды неясна. Для вод зоны гипергенеза такой химический состав исключительный. Объяснить его удалением обоих щелочноземельных элементов из воды в результате гидрогенного минералообразования невозможно, поскольку по карбонатам и сульфатам Ca и Mg вода не насыщена. Кроме Ca, на эту пробу пришлось и минимальные содержания Sr и Si, хотя в водах эндемичных местностей, напротив, отмечены повышенные концентрации Si [14, 15]. Еще одна особенность этой пробы – максимум по Li (табл. 4).

Наглядно геохимические особенности данной пробы выражены в спектрах, нормированных по концентрациям химических элементов в байкальской воде из [36]. На графике (рис. 2, ЗАБ-7) по шести элементам (Mg, K, Ca, Rb, Sr, Ba) фигуративные точки занимают нижние позиции, по пяти (Li, B, Na, Al, Ni) – верхние и еще по четырем (Ge, Se, W, Pb) представлены только одной этой пробой. Последнее, но по трем другим элементам (Ti, Cr, Cu), наблюдается и по пробе воды из с. Кал-

га, аномальной к тому же, как показано выше, по урану и молибдену (рис. 2, ЗАБ-1).

В целом изученные воды, как поверхностные, так и подземные, характеризуются повышенными коэффициентами концентраций относительно байкальской воды. Для большинства определенных методом ICP-MS химических элементов данный показатель больше 1, достигая максимума для Fe в поверхностных (>1000) и подземных (~1000) водах (рис. 2, 3). Также для поверхностных вод необходимо отметить концентрирование Al, Ti, Zr, PЗЭ, Hg более чем в 100 раз в пробе из с. Газимурский Завод (рис. 3, ЗАБ-10).

По содержанию Ca (3,8 мг/дм³) привозная вода из с. Тайна, единственная из питьевых, по А.П. Виноградову [27], относится к категории «больных». В «здоровых» родниковых и речных водах по приведенным им данным концентрации Ca находились в интервале 30–80 мг/дм³ (пересчитано с содержания в %), тогда как в «больных» были менее 20, вплоть до 3 мг/дм³. Ca/Sr отношение, рекомендованное в качестве дополнительного критерия неблагополучия территории по уровской болезни при его значении менее 100 [37], лишь немногим выше (табл. 3) только по причине очень низкого содержания Sr. В работе [27] показано, что это отношение мало отличается по категориям вод – от 63 до 243 в «здоровых», в пределах 62–247 в «больных» водах при содержаниях стронция 0,08–0,54 и 0,05–0,80 мг/дм³, соответственно. Более того, сам автор работы отметил параллельный рост концентраций Ca и Sr и в среднем большее со-

Таблица 4. Содержание некоторых микроэлементов (мг/дм³) в пробах природных вод

Table 4. Content of several trace elements (mg/dm³) in samples of natural waters

| Элемент Element | ЗАБ-1 ZAB-1 | ЗАБ-2 ZAB-2 | ЗАБ-3 ZAB-3 | ЗАБ-4 ZAB-4 | ЗАБ-5 ZAB-5 | ЗАБ-6 ZAB-6 | ЗАБ-7 ZAB-7 | ЗАБ-8 ZAB-8 | ЗАБ-9 ZAB-9 | ЗАБ-10 ZAB-10 | ЗАБ-11 ZAB-11 | ЗАБ-12 ZAB-12 |
|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|------------------|------------------|
| Li | 0,015 | 0,012 | 0,0085 | 0,0068 | 0,0076 | 0,0048 | 0,095 | 0,017 | 0,0067 | 0,0073 | 0,1 | 0,12 |
| Be | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | 0,00048 | 0,00053 |
| B | 0,018 | 0,0046 | 0,0054 | 0,0056 | 0,0031 | 0,0042 | 0,049 | 0,013 | 0,018 | 0,0047 | 0,045 | 0,04 |
| Al | 0,002 | 0,019 | 0,022 | 0,0032 | 0,016 | 0,0071 | 0,043 | 0,0023 | 0,082 | 0,33 | 0,044 | 0,0087 |
| Cr | <0,002 | 0,0024 | <0,002 | <0,002 | <0,002 | <0,002 | <0,002 | 0,0039 | 0,0032 | 0,0026 | 0,0041 | 0,0076 |
| Mn | 0,012 | 0,023 | 0,052 | 0,00084 | 0,025 | 0,027 | 0,016 | 0,029 | 0,044 | 0,012 | 0,89 | 1,0 |
| Co | <0,0001 | 0,00015 | 0,00014 | <0,0001 | 0,0001 | 0,00051 | 0,00039 | 0,00019 | 0,00032 | 0,00022 | 0,0021 | 0,0046 |
| Ni | <0,002 | 0,0021 | <0,002 | <0,002 | <0,002 | <0,002 | 0,0042 | 0,0022 | 0,0028 | <0,002 | 0,0038 | 0,0046 |
| Cu | <0,002 | <0,002 | <0,002 | <0,002 | <0,002 | <0,002 | <0,002 | 0,0022 | <0,002 | <0,002 | 0,0057 | 0,0046 |
| Zn | 0,0069 | <0,002 | <0,002 | <0,002 | <0,002 | 0,0097 | 0,022 | 0,045 | 0,003 | 0,0041 | 0,02 | 0,0046 |
| As | 0,0053 | <0,002 | <0,002 | 0,0038 | <0,002 | <0,002 | <0,002 | <0,002 | 0,0082 | <0,002 | 0,026 | 0,058 |
| Rb | 0,00063 | 0,0011 | 0,0013 | 0,0024 | 0,0014 | 0,00098 | 0,00017 | 0,0026 | 0,0013 | 0,0016 | 0,011 | 0,01 |
| Mo | 0,015 | 0,004 | 0,00081 | 0,00062 | 0,00067 | 0,00047 | 0,00066 | 0,00035 | 0,0026 | 0,00095 | <0,0002 | 0,00043 |
| Cs | 0,0037 | <0,00005 | <0,00005 | 0,00007 | <0,00005 | <0,00005 | 0,00026 | <0,00005 | 0,000074 | 0,00026 | 0,0017 | 0,0017 |
| I | 0,0060 | 0,0016 | 0,0011 | 0,0025 | 0,0011 | 0,0021 | 0,0045 | 0,0033 | 0,0019 | 0,0014 | 0,0044 | 0,0056 |
| Ba | 0,021 | 0,021 | 0,014 | 0,02 | 0,015 | 0,012 | 0,011 | 0,069 | 0,027 | 0,02 | 0,17 | 0,18 |
| La | <0,00005 | 0,00015 | 0,00011 | <0,00005 | 0,000081 | <0,00005 | <0,00005 | <0,00005 | 0,00013 | 0,00054 | 0,00008 | <0,00005 |
| Ce | <0,00005 | 0,00029 | 0,00016 | <0,00005 | 0,000097 | <0,00005 | 0,000058 | <0,00005 | 0,00024 | 0,00097 | 0,00017 | 0,000072 |
| Nd | <0,00005 | 0,000097 | 0,00012 | <0,00005 | 0,00009 | <0,00005 | <0,00005 | <0,00005 | 0,00012 | 0,00042 | 0,000055 | <0,00005 |
| U | 0,019 | 0,0086 | 0,0015 | 0,0021 | 0,0012 | 0,0017 | <0,00005 | 0,0014 | 0,0012 | 0,0017 | 0,0059 | 0,0056 |

Примечание: «<» – ниже предела обнаружения.

Note: «<» – below detection limit.

держание Sr в «здоровых» водах, обратив при этом внимание на относительно высокое его значение в ряде неблагоприятных в отношении эндемии рек (Сивачи, Уров, Газимур).

Необходимо отметить, что подземные воды по средней величине Ca/Sr отношения характеризуются как благоприятные, за исключением пробы из с. Тайна. В то время как в поверхностных водах их соотношение составляет от 91 до 129 и находится в зоне риска использования поверхностных вод

в качестве питьевых (табл. 3). Если предположить, что на момент установленного факта развития болезни поверхностная вода использовалась населением как источник питьевого водоснабжения, то обоснованно проявляется связь её существования с малыми значениями соотношения кальция и стронция.

Иные данные по Ca и Sr опубликованы в недавней работе по этой же территории [38]. Согласно авторам, содержание Ca в водах эндемических ра-

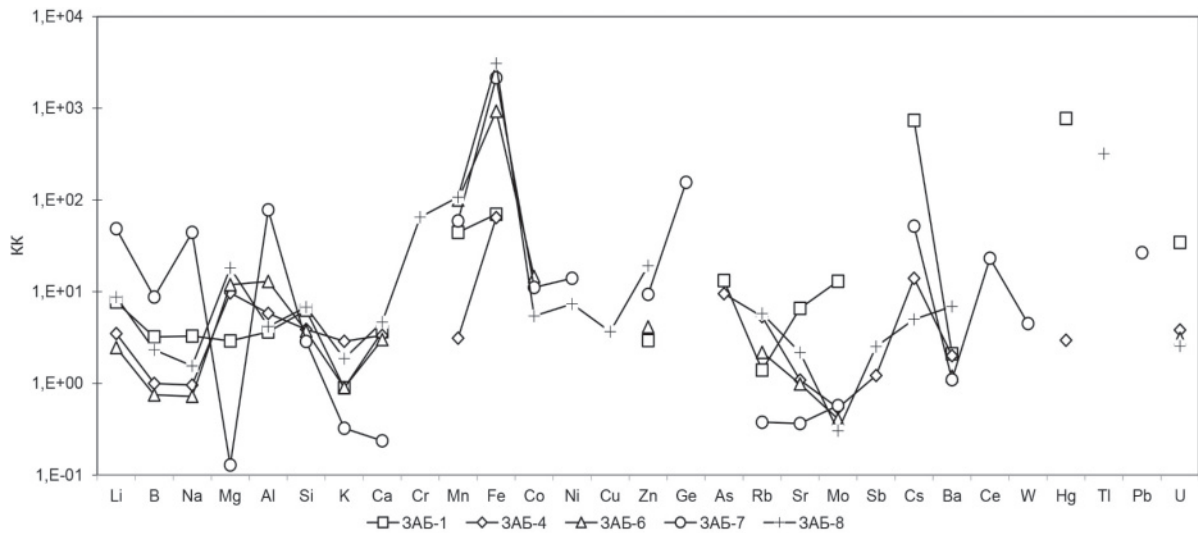


Рис. 2. Нормированные на средний состав байкальской воды спектры содержания химических элементов в подземных водах: КК – коэффициент концентрации относительно среднего состава байкальской воды [36]

Fig. 2. Spectra of chemical elements in groundwater normalized by the average composition of Lake Baikal water: КК – concentration coefficient relative to the average composition of Lake Baikal water [36]

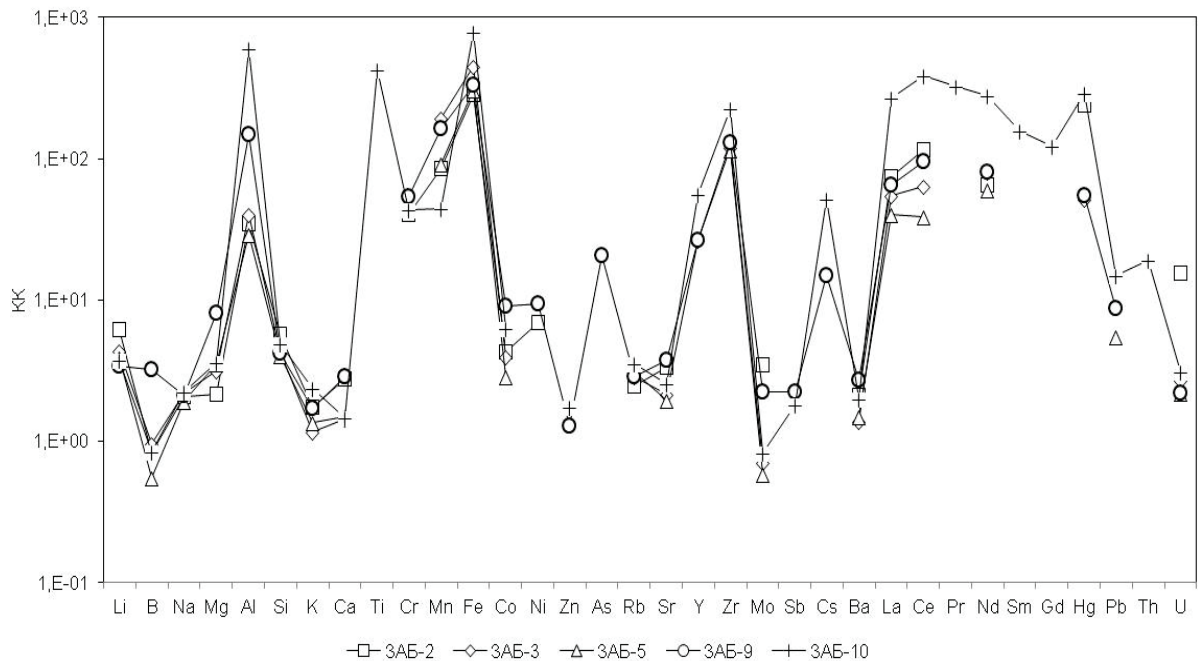


Рис. 3. Нормированные на средний состав байкальской воды спектры содержания химических элементов в поверхностных водах: 2) КК – коэффициент концентрации относительно среднего состава байкальской воды [36]

Fig. 3. Spectra of chemical elements in surface waters normalized by the average composition of Lake Baikal water: КК – concentration coefficient relative to the average composition of Lake Baikal water [36]

йонов даже выше, чем в благополучных («контрольных») по заболеванию в населенных пунктах (средние концентрации 35,9 и 32,9 мг/дм³ при максимальных 156,8 и 108,2 мг/дм³, соответственно). Но первые отличаются заметно более высокими концентрациями Sr, достигающими 2983 мкг/дм³ при максимуме в незатронутых болезнью местах 532 мкг/дм³, при этом средние соотношения Ca/Sr равны 285 и 543 при наиболее часто встречаемых интервалах 50–300 и 100–400, соответственно. В почвах эндемических местностей это соотношение варьирует от 2 до 98, а в районах без проявления уровской болезни – в пределах 11–256. Повышенное содержание Sr в почвах и растениях рассматривается авторами как фактор экологического риска.

Что касается высокого содержания Sr в почве в с. Солонцы, вызванного, как полагают авторы [38], влиянием флюоритового месторождения Солонечное, то для такого объяснения нет оснований. Месторождение удалено от села на 10 км и находится на левом борту долины ручья, тогда как село – на правом, к тому же правый борт долины пересекают боковые распадки с эрозионным врезом, через который вторичные геохимические ореолы месторождения распространяться не могли, не говоря уже об удаленности указанного источника Sr. В дополнение к этому, содержание Sr в штольневых водах Солонечного и расположенного несколько выше по ручью в том же рудном поле Брикачанского месторождения флюорита по данным нашего опробования в 2012 г. было 0,18 и 0,04 мг/дм³, что определенно свидетельствует об отсутствии повышенных концентраций Sr во флюоритовых рудах.

Полученные нами гидрогеохимические данные по питьевым водам с. Тайна, в котором уровской болезнью было поражено 30,4 % жителей [28], показывают, что крайне низкое содержание Ca в питьевой воде может служить достаточным индикатором неблагоприятия территории по этому заболеванию с позиции биогеохимической гипотезы А.П. Виноградова без отягчающего влияния как Sr, так и P, несмотря на то, что вода не служит основным источником поступления Ca в организм человека. Однако нельзя игнорировать наличие аномалий P в водах многих эндемичных местностей. Они связаны не только с пойменными лугово-болотными ландшафтами, как это трактуется в работе [38]. По нашим данным [14, 15], аномалии P отмечены и вне пойм в родниковых водах из коренных пород, к примеру, в местах бывших сел Годымбой, Патрино и других местностях. При биологическом значении P в образовании костной ткани его аномалии в почвах, водах и растениях не могут не учитываться. Недаром самим автором биогеохимической гипотезы приведены данные по содержанию CaO и P₂O₅ в сене различных территорий: в областях с остеопорозом животных в разных странах они в среднем соответственно равны (в %) 0,52

и 0,22, по району уровской эндемии – 0,56 и 0,48, в «хорошем» сене из разных стран – 1,2 и 0,52. Отношения CaO/P₂O₅ по этим данным соответственно составляют 2,36, 1,17 и 2,31, а пересчитанные на Ca/P – 3,85, 1,9 и 3,79. К этому надо добавить, что в статье В.С. Малининой [39] в том же сборнике, что и статья [27], как раз подчеркнута нарушение Ca-P баланса в питании уровских больных в результате избытка P.

Заключение

Таким образом, нами получены новые данные по содержанию 71 химического элемента, многие из которых ранее не изучались в этом эндемичном районе, в поверхностных и подземных водах, используемых местным населением для питьевого водоснабжения. По содержанию большинства изученных микроэлементов воды, за исключением источника Ямкун, являются слабоминерализованными и характеризуются как условно чистые.

Аномальные концентрации имеют только Mo (15 мкг/дм³) и U (0,019 мг/дм³) в водном источнике в с. Калга, что может быть вызвано наличием соответствующей рудной минерализации в зоне влияния водозабора или формированием фильтрационного потока к нему. Это требует дополнительного изучения, тем более что он прилегает к известному урановорудному району Забайкалья.

Полученные гидрогеохимические данные по питьевым водам с. Тайна, в котором уровской болезнью было поражено 30,4 % жителей, показывают, что крайне низкое содержание Ca в питьевой воде может служить достаточным индикатором неблагоприятия территории по этому заболеванию с позиции биогеохимической гипотезы А.П. Виноградова без отягчающего влияния как Sr, так P и Mn.

По содержанию Ca (3,8 мг/дм³) только привозная вода из с. Тайна относится к категории «больных», согласно А.П. Виноградову. В «здоровых» родниковых и речных водах по приведенным им данным концентрации Ca находились в интервале 30–80 мг/дм³, тогда как в «больных» были менее 20 мг/дм³. Ca/Sr отношение, рекомендованное в качестве дополнительного критерия неблагоприятия территории по уровской болезни при его значении менее 100, в нашем исследовании обусловлено, прежде всего, низким содержанием Sr в воде.

Se в опробованных водах не обнаружен (менее 0,005 мг/дм³), что соответствует существующим оценкам территории как селенодефицитной и дальнейшее исследование этого компонента потребует использования методики его определения ниже 5 мкг/л.

Данные по содержанию I подтверждают его недостаток в питьевых водах, что может вызывать развитие тиреоидной патологии, на фоне которой может проявиться болезнь Кашина-Бека.

Научные исследования выполнены в рамках программы повышения конкурентоспособности ТПУ среди ведущих мировых исследовательских центров

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Stone R. A medical mystery in middle China // *Science*. – 2009. – V. 324. – P. 1378–1381.
2. Дамперов Н.И. Карта распространения уровской болезни // *Уровская болезнь в Забайкалье*. – Иркутск, 1934. – С. 15–23.
3. Allander E. Kashin-Beck disease. An analysis of research and public health activities based on a bibliography 1849–1992 // *Scandinavian Journal of Rheumatology*. – 1994. – V. 23. – P. 1–36.
4. Big bone disease: a multidisciplinary approach of Kashin-Beck disease in Tibet Autonomous Region (P.R. China) / Eds. F. Malaisse, F. Mathieu. – Gembloux: Les Presses Agronomiques de Gembloux, 2008. – 148 p.
5. Epidemiological support for a multifactorial aetiology of Kashin-Beck disease in Tibet / C. Suetens, R. Moreno-Reyes, C. Chasseur, F. Mathieu, F. Begaux, E. Haubruge, M.C. Durand, J. Neve, J. Vanderpas // *International Orthopaedics*. – 2001. – V. 25. – P. 180–187.
6. Geological characteristics and etiology research on Kashin-Beck Disease in China / Y. An, X. Jia, F. Li, J. He, S. Han, H. Zhang // *Geology in China*. – 2010. – V. 37. – P. 563–570.
7. Yao Y., Pei F., Kang P. Selenium, iodine, and the relation with Kashin-Beck Disease // *Nutrition*. – 2011. – V. 27. – P. 1095–1100.
8. Recent advances in the research of an endemic osteochondropathy in China: Kashin-Beck disease / X. Guo, W. Ma, F. Zhang, F.-L. Ren, C.-J. Qu, M.J. Lammi // *Osteoarthritis and Cartilage*. – 2014. – V. 22. – P. 1774–1783.
9. Environmental water chemistry and possible correlation with Kashin-Beck Disease (KBD) in northwestern Sichuan, China / Z. Shi, P. Pan, Y. Feng, Z. Kan, Z. Li, F. Wei // *Environment International*. – 2017. – V. 99. – P. 282–292.
10. Zinc: the Other Suspected Environmental Factor in Kashin-Beck Disease in Addition to Selenium / X. Wang, Y. Ning, L. Yang, F. Yu, X. Guo // *Biological Trace Element Research*. – 2017. – V. 179. – P. 178–184.
11. Nutrients Other than Selenium Are Important for Promoting Children's Health in Kashin-Beck Disease Areas / Y. Ning, X. Wang, X. Guo, P. Zhang, P. Qu, F. Zhang, S. Wang, Y. Lei, M. Lammi // *Biological Trace Element Research*. – 2018. – V. 183. – P. 233–244.
12. Selenium Content and/or T-2 Toxin Contamination of Cereals, Soil, and Children's Hair in Some Areas of Heilongjiang and Gansu Provinces, China / L. Sun, S. Cui, Q. Deng, H. Liu, Y. Cao, S. Wang, J. Yu // *Biological Trace Element Research*. – 2019. DOI: 10.1007/s12011-018-1620-7
13. Замана Л.В., Гладкая Н.М. Новые данные по геохимии природных вод района уровской эндемии в Сибири // *Доклады Академии наук*. – 1991. – Т. 321. – № 3. – С. 593–595.
14. Zamana L.V., Gladkaya N.M. Geochemical features of the natural waters in the Urov biogeochemical region // *Geochemistry International*. – 1993. – V. 30. – № 9. – P. 105–116.
15. Zamana L.V. Possible hydrogeochemical preconditions for Kashin-Beck disease in Transbaikalia // *Chinese Geographical Science*. – 1995. – V. 5. – P. 185–192.
16. Zamana L.V. Hydrogeochemistry in Kashin-Beck Disease (KBD) areas of Transbaikalia, Russia // *Geology in China*. – 2010. – V. 37. – P. 582–586.
17. Wang Z. A historic overview of research and control on Kashin-Beck Disease in China // *Chinese Journal of Endemiology*. – 1999. – V. 18. – P. 161–163.
18. Levander O.A. Selenium // *Trace Elements in Human and Animal Nutrition* / Ed. by W. Mertz. – London: Academic Press, 1986. – P. 139–197.
19. Environmental selenium in the Kashin-Beck disease area, Tibetan Plateau, China / B. Zhang, L. Yang, W. Wang, Y. Li, H. Li // *Environmental Geochemistry and Health*. – 2011. – V. 33. – P. 495–501.
20. Selenium: A protective factor for Kashin-Beck disease in Qing-Tibet plateau / Z.-J. Zhao, Q. Li, P.-Z. Yang, H. Wang, L.-C. Kong, L.-H. Wang, L.-Y. Sun // *Biological Trace Element Research*. – 2013. – V. 153. – P. 1–4.
21. Constraint on selenium bioavailability caused by its geochemical behavior in typical Kashin-Beck disease areas in Aba, Sichuan Province of China / Y. Lv, T. Yua, Z. Yang, W. Zhao, M. Zhang, Q. Wang // *Science of the Total Environment*. – 2014. – V. 493. – P. 737–749.
22. Guo X., Ning Y., Wang X. Selenium and Kashin-Beck disease // *Selenium: Chemistry, Analysis, Function and Effects (Food and Nutritional Components in Focus)* / Ed. by V.R. Preedy. – Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2015. – P. 552–571.
23. Trace Element Levels in Scalp Hair of School Children in Shigatse, Tibet, an Endemic Area for Kashin-Beck Disease (KBD) / Y. Guo, H. Li, L. Yang, Y. Li, B. Wei, W. Wang, H. Gong, M. Guo, C. Nima, S. Zhao, J. Wang // *Biological Trace Element Research*. – 2017. – V. 180. – P. 15–22.
24. Distribution and translocation of selenium from soil to highland barley in the Tibetan Plateau Kashin-Beck disease area / J. Wang, H. Li, L. Yang, Y. Li, B. Wei, J. Yu, F. Feng // *Environmental Geochemistry and Health*. – 2017. – V. 39. – P. 221–229.
25. Du B., Zhou J., Zhou J. Selenium status of children in Kashin-Beck disease endemic areas in Shaanxi, China: assessment with mercury // *Environmental Geochemistry and Health*. – 2018. – V. 40. – P. 903–913.
26. Associations Between Selenium Content in Hair and Kashin-Beck Disease/Keshan Disease in Children in Northwestern China: a Prospective Cohort Study / H. Liu, F. Yu, W. Shao, D. Ding, Z. Yu, F. Chen, D. Geng, X. Tan, M.J. Lammi, X. Guo // *Biological Trace Element Research*. – 2018. – V. 184. – P. 16–23.
27. Виноградов А.П. О причинах происхождения уровской эндемии (геохимические исследования) // *Труды Биогеохимической лаборатории*. – М.: Изд-во АН СССР, 1949. – Т. 9. – С. 5–29.
28. К этиологии уровской (Кашина-Бека) болезни / А.В. Вощенко, В.Н. Чугаев, С.И. Вайстух, В.С. Бутко // *Педиатрия: вопросы диагностики и лечения: тезисы докладов научно-практической конференции*. – Чита, 1988. – С. 20–23.
29. Геохимические особенности среды и эндемические заболевания Забайкальского края / М.А. Солoduхина, Л.А. Михайлова, С.Э. Лапа, Н.М. Бурлака // *Забайкальский медицинский вестник*. – 2015. – № 4. – С. 169–174.
30. Ковальский В.В. Новые направления и задачи биологической химии сельскохозяйственных животных в связи с изучением биогеохимических провинций // *Материалы Юбилейной сессии, посвященной 40-й годовщине Великой Октябрьской социалистической революции (ВАСХНИЛ)*. – М.: Изд-во Минсельхоза СССР, 1958. – С. 579–619.
31. Алексенцева Н.Н. Эколого-геохимические особенности территории Юго-Восточного Забайкалья, эндемичной по болезни Кашина-Бека: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. – Минск, 1987. – 20 с.
32. Геохимическая обстановка в очагах Кешанской болезни / А.В. Вощенко, В.Н. Чугаев, Л.И. Говорина, В.В. Красницкая // *Экологические интоксикации: биохимия, фармакология, клиника: тезисы докладов Всероссийской научной конференции*. – Чита, 1996. – С. 2–21.
33. Аникина Л.В., Никитина Л.П. Селен. Экология, патология, коррекция. – Чита: ИИЦ ЧГМА, 2002. – 400 с.
34. Кашин В.К. Биогеохимия йода в ландшафтах Забайкалья // *Геохимия*. – 1996. – № 5. – С. 463–471.
35. Основы гидрогеохимических поисков рудных месторождений / Б.А. Колотов, С.Р. Крайнов, В.З. Рубейкин и др. – М.: Недра, 1983. – 199 с.
36. Ветров В.А., Кузнецова А.И., Склярова О.А. Базовые уровни химических элементов в воде озера Байкал // *География и природные ресурсы*. – 2013. – № 3. – С. 41–51.

37. Крайнов С.Р., Швец В.М. Геохимия подземных вод хозяйственно-питьевого назначения. – М.: Недра, 1987. – 237 с.
38. Биогеохимия кальция и стронция в ландшафтах Восточного Забайкалья / В.В. Ермаков, У.А. Гуляева, С.Ф. Тютиков, Т.Г. Кузьмина, В.А. Сафонов // Геохимия. – 2017. – № 12. – С. 1115–1127.
39. Малинина В.С. Некоторые данные о составе пищевых продуктов в районе распространения уровской эндемии // Труды Биогеохимической лаборатории. – М.: Изд-во АН СССР, 1949. – Т. 9. – С. 55–64.

Поступила 26.04.2018 г.

Информация об авторах

Замана Л.В., кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геоэкологии и гидрогеохимии Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН.

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

Соктоев Б.Р., кандидат геолого-минералогических наук, старший преподаватель отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Барановская Н.В., доктор биологических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Эпова Е.С., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории геохимии и рудогенеза Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН.

Солодухина М.А., кандидат географических наук, научный сотрудник лаборатории геохимии и рудогенеза Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН.

Михайлова Л.А., кандидат медицинских наук, заведующая кафедрой гигиены Читинской государственной медицинской академии.

Копылова Ю.Г., кандидат геолого-минералогических наук, начальник научно-образовательного центра «Вода» Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Хвощевская А.А., кандидат геолого-минералогических наук, заведующая проблемной научно-исследовательской лабораторией гидрогеохимии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 556.114:616.71(571.55)

NEW DATA ON CHEMICAL COMPOSITION OF NATURAL WATERS IN THE AREA OF DISTRIBUTION OF UROV (KASCHIN–BECK) DISEASE (TRANSBAIKAL REGION)

Leonid V. Zamana¹,
l.v.zamana@mail.ru

Leonid P. Rikhvanov²,
rikhvanov@tpu.ru

Bulat R. Soktoev²,
bulatsoktoev@tpu.ru

Natalia V. Baranovskaya²,
nata@tpu.ru

Ekaterina S. Epova¹,
apikur1@ya.ru

Mariya A. Solodukhina¹,
mabn@ya.ru

Larisa A. Mikhailova³,
mikhailova-la@mail.ru

Yulia G. Kopylova²,
kyg@tpu.ru

Albina A. Khvashchevskaya²,
hvashevskaya@tpu.ru

¹ Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 16a, Nedozov street, Chita, 672002, Russia.

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

³ Chita State Medical Academy, 39a, Gorky street, Chita, 672000, Russia.

The relevance of the research. *The Kaschin–Beck disease, or Urov disease, has been known for over 160 years, but the real reason, that causes the disease development, has not been still identified. For the moment there are more than 20 theories and hypotheses explaining the reasons for its occurrence, the leading one is the biogeochemical, first proposed by A.P. Vinogradov. According to this theory, the Kaschin–Beck disease is related to the influence of the environment in the form of lack or excess of a chemical element or compounds. In this regard, it is relevant to study the chemical composition of natural components in the manifestation area of this disease.*

The main aim of the research is to evaluate the chemical composition of natural waters used for drinking water supply in the manifestation area of the Kaschin–Beck disease in Transbaikal region.

Objects: underground and surface waters.

Methods. Hydrogeochemical, chemical composition of water samples was detected with the use of inductively coupled plasma mass spectrometry.

Results. *The content of 71 chemical elements, including those not previously considered for this area, was studied in natural waters. We have established that waters used for drinking water supply are characterized by low content of calcium, which may be an indicator of trouble in areas with this disease without aggravating effects of either strontium or phosphorus and manganese. The levels of selenium and iodine in the studied waters are below the optimum value for drinking usage. This fact agrees well with the literature data for China, where the natural components (water, soil, vegetation) in the areas of the Kaschin–Beck disease distribution are depleted in iodine. In this case, the lack of iodine can cause the development of endemic goitre, against which the Urov disease manifests itself brighter.*

Key words:

Urov disease, Kaschin–Beck disease, hydrogeochemistry, chemical composition, underground and surface waters, calcium, selenium, iodine.

The research was carried out within the Program of enhancement of TPU competitiveness among the leading worlds research centers.

REFERENCES

- Stone R. A medical mystery in middle China. *Science*, 2009, vol. 324, pp. 1378–1381.
- Damperov N.I. Karta rasprostraneniya urovskoy bolezni [Map of Urov disease distribution]. *Urovskaya bolezni v Zabaykale* [Urov disease in Transbaikalia]. Irkutsk, 1934. pp. 15–23.
- Allander E. Kashin-Beck disease. An analysis of research and public health activities based on a bibliography 1849–1992. *Scandinavian Journal of Rheumatology*, 1994, vol. 23, pp. 1–36.
- Big bone disease: a multidisciplinary approach of Kashin-Beck disease in Tibet Autonomous Region (P.R. China)*. Eds. F. Malaisse, F. Mathieu. Gembloux, Les Presses Agronomiques de Gembloux, 2008. 148 p.
- Suetens C., Moreno-Reyes R., Chasseur C., Mathieu F., Begaux F., Haubruge E., Durand M.C., Neve J., Vanderpas J. Epidemiological support for a multifactorial aetiology of Kashin-Beck disease in Tibet. *International Orthopaedics*, 2001, vol. 25, pp. 180–187.
- An Y., Jia X., Li F., He J., Han S., Zhang H. Geological characteristics and etiology research on Kashin-Beck Disease in China. *Geology in China*, 2010, vol. 37, pp. 563–570.
- Yao Y., Pei F., Kang P. Selenium, iodine, and the relation with Kashin-Beck Disease. *Nutrition*, 2011, vol. 27, pp. 1095–1100.
- Guo X., Ma W., Zhang F., Ren F.-L., Qu C.-J., Lammi M.J. Recent advances in the research of an endemic osteochondropathy in China: Kashin-Beck disease. *Osteoarthritis and Cartilage*, 2014, vol. 22, pp. 1774–1783.
- Shi Z., Pan P., Feng Y., Kan Z., Li Z., Wei F. Environmental water chemistry and possible correlation with Kashin-Beck Disease (KBD) in northwestern Sichuan, China. *Environment International*, 2017, vol. 99, pp. 282–292.
- Wang X., Ning Y., Yang L., Yu F., Guo X. Zinc: the Other Suspected Environmental Factor in Kashin-Beck Disease in Addition to Selenium. *Biological Trace Element Research*, 2017, vol. 179, pp. 178–184.
- Ning Y., Wang X., Guo X., Zhang P., Qu P., Zhang F., Wang S., Lei Y., Lammi M. Nutrients Other than Selenium Are Important for Promoting Children's Health in Kashin-Beck Disease Areas. *Biological Trace Element Research*, 2018, vol. 183, pp. 233–244.
- Sun L., Cui S., Deng Q., Liu H., Cao Y., Wang S., Yu J. Selenium Content and/or T-2 Toxin Contamination of Cereals, Soil, and Children's Hair in Some Areas of Heilongjiang and Gansu Provinces, China. *Biological Trace Element Research*, 2019. DOI: 10.1007/s12011-018-1620-7
- Zamana L.V., Gladkaya N.M. New data on the chemistry of natural waters in the region of endemic bone disease (Kashin-Beck disease) in Siberia. *Doklady Akademii nauk*, 1991, vol. 321 (3), pp. 593–595. In Rus.
- Zamana L.V., Gladkaya N.M. Geochemical features of the natural waters in the Urov biogeochemical region. *Geochemistry International*, 1993, vol. 30 (9), pp. 105–116.
- Zamana L.V. Possible hydrogeochemical preconditions for Kashin-Beck disease in Transbaikalia. *Chinese Geographical Science*, 1995, vol. 5, pp. 185–192.
- Zamana L.V. Hydrogeochemistry in Kashin-Beck Disease (KBD) areas of Transbaikalia, Russia. *Geology in China*, 2010, vol. 37, pp. 582–586.
- Wang Z. A historic overview of research and control on Kashin-Beck Disease in China. *Chinese Journal of Endemiology*, 1999, vol. 18, pp. 161–163.
- Levander O.A. Selenium. In *Trace Elements in Human and Animal Nutrition*. Ed. by W. Mertz. London, Academic Press, 1986. pp. 139–197.
- Zhang B., Yang L., Wang W., Li Y., Li H. Environmental selenium in the Kashin-Beck disease area, Tibetan Plateau, China. *Environmental Geochemistry and Health*, 2011, vol. 33, pp. 495–501.
- Zhao Z.-J., Li Q., Yang P.-Z., Wang H., Kong L.-C., Wang L.-H., Sun L.-Y. Selenium: A protective factor for Kashin-Beck disease in Qing-Tibet plateau. *Biological Trace Element Research*, 2013, vol. 153, pp. 1–4.
- Lv Y., Yua T., Yang Z., Zhao W., Zhang M., Wang Q. Constraint on selenium bioavailability caused by its geochemical behavior in typical Kashin-Beck disease areas in Aba, Sichuan Province of China. *Science of the Total Environment*, 2014, vol. 493, pp. 737–749.
- Guo X., Ning Y., Wang X. Selenium and Kashin-Beck disease. In *Selenium: Chemistry, Analysis, Function and Effects (Food and Nutritional Components in Focus)*. Ed. by V.R. Preedy. Cambridge, Royal Society of Chemistry, 2015. pp. 552–571.
- Guo Y., Li H., Yang L., Li Y., Wei B., Wang W., Gong H., Guo M., Nima C., Zhao S., Wang J. Trace Element Levels in Scalp Hair of School Children in Shigatse, Tibet, an Endemic Area for Kashin-Beck Disease (KBD). *Biological Trace Element Research*, 2017, vol. 180, pp. 15–22.
- Wang J., Li H., Yang L., Li Y., Wei B., Yu J., Feng F. Distribution and translocation of selenium from soil to highland barley in the Tibetan Plateau Kashin-Beck disease area. *Environmental Geochemistry and Health*, 2017, vol. 39, pp. 221–229.
- Du B., Zhou J., Zhou J. Selenium status of children in Kashin-Beck disease endemic areas in Shaanxi, China: assessment with mercury. *Environmental Geochemistry and Health*, 2018, vol. 40, pp. 903–913.
- Liu H., Yu F., Shao W., Ding D., Yu Z., Chen F., Geng D., Tan X., Lammi M.J., Guo X. Associations Between Selenium Content in Hair and Kashin-Beck Disease/Keshan Disease in Children in Northwestern China: a Prospective Cohort Study. *Biological Trace Element Research*, 2018, vol. 184, pp. 16–23.
- Vinogradov A.P. O prichinakh proiskhozhdeniya urovskoy endemii (geokhimicheskie issledovaniya) [About the reasons of origin of Urov endemic disease (geochemical research)]. *Trudy Biogeochemicheskoy laboratorii* [Proceedings of the biogeochemical laboratory]. Moscow, AN SSSR Publ., 1949. Vol. 9, pp. 5–29.
- Voschenko A.V., Chugaev V.N., Vaystukh S.I., Butko V.S. K etiologii urovskoy (Kashina-Beka) bolezni [To etiology of Urov (Kashin-Beck) disease]. *Pediatrics: voprosy diagnostiki i lecheniya: tezisy dokladov nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Pediatrics: diagnostic and treatment issues: proc. of scientific conference]. Chita, 1988. pp. 20–23.
- Solodukhina M.A., Mikhailova L.A., Lapa S.E., Burlaka N.M. Geochemical features of the environment and endemic disease Trans-baikal territory. *Transbaikalian Medical Bulletin*, 2015, no. 4, pp. 169–174. In Rus.
- Kovalskiy V.V. Novye napravleniya i zadachi biologicheskoy khimii sel'skokhozyaystvennykh zhivotnykh v svyazi s izucheniem biogeochemicheskikh provintsiy [New directions and issues of biological chemistry of farm animals in connection with the study of biogeochemical provinces]. *Materialy Yubileinoy sessii, posvyashchennoy 40-y godovshchine Velikoy Otkryabrskoy sotsialisticheskoy revolyutsii (VASKHNIL)* [Proc. of the Jubilee session devoted to the 40th anniversary of the great October socialist revolution (VASKHNIL)]. Moscow, Ministry of agriculture of the USSR Publ. house, 1958. pp. 579–619.
- Aleksentseva N.N. *Ekologo-geokhimicheskie osobennosti territorii Yugo-Vostochnogo Zabaykalya, endemichnoy po bolezni Kashina-Beka*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Ecological and geochemical peculiarities of the South-Eastern Transbaikalia territory endemic for Kashin-Beck disease. Cand. Diss. Abstract]. Minsk, 1987. 20 p.
- Voschenko A.V., Chugaev V.N., Govorina L.I., Krasnitskaya V.V. Geokhimicheskaya obstanovka v ochagakh Keshanskoy bolezni [Geochemical conditions in the focuses of Keshan disease]. *Ekologicheskie intoksikatsii: biokhimiya, farmakologiya, klinika: tezisy dokladov Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii* [En-

- vironmental intoxication: biochemistry, pharmacology, clinic: abstracts of the all-Russian scientific conference]. Chita, 1996. pp. 20–21.
33. Anikina L.V., Nikitina L.P. *Selen. Ekologiya, patologiya, korrektsiya* [Selenium. Ecology, pathology, correction]. Chita, IIC CSMA, 2002. 400 p.
34. Kashin V.K. Biogeochemistry of iodine in the Transbaikalia landscapes. *Geokhimiya*, 1996, no. 5, pp. 463–471. In Rus.
35. Kolotov B.A., Kraynov S.R., Rubeykin V.Z. *Osnovy gidrogeokhimicheskikh poiskov rudnykh mestorozhdeniy* [Fundamentals of hydrogeochemical exploration for mineral deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1983. 199 p.
36. Vetrov V.A., Kuznetsova A.I., Sklyarova O.A. Baseline levels of chemical elements in the water of Lake Baikal. *Geography and Natural Resources*, 2013, vol. 34, no. 3, pp. 228–238.
37. Kraynov S.R., Shvets V.M. *Geokhimiya podzemnykh vod khozyaystvenno-pitevogo naznacheniya* [Geochemistry of groundwater for domestic and drinking purposes]. Moscow, Nedra Publ., 1987. 237 p.
38. Ermakov V.V., Gulyaeva U.A., Tyutikov S.F., Kuzmina T.G., Sazonov V.A. Biogeochemistry of calcium and strontium in the landscapes of eastern Transbaikalia. *Geochemistry*, 2017, no. 12, pp. 1115–1127. In Rus.
39. Malinina V.S. Nekotorye dannye o sostave pischevykh produktov v rayone rasprostraneniya urovskoy endemii [Some data on the composition of foods in the distribution area of Urov endemia]. *Trudy Biogeochemicheskoy laboratorii* [Proc. of the biogeochemical laboratory]. Moscow, AN SSSR Publ., 1949. Vol. 9, pp. 55–64.

Received: 26 April 2018.

Information about the authors

Leonid V. Zamana, Cand. Sc., leading research scientist, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology.

Leonid P. Rikhvanov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Bulat R. Soktoev, Cand. Sc., assistant professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Natalia V. Baranovskaya, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Ekaterina S. Epova, Cand. Sc., research scientist, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology.

Mariya A. Solodukhina, Cand. Sc., research scientist, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology.

Larisa A. Mikhailova, Cand. Sc., head of the department, Chita State Medical Academy.

Yulia G. Kopylova, Cand. Sc., director of the center, National Research Tomsk Polytechnic University.

Albina A. Khvashchevskaya, Cand. Sc., head of research laboratory, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 62–531.32

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ЗАКАЧКИ ФИКСИРОВАННЫХ ОБЪЕМОВ ЖИДКОСТИ В ДВА НАПРАВЛЕНИЯ

Бикбулатова Голия Ильдусовна¹,
agni-ngo@mail.ru

Галеев Ахметсалим Сабинович¹,
agni-ngo@mail.ru

Болтнева Юлия Анатольевна¹,
agni-ngo@mail.ru

Ларин Пётр Андреевич²,
kafedra.itmen@mail.ru

Сулейманов Раис Насибович²,
kafedra.itmen@mail.ru

Филимонов Олег Владимирович²,
kafedra.itmen@mail.ru

¹ Альметьевский государственный нефтяной институт,
Россия, 423458, Республика Татарстан, г. Альметьевск, ул. Ленина, 2.

² Филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Октябрьском,
Россия, Республика Башкортостан, 452620, г. Октябрьский, ул. Девонская, 54 а.

Представлен новый подход к решению задачи оптимизации работы динамической системы «насос+трубопроводная сеть». В статье состоянием процесса закачки называются объёмы жидкости, поступившие через каждый трубопровод в данный момент времени. Эти объёмы взяты в качестве основных функций, зависящих от времени и описывающих процесс закачки. Система функций определяет воображаемую линию – траекторию закачки в пространстве, задаваемом плановыми объёмами закачки через каждый трубопровод. Регулирование потока в трубопроводах любыми устройствами, создающими местное гидродинамическое сопротивление (устройствами) даёт возможность получать различные траектории. Влияние регулирующих устройств оценивается коэффициентом открытости трубопровода или потока, определяемым как отношение потока (расхода) в частично перекрытом трубопроводе к потоку в полностью открытом трубопроводе. Рассмотрены два варианта закачки, в которых продемонстрировано, что разным траекториям может соответствовать своя потребляемая энергия. Проведён анализ используемой при количественных исследованиях и оценке работы насоса величины, равной отношению напора, создаваемого насосом, к КПД, соответствующему этому напору. Показано, что при повышении напора или снижении подачи данная величина возрастает. Поскольку затрачиваемая насосом энергия зависит от формы траектории, энергия становится функционалом, для поиска минимума которого привлекаются методы вариационного исчисления. Таким способом находится экстремаль – траектория, на которой затраты энергии и времени минимальны. Траекторией, описывающей оптимальный режим закачки, оказывается прямолинейный отрезок в пространстве закачки, концы которого соответствуют начальному и конечному состояниям процесса закачки. Для реализации данного процесса предложен алгоритм, позволяющий определить, какой трубопровод следует частично перекрыть, и рассчитать меру перекрытия, рассматривая регулирующее устройство как устройство, задающее коэффициент местного сопротивления.

Цель работы: определить оптимальный способ закачивания в два трубопровода, в котором насос и трубопроводная сеть рассматриваются как единая взаимосвязанная система.

Объекты исследования: насосы, используемые для поддержания пластового давления, два трубопровода, снабжённых устройствами для регулирования расхода жидкости.

Методы исследования: метод для нахождения оптимального режима – вариационное исчисление.

Результаты. Работа насоса требует наименьшего количества энергии и времени, если заполнение заданных объёмов происходит одновременно. Для процесса экономичного закачивания в два трубопровода дан алгоритм определения степени перекрытия трубопроводов.

Ключевые слова:

Трубопровод, траектория закачки, насос, напор, подача, расход.

Введение

Для поддержания пластового давления (ППД) нефтяных месторождений используются высоконапорные насосы (более 10 МПа), коэффициент полезного действия (КПД) которых тем выше, чем больше подача (расход). Однако приемистость

скважин (кубических метров в сутки) значительно уступает подаче насосов, что вынуждает использовать насосы для закачки жидкости через несколько трубопроводов в разные скважины [1–5]. Соответственно выбор наиболее эффективных режимов работы насосов становится весьма актуальной за-

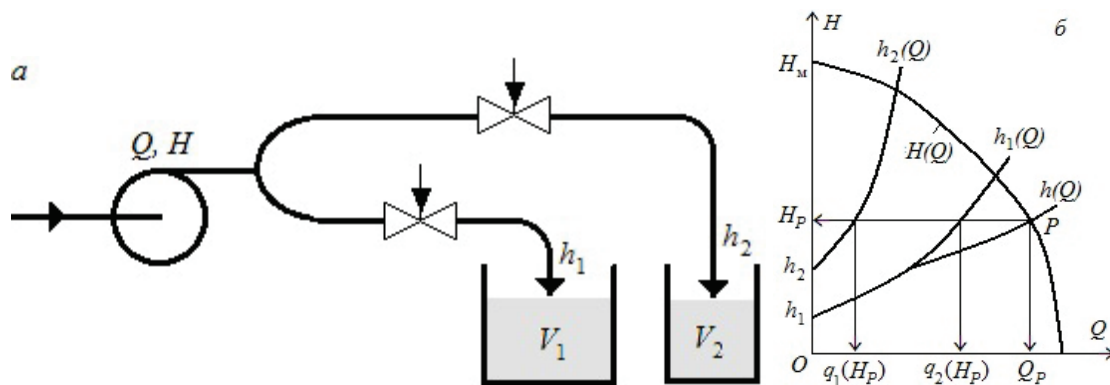


Рис. 1. Работа насоса на два трубопровода: а) схема закачки через два трубопровода; б) получение рабочей точки насоса

Fig. 1. Pump operation on two pipelines: a) injection scheme through two pipelines; б) obtaining the operating point of the pump

дачей, так как мощности насосных агрегатов, как правило, превышают 1 МВт,

В качестве критерия эффективности системы закачки используют затраты электрической энергии на единицу объёма перекачиваемой жидкости [6, 7], так называемый удельный расход электроэнергии (УРЭ), поскольку КПД насоса, не учитывает полное влияние параметров трубопроводной сети на количество затрачиваемой энергии [8–10].

Постановка задачи

Рассмотрим работу насоса на два трубопровода, снабжённых устройствами для регулирования расхода жидкости [11, 12]. Через первый и второй трубопроводы требуется закачать объёмы V_1 и V_2 соответственно, затратив наименьшее количество энергии (рис. 1, а). Напорная характеристика насоса $H(Q)$ и его КПД $\eta(Q)$ (где Q – подача насоса; H – напор, создаваемый насосом) обычно даются в виде графиков в паспорте насоса, поэтому они считаются известными. Пусть известны также гидравлические характеристики трубопроводов $\Delta h_1(Q)$, $\Delta h_2(Q)$, представляющие потери напоров в них, и соответствующие статические напоры h_1 , h_2 .

Потеря напора есть разность напоров в начальном и конечном сечениях трубы, поэтому

$$H - h_1 = \Delta h_1(Q), \quad H - h_2 = \Delta h_2(Q).$$

Отсюда

$$H = h_1(Q), \quad H = h_2(Q),$$

где

$$h_1(Q) = h_1 + \Delta h_1(Q), \quad h_2(Q) = h_2 + \Delta h_2(Q).$$

На рис. 1, б трубопроводы представлены графиками функций $h_1(Q)$, $h_2(Q)$. Поток Q , создаваемый насосом при напоре H , у входа в трубопроводы разделяется на потоки q_1 и q_2

$$Q(H) = q_1(H) + q_2(H). \quad (1)$$

График правой части этого равенства изображён линией $h(Q)$ на рис. 1, б, получаемой сложением графиков $h_1(Q)$ и $h_2(Q)$ в горизонтальном направлении. Уравнение (1) определяет рабочую точку P насоса с

координатами (Q_p, H_p) после чего становятся известными как расходы $q_1(H_p)$, $q_2(H_p)$ в каждом трубопроводе, так и потребляемая насосом мощность

$$N(Q_p) = \rho g \frac{H_p Q_p}{\eta(Q_p)}, \quad (2)$$

где ρ – плотность перекачиваемой жидкости; g – ускорение силы тяжести.

В формуле (1) аргументом служит напор H . В большинстве случаев в целях простоты исследований в качестве независимой переменной будем принимать H . На графиках оси H и Q поменяются местами (рис. 2, а). (Если характеристика насоса содержит восходящую область, где работа насоса нестабильна, то соответствующий участок на оси H исключается из рассмотрения; на остальных участках переменные H и Q связаны взаимно однозначным отношением.) При таком соглашении формула (2) принимает вид

$$N(H_p) = \rho g \frac{H_p Q(H_p)}{\eta(H_p)}.$$

Степень влияния регулирующих устройств на характеристики потока

Регулирующими устройствами уменьшим потоки в трубопроводах. Потери напора в устройствах увеличатся, гидравлические характеристики трубопроводов изменятся, и мы получим более низкие графики $\tilde{q}_1(H)$, $\tilde{q}_2(H)$, $\tilde{q}(H)$ (рис. 2, б). Рабочая точка опустится до положения P с координатами (H_p, Q_p) , определяемыми уравнением

$$Q(H) = \tilde{q}_1(H) + \tilde{q}_2(H). \quad (3)$$

Факт того, что при увеличении перекрытия трубопроводов исходные графики $q_1(H)$, $q_2(H)$ преобразуются в графики $\tilde{q}_1(H)$, $\tilde{q}_2(H)$, которые всё более и более «прижимаются» к горизонтальной оси H , выразим соотношениями

$$\tilde{q}_1(H) = a q_1(H), \quad \tilde{q}_2(H) = b q_2(H), \quad (4)$$

в которых $a, b \in [0, 1]$. Так, значению $a=0$ соответствует перекрытие первого трубопровода, а другому крайнему значению $a=1$ – его полная откры-

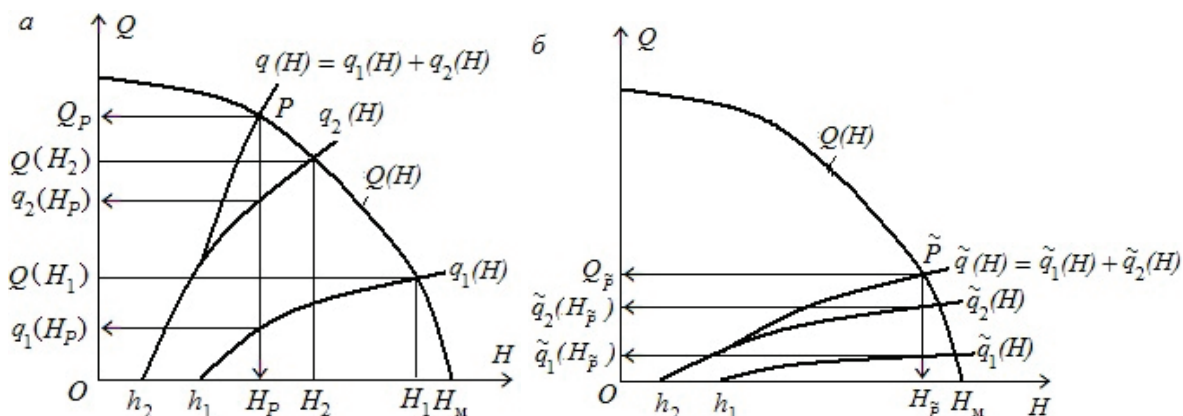


Рис. 2. Напорные характеристики насосов: а) сложение расходов $q_1(H)$, $q_2(H)$; б) графики расходов и рабочей точки понизились в результате частичного перекрытия трубопроводов. H_m – наибольшее значение напора

Fig. 2. Pressure characteristics of pumps: a) addition of consumption; б) schedules of consumption and a working point have gone down as a result of partial overlapping of pipelines. H_m is the maximum head value

тость. Коэффициенты a , b характеризуют степень открытости трубопроводов (или степень свободы потоков) и дают оценку влияния устройств на изменение потоков в трубопроводах. Подставив (4) в (3), получим уравнение, связывающие a , b с расходами в трубопроводах:

$$Q(H) = aq_1(H) + bq_2(H). \quad (5)$$

Из равенства $\tilde{q}_1(H) = aq_1(H)$ следует, что при уменьшении a понижается график $\tilde{q}_1(H)$ и поэтому рабочая точка \tilde{P} опускается – уменьшается Q и увеличивается H . Следовательно,

при увеличении a или b увеличивается общий поток Q и уменьшается напор H . (А)

Увеличим a , оставив b неизменным. Согласно утверждению (А) увеличится Q и уменьшится H . Уменьшение H приводит к уменьшению значения $bq_2(H)$, т. к. $q_2(H)$ и $q_1(H)$ – возрастающие функции (рис. 2, а). Запишем (5) в виде

$$aq_1(H) = Q(H) - bq_2(H).$$

Здесь правая часть возрастает, поэтому растёт и $aq_1(H)$. Таким образом,

увеличение a при постоянном b приводит к росту $aq_1(H)$ и уменьшению $bq_2(H)$. (Б)

Введение функций, описывающих процесс закачки

При закачке увеличиваются объёмы жидкости, поступившие через каждый трубопровод. Обозначим $x(t)$ и $y(t)$ объёмы, закачанные к моменту времени t через первый и второй трубопроводы. Процесс закачки будет описываться уравнениями

$$\dot{x} = x(t), \quad \dot{y} = y(t), \quad (6)$$

В начальный момент ни в один трубопровод ещё ничего не закачивалось:

$$x(0) = 0, \quad y(0) = 0. \quad (7)$$

К некоторому конечному моменту T будут закачаны требуемые объёмы V_1 и V_2 :

$$x(T) = V_1, \quad y(T) = V_2. \quad (8)$$

Равенства (7), (8) задают условия, которым должны удовлетворять функции $x(t)$, $y(t)$. Отметим, что в равенствах (8) T есть момент окончания процесса закачки, который не обязан совпадать с моментом одновременного заполнения объёмов V_1 и V_2 . Если объёмы V_1 и V_2 заполняются не одновременно, то T есть момент заполнения последнего из них. В качестве примера рассмотрим случай, когда функции $x(t)$, $y(t)$, описывающие процесс закачки (6), имеют вид, изображённый на рис. 3.

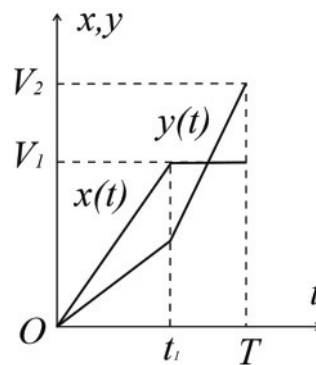


Рис. 3. Графическое изображение возможного процесса неодновременного заполнения объёмов V_1 и V_2

Fig. 3. Graphical representation of the possible non-simultaneous filling of volumes V_1 and V_2

Здесь мы видим, что в начальный период $[0, t_1]$ производится одновременная закачка в оба трубопровода. В момент времени t_1 первым заполняется объём V_1 и первый трубопровод перекрывается. После его перекрытия набранный объём $x(t)$ уже не меняется, оставаясь равным V_1 , а поток во втором трубопроводе увеличивается, что отражено на рисунке увеличением крутизны графика $y(t)$ во

второй период закачки $[t_1, T]$. В момент времени T происходит окончательное заполнение объёма V_2 . Рис. 3 показывает, что при $t=T$ имеем $x(T)=V_1$ и $y(T)=V_2$.

Равенства (6) задают параметрические уравнения линии на плоскости x, y с переменным параметром t (рис. 4, а, б). Эту линию, изображающую процесс закачки, назовём траекторией закачки. Любая траектория закачки располагается в прямоугольнике OV_2KV_1 , вершина K которого соответствует времени T и обозначает конечный момент закачки.

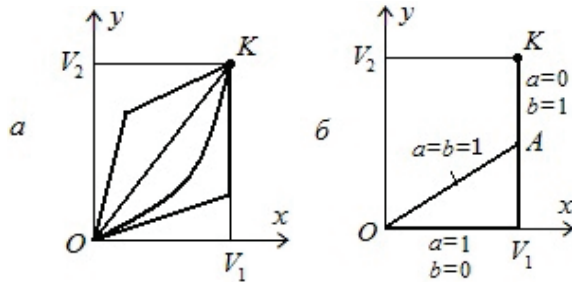


Рис. 4. Траектории закачки: а) примеры траекторий закачки; б) варианты закачки OV_1K и OAK , выбранные для исследования их экономичности

Fig. 4. Injection trajectories: а) examples of injection paths; б) injection options OV_1K and OAK selected for studying their economy

Каждая точка прямоугольника изображает состояние процесса закачки. К примеру, точка с координатами $x=5, y=7$ может означать, что к определённому моменту времени через первый трубопровод закачали 5 м^3 жидкости, а через второй 7 м^3 . Поэтому прямоугольник можно назвать фазовым пространством процесса закачки, точки в нём – фазовыми точками, линии – фазовыми траекториями. Насос вместе с трубопроводной сетью является динамической системой [13, 14].

Зависимость потребляемой энергии от траектории закачки

Убедимся в том, что потребляемая энергия зависит от траектории закачки [15, 16], сравнив значения энергии при закачивании по линиям OV_1K и OAK (рис. 4, б).

Первый случай: закачивание по траектории OV_1K . Сначала заполняется объём V_1 при перекрытом втором трубопроводе (процесс OV_1 на рис. 4, б, при этом $a=1, b=0$), затем заполняется V_2 при перекрытом первом трубопроводе (процесс $V_1K, a=0, b=1$). В первый период рабочей точкой служит точка пересечения кривых $q_1(H)$ и $Q(H)$ (рис. 2, а). Время заполнения объёма V_1 равно $t_1=V_1/Q(H_1)$, при этом затрачивается энергия

$$\varepsilon_1 = N_1 t_1 = \rho g \frac{H_1 Q(H_1)}{\eta(H_1)} t_1 = \rho g \frac{H_1 V_1}{\eta(H_1)}.$$

При открытом втором трубопроводе получим

$$\varepsilon_2 = \rho g \frac{H_2 V_2}{\eta(H_2)}.$$

Суммарная потреблённая энергия равна

$$E_1 = \rho g \frac{H_1 V_1}{\eta(H_1)} + \rho g \frac{H_2 V_2}{\eta(H_2)}.$$

Второй случай: закачивание по траектории OAK . Сначала заполняются оба объёма до того момента, пока не заполнится один из них. Пусть первым заполнится объём V_1 (процесс $OA, a=1, b=1$), затем первый трубопровод перекрывается и продолжает заполняться объём V_2 (процесс $AK, a=0, b=1$). В первый период, когда закачка производится через оба трубопровода, рабочей точкой будет пара чисел (H_p, Q_p) , определяемых уравнением (2) (рис. 2, а). Так как первым заполняется объём V_1 , то время одновременной закачки равно

$$t_1 = \frac{V_1}{q_1(H_p)}, \quad (9)$$

и в этот период будет затрачена энергия

$$\varepsilon_1 = \rho g \frac{H_p Q(H_p)}{\eta(H_p)} t_1 = \rho g \frac{H_p Q(H_p) V_1}{q_1(H_p) \eta(H_p)}.$$

В течение того же времени t_1 через второй трубопровод пройдёт объём $t_1 q_2(H_p)$. В остальное время открытым будет только второй трубопровод ($a=0, b=1$), где будет идти поток $Q(H_2)$ (рис. 2, а). Поэтому оставшийся объём $V_2 - t_1 q_2(H_p)$ заполнится за время

$$t_2 = \frac{V_2 - t_1 q_2(H_p)}{Q(H_2)},$$

и за это время будет потреблена энергия

$$\varepsilon_2 = \rho g \frac{H_2 Q(H_2)}{\eta(H_2)} t_2 = \rho g \frac{H_2 [V_2 - t_1 q_2(H_p)]}{\eta(H_2)}.$$

Общие затраты энергии равны

$$E_2 = \rho g \frac{H_p Q(H_p) V_1}{q_1(H_p) \eta(H_p)} + \rho g \frac{H_2 [V_2 - t_1 q_2(H_p)]}{\eta(H_2)}.$$

Для сравнения значений E_1, E_2 образуем их разность

$$E_1 - E_2 = \rho g \left[\frac{H_1 V_1}{\eta(H_1)} + \frac{H_2 t_1 q_2(H_p)}{\eta(H_2)} - \frac{H_p Q(H_p) V_1}{\eta(H_p) q_1(H_p)} \right].$$

Подставим значение t_1 из (9) и $Q(H)=q_1(H)+q_2(H)$. После преобразований получим

$$E_1 - E_2 = \frac{\rho g V_1}{q_1(H_p)} \left\{ \left[\frac{H_1}{\eta(H_1)} - \frac{H_p}{\eta(H_p)} \right] q_1(H_p) + \left[\frac{H_2}{\eta(H_2)} - \frac{H_p}{\eta(H_p)} \right] q_2(H_p) \right\}. \quad (10)$$

Рассмотрим поведение дроби $H/\eta(H)$, влияющей на выражения в квадратных скобках. Воспользуемся убыванием функции $H(Q)$ на интервале $(0, Q_M)$ и выпуклостью функции $\eta(Q)$, имеющей максимум в точке Q_0 (рис. 5, а; Q_M – наибольшее возможное значение подачи). И докажем, что функция $\eta(H)$ тоже выпуклая. Для этого исследуем поведение величины

$$\eta'(H) = \frac{\eta'(Q)}{H'(Q)}.$$

Поскольку знаменатель отрицателен, функции $\eta'(H)$, $\eta'(Q)$ имеют противоположные знаки. На интервале $(0, Q_0)$ имеем $\eta'(Q) > 0$, поэтому $\eta'(H) < 0$. Попутно отметим, что интервалу $(0, Q_0)$ оси Q соответствует интервал (H_0, H_M) оси H . На следующем интервале (Q_0, Q_M) , которому соответствует интервал $(0, H_0)$, имеем $\eta'(Q) < 0$, поэтому $\eta'(H) > 0$. Получается, что при $H \in (0, H_0)$ дифференцируемая функция $\eta(H)$ растёт, а при $H \in (H_0, H_M)$ убывает. Это означает, что функция $\eta(H)$ выпуклая.

На рис. 5, б, где изображена выпуклая кривая $\eta(H)$, показано, что если $H_1 < H_2$, то $\alpha_1 > \alpha_2$, поэтому $\text{ctg} \alpha_1 > \text{ctg} \alpha_2$ или $H_1/\eta(H) < H_2/\eta(H)$. Следовательно, переменные H и $H/\eta(H)$ ведут себя одинаково, т. е. отношение

$$\theta(H) = \frac{H}{\eta(H)} \quad (11)$$

есть *возрастающая* функция напора H . В напорной характеристике насоса при увеличении Q уменьшается H (рис. 5, а). Поэтому аналогом величины (11) является функция

$$\theta(Q) = \frac{H(Q)}{\eta(Q)},$$

которая *убывает* при увеличении подачи Q .

В равенстве (10) $H_1 > H_2$, $H_2 > H_p$ (рис. 2, а), поэтому в квадратных скобках выражения положительные. Значит, $E_1 > E_2$ – второй способ закачки экономичнее первого. Следовательно, не все траектории равнозначны по энергосбережению.

Поиск траектории, на которой энергия минимальна

Возьмём произвольную, но без изломов, траекторию OK , получаемую плавным регулированием устройствами во время закачки (рис. 5, в). Коэффициенты a , b будут также плавно изменяться, а линия OK опишется дифференцируемыми функциями $x(t)$, $y(t)$. В этом случае существуют произ-

водные по времени $\dot{x} = dx/dt$, $\dot{y} = dy/dt$, означающие скорости закачки, или расходы жидкости в трубопроводах. Поэтому

$$\dot{y} = bq_2(H), \quad (12)$$

и формула (5) принимает вид

$$Q(H) = \dot{x} + \dot{y}. \quad (13)$$

За бесконечно малый промежуток времени dt насос потребляет энергию $dE = N(Q)dt$. С учётом (13) её можно записать в виде $dE = N(\dot{x} + \dot{y})dt$, поэтому за всё время T работы он потребит энергию

$$E = \int_0^T N(\dot{x} + \dot{y})dt.$$

Значение E зависит от неизвестных функций $x(t)$ и $y(t)$, поэтому E – функционал. Введём замену

$$V = x + y.$$

Равенства (7), (8) дают условия, которым должна удовлетворять функция $V(t)$:

$$V(0) = 0, \quad V(T) = V_1 + V_2. \quad (14)$$

Так как

$$\dot{V} = \dot{x} + \dot{y},$$

то

$$E = \int_0^T N(\dot{V})dt. \quad (15)$$

Входящая в эту формулу функция $V(t)$, как и $x(t)$, $y(t)$, является гладкой, поэтому её можно найти с помощью уравнения Эйлера [16, 17]:

$$\frac{d}{dt} N_{\dot{V}} = N_V.$$

В силу того, что N зависит лишь от \dot{V} , правая часть равна нулю. Остаётся $dN_{\dot{V}}/dt = 0$, отсюда $N_{\dot{V}}\dot{\dot{V}} = 0$. Значит, $\dot{\dot{V}} = 0$ или $N_{\dot{V}} = 0$. В обоих случаях решением является

$$\dot{V} = Q = \text{const}, \quad (16)$$

$$V = Qt + C, \quad (17)$$

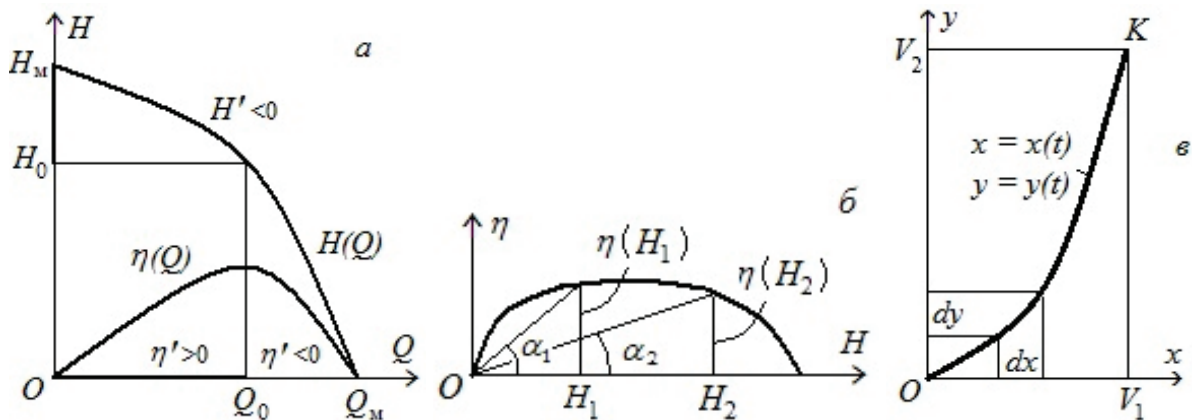


Рис. 5. Анализ поведения функций: а) функция $H(Q)$, $\eta(Q)$ при доказательстве выпуклости $\eta(H)$; б) использование выпуклости $\eta(H)$ для доказательства того, что функция $H/\eta(H)$ возрастает; в) график произвольной траектории закачки без изломов

Fig. 5. Analysis of functions behavior: а) function $H(Q)$, $\eta(Q)$ in the proof of convexity $\eta(H)$; б) use of convexity $\eta(H)$ to prove that the function $H/\eta(H)$ is increasing; в) graph of an arbitrary injection path without kinks

где C – постоянная [17]. Таким образом, подача насоса в процессе закачки не должна меняться. Подстановка условий (14) в (17) даёт время полной закачки

$$T = \frac{V_1 + V_2}{Q}. \quad (18)$$

Из постоянства Q следует постоянство характеристик H , a , b , а также мощности N насоса. Поэтому выражение (15) сводится к равенству

$$E = NT.$$

С учётом условий (7) получаем решение уравнений (12):

$$x = aq_1(H)t, \quad y = bq_2(H)t. \quad (19)$$

Это уравнения прямой линии. Таким образом, траекторией закачки должен быть прямолинейный отрезок OK , изображающий одновременное заполнение обоих объёмов (рис. 4, а).

Определение значений коэффициентов открытости трубопроводов

Подставим в (19) условия (8):

$$aq_1(H)T = V_1, \quad bq_2(H)T = V_2. \quad (20)$$

Запишем выражение для энергии, подставив значение мощности:

$$E = \rho g \frac{H}{\eta(H)} QT.$$

С учётом (18) получим

$$E = \rho g \frac{H}{\eta(H)} (V_1 + V_2).$$

Для минимизации E нужно минимизировать величину $H/\eta(H)$, что достигается при наименьшем значении H . В соответствии с утверждением (А) мы можем уменьшить H , увеличив коэффициенты a и b . Посмотрим, как можно найти подходящие коэффициенты.

Если из выражений (20) исключить T , получим связь между коэффициентами:

$$\frac{aq_1(H)}{V_1} = \frac{bq_2(H)}{V_2}. \quad (21)$$

Для того чтобы узнать, какой трубопровод не следует перекрывать, решим уравнение

$$Q(H) = q_1(H) + q_2(H),$$

получаемое из (5) при $a=b=1$, и найдём H . Это не трудно сделать графическим способом. Найдя H , определим времена заполнения объёмов V_1 и V_2 :

$$t_1 = \frac{V_1}{q_1(H)}, \quad t_2 = \frac{V_2}{q_2(H)}.$$

Пусть оказалось, что $t_1 < t_2$ – первый объём заполняется быстрее второго. В таком случае, чтобы заполнить объёмы одновременно, нужно сдержать поток в первом трубопроводе, т. е. уменьшить a и оставить по-прежнему $b=1$. В соответствии с (5) теперь мы должны иметь дело с уравнением

$$Q(H) = aq_1(H) + q_2(H).$$

Привлечём сюда и соотношение (21), которое при $b=1$ даёт

$$a = \frac{V_1 q_2(H)}{V_2 q_1(H)}. \quad (22)$$

Подстановка этого выражения в предыдущее равенство приводит к уравнению

$$Q(H) = \left(1 + \frac{V_1}{V_2}\right) q_2(H),$$

из которого найдём H , а затем a из (22).

Если же $t_1 > t_2$, то должно быть $a=1$ и мы получим уравнения

$$Q(H) = \left(1 + \frac{V_2}{V_1}\right) q_1(H), \quad b = \frac{V_2 q_1(H)}{V_1 q_2(H)},$$

позволяющие определить H и b для этого случая.

Закачка жидкости одним насосом на три трубопровода

В случае подключения насоса к трём трубопроводам аналогом уравнения (5) является уравнение

$$Q(H) = aq_1(H) + bq_2(H) + cq_3(H) \quad (23)$$

с коэффициентом c открытости третьего трубопровода. В этом случае коэффициенты a , b , c оказываются связанными равенствами

$$\frac{aq_1(H)}{V_1} = \frac{bq_2(H)}{V_2} = \frac{cq_3(H)}{V_3}. \quad (24)$$

Можно предложить следующий способ их определения. Решим, например, графически, уравнение

$$Q(H) = q_1(H) + q_2(H) + q_3(H)$$

и найдём H . Затем вычислим

$$t_1 = \frac{V_1}{q_1(H)}, \quad t_2 = \frac{V_2}{q_2(H)}, \quad t_3 = \frac{V_3}{q_3(H)}.$$

Значения t_1 , t_2 , t_3 упорядочим по возрастанию. Например, так: $t_1 < t_2 < t_3$ – третий объём заполняется медленнее остальных. Тогда нужно взять $c=1$ и из (24) будем иметь

$$a = \frac{V_1 q_3(H)}{V_3 q_1(H)}, \quad b = \frac{V_2 q_3(H)}{V_3 q_2(H)}.$$

Подстановка этих значений в (23) даст уравнение

$$Q(H) = \left(1 + \frac{V_1 + V_2}{V_3}\right) q_3(H),$$

из которого найдём H , затем a , b из предыдущих формул.

О траектории закачки, имеющей излом

До сих пор предполагалось, что траектория закачки не имеет изломов. Проверим, возможна ли ломаная траектория, на которой энергопотребление будет ещё меньше.

Пусть t_0 – момент закачки, когда у траектории происходит излом. Время закачки разобьём на два

интервала $[0, t_0]$ и $(t_0, T]$, в каждом из которых траектория закачки, а значит и функция $V(t)$, не имеет изломов. Поэтому мы можем применить уравнение Эйлера для каждого временного интервала отдельно, в результате чего придём к равенствам вида (16):

$$\dot{V} = \begin{cases} Q_1 & \text{при } t \in [0, t_0]; \\ Q_2 & \text{при } t \in (t_0, T], \end{cases}$$

где Q_1, Q_2 – постоянные. При $t=t_0$ подынтегральная функция $N(\dot{V})$ в (15) должна удовлетворять условиям Вейерштрасса–Эрдмана [13, 17]:

$$\begin{aligned} N_{\dot{V}} \Big|_{t=t_0-0} &= N_{\dot{V}} \Big|_{t=t_0+0}, \\ N - \dot{V}N_{\dot{V}} \Big|_{t=t_0-0} &= N - \dot{V}N_{\dot{V}} \Big|_{t=t_0+0}. \end{aligned}$$

В общем случае $N_{\dot{V}}$ есть непрерывная функция от \dot{V} : $N_{\dot{V}}=f(\dot{V})$ поэтому из первого условия следует

$$f(\dot{V}) \Big|_{t=t_0-0} = f(\dot{V}) \Big|_{t=t_0+0} \quad \text{или} \quad f(Q_1) = f(Q_2),$$

отсюда

$$Q_1 = Q_2$$

– траектория закачки с наименьшим энергопотреблением не имеет изломов. Из непрерывности $N_{\dot{V}}$ следует и выполнение второго условия Вейерштрасса–Эрдмана.

Траектория, на которой время закачки минимально

Пусть за время dt через первый трубопровод закачался объём dx , через второй – объём dy (рис. 5, в). В соответствии с (12)

$$dx = aq_1(H)dt, \quad dy = bq_2(H)dt. \quad (25)$$

Отсюда

$$\begin{aligned} dx + dy &= [aq_1(H) + bq_2(H)]dt = Q(H)dt, \\ dt &= \frac{dx + dy}{Q(H)}. \end{aligned} \quad (26)$$

При фиксированных dx, dy мы можем уменьшить время закачки dt , увеличив поток $Q(H)$. А увеличение потока достигается увеличением коэффициентов a, b . Однако их увеличение не может быть произвольным. В самом деле, из (25) следует

$$\frac{bq_2(H)}{aq_1(H)} = \frac{dy}{dx} \equiv y'. \quad (27)$$

Так как dx, dy у нас заданы, то правая часть постоянна. Попробуем увеличить a при неизменном b . В соответствии с утверждением (Б) левая часть выражения (27) уменьшится. Поэтому, чтобы равенство (27) сохранилось, увеличение a требует одновременного увеличения b . При их одновременном увеличении по крайней мере один из коэффициентов достигнет наибольшего значения, равного 1. Значит, чтобы на закачку ушло минимальное количество времени, на каждом участке траектории закачки либо a , либо b должно быть равно 1.

Из (27) и (5) составим равнозначные формулы

$$Q(H) = aq_1(H)(1 + y'), \quad (28)$$

$$Q(H) = bq_2(H) \left(1 + \frac{1}{y'} \right). \quad (29)$$

Пусть на каком-то участке траектории закачки $a=1$. Из (28) получим

$$Q(H) = q_1(H)(1 + y').$$

Если же $b=1$, то из (29) будем иметь

$$Q(H) = q_2(H) \left(1 + \frac{1}{y'} \right).$$

Последние две формулы говорят о том, что H является функцией крутизны y' траектории закачки.

Так как $dx+dy=(1+y')dx$, где $x \in [0, V_1]$, то из (26) получим формулу вычисления времени закачки

$$T = \int_0^{V_1} \frac{1 + y'}{Q(H)} dx.$$

Для подынтегральной функции, зависимой лишь от y' , введём обозначение

$$F(y') \equiv \frac{1 + y'}{Q(H)}.$$

Будем иметь функционал

$$T = \int_0^{V_1} F(y') dx,$$

значение которого зависит от $y(x)$. Таким же способом, которым определялись условия минимума энергии, получим $y'=\text{const}$ – траектория закачки должна иметь постоянный угловой коэффициент, т. е. должна быть прямой. Значит, отрезок OK есть траектория наименьших затрат времени на закачку.

Расчёт степени открытия трубопроводов с помощью коэффициентов открытости

В гидравлических расчётах действие регулирующего устройства оценивают коэффициентом ζ местного сопротивления. Для турбулентного режима течения числовые значения ζ при различных степенях открытия трубопровода даются в справочных таблицах. Найдём связь между ζ и введённым нами коэффициентом открытости a .

Будем считать известным коэффициент $\zeta_{\text{труб}}$ сопротивления трубопровода при открытом устройстве, т. е. когда $a=1$. При $a=1$ потеря напора в трубопроводе равна

$$\Delta h = \zeta_{\text{труб}} \frac{v^2}{2g},$$

где v – скорость жидкости [3, 18]. Так как $v=q/S$, где S – площадь сечения трубы; q – расход в трубопроводе,

$$\Delta h = \frac{\zeta_{\text{труб}}}{2gS^2} q^2.$$

Отсюда

$$q = \sqrt{\frac{2gS^2}{\zeta_{\text{труб}}} \Delta h}.$$

Регулирующим устройством уменьшим расход, он станет равным \tilde{q} . Действие устройства увеличивает сопротивление трубопровода на некоторую величину ζ , поэтому

$$\tilde{q} = \sqrt{\frac{2gS^2}{\zeta_{\text{труб}} + \zeta}} \sqrt{\Delta h}.$$

Подставив значения \tilde{q} , q в формулу, определяющую коэффициент открытости $a = \tilde{q}/q$, получим

$$a = \sqrt{\frac{1}{1 + \zeta/\zeta_{\text{труб}}}},$$

отсюда

$$\zeta = \left(\frac{1}{a^2} - 1 \right) \zeta_{\text{труб}}.$$

По найденному коэффициенту сопротивления задвижки ζ из соответствующих таблиц находим степень открытия трубопровода.

Заключение

Работа насоса требует минимума энергии и времени, если заполнение заданных объемов происходит одновременно [19, 20]. По результатам исследований можно предложить следующий алгоритм для осуществления наименее затратного процесса закачки в два трубопровода.

1. Имеем исходные данные: графики характеристик насоса $H(Q)$ и трубопроводов $h_1(Q) = h_1 + \Delta h_1(Q)$, $h_2(Q) = h_2 + \Delta h_2(Q)$ аналогичные тем, которые даны на рис. 1, б, где $\Delta h_1(Q)$, $\Delta h_2(Q)$ – гидравлические характеристики трубопроводов, h_1 , h_2 – статические напоры. Через первый и второй трубопроводы требуется закачать жидкость объемов V_1 и V_2 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бахтияров Г.А., Волков В.Г., Нургалиев Р.З. Опыт оптимизации работы системы поддержания пластового давления путем анализа текущей разработки нефтяного месторождения // Нефтепромысловое дело. – 2017. – № 3. – С. 9–15.
2. Parsasadr A., Ahmadi A., Keramat A. Waterhammer caused by intermittent pump failure in pipe systems including parallel puup groups // 37th IAHR World Congress 2017. – Kuala Lumpur, Malaysia, 2017. – P. 444–453.
3. Рабинович Е.З. Гидравлика. – М.: Недра, 1978. – 297 с.
4. Budxram D., Rasek M., Peters R. A simplified method for monitoring the efficiency of pumps // World Oil. – 2002. – № 6. – P. 79–82.
5. Сулейманов Р.Н., Галеев А.С., Бикбулатова Г.И. Эффективность работы насосных агрегатов: монография. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2004. – 100 с.
6. Рахманов А.Р., Ожередов Е.В., Сафиуллин И.Р. Организация системы мониторинга энергоэффективности процессов добычи нефти // Нефтепромысловое дело. – 2017. – № 4. – С. 25–28.
7. Haghghi A., Keramat A. A fuzzy approach for considering uncertainty in transient analysis of pipe networks // Proc. of 11th International Conference on Pressure Surges. – Lisbon, Portugal, 2012. – P. 24–26.

2. Меняем ролями оси и строим те же графики в системе координат (H, Q) . Получатся кривые $Q(H)$, $q_1(H)$, $q_2(H)$ подобные тем, что изображены на рис. 2, а.

3. Графически решаем уравнение

$$Q(H) = q_1(H) + q_2(H)$$

и находим H . Далее определяем

$$t_1 = \frac{V_1}{q_1(H)}, \quad t_2 = \frac{V_2}{q_2(H)}.$$

4. Если $t_1 < t_2$, решаем уравнение

$$Q(H) = \left(1 + \frac{V_1}{V_2} \right) q_2(H),$$

из него находим H и вычисляем

$$a = \frac{V_1 q_2(H)}{V_2 q_1(H)}.$$

Теперь, зная a , перекрываем первый трубопровод с коэффициентом открытия a и приступаем к закачке.

5. Если $t_1 > t_2$, решаем уравнение

$$Q(H) = \left(1 + \frac{V_2}{V_1} \right) q_1(H),$$

находим H и вычисляем

$$b = \frac{V_2 q_1(H)}{V_1 q_2(H)}.$$

По ζ_2 из таблиц находим степень открытия второго трубопровода. В соответствии с этим значением частично перекрываем второй трубопровод и начинаем закачку.

В следующей статье авторы планируют рассмотреть вопрос оптимизации параллельной работы двух и более насосов.

8. Методика определения КПД центробежных насосов системы поддержания пластового давления / А.Г. Богатырев, А.В. Лямин, Ю.А. Левин, И.Н. Елисеенко // Нефтепромысловое дело. – 2004. – № 5. – С. 22–25.
9. Колосов Б., Сулейманов Р. Методика снижения энергоемкости процесса нагнетания в системе ППД и необходимое оборудование // Нефтесервис. – 2006. – № 3. – С. 27–29.
10. Методика определения КПД насосных агрегатов магистральных нефтепроводов // РД 39–0147103–307–85, Миннефтепром СССР, утвержден 14 декабря 1985. – Уфа: ВНИИСПТнефть, 1986. – 36 с.
11. Shashi E. Menon Transmission Pipeline Calculations and Simulations Manual. – Oxford: Technology & Engineering Publ., 2014. – 599 p.
12. Shashi E. Menon Pipeline Planning and Construction Field Manual. – Oxford: Technology & Engineering Publ., 2011. – 552 p.
13. Анищенко В.С. Знакомство с нелинейной динамикой. – Саратов: СГУ, 2008. – 170 с.
14. Hanks K.H., Stanley G.T. Requirements of Pipeline Simulation: Accurately Modeling Transient Pipeline Operation // 1998 2nd International Pipeline Conference. – Calgary, 1998. – V. II. – P. 843–850.
15. Chemical Engineering. V. 1: Fluid Flow, Heat Transfer and Mass Transfer / J.F. Richardson, J.H. Harker, J.R. Backhurst et al. – Oxford: Butterworth-Heinemann Title, 1999. – 526 p.

16. Bird J. Engineering Mathematics. 5th ed. – Amsterdam: Elsevier Ltd., 2007. – 502 p.
17. Эльсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. – М.: Наука, 1969. – 425 с.
18. Milnes M. The Mathematics of Pumping Water. – Barnsley: AECOM Design Build, 2010. – 50 p.
19. Галеев А.С., Сулейманов Р.Н., Арсланов И.Г. Автономная система контроля и мониторинга работы насосной станции // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2013. – № 9. – С. 12–15.
20. Опыт применения автономной системы контроля и регистрации технологических параметров «АСКИР» / А.С. Галеев, Г.И. Бикбулатова, Ю.А. Болтнева, И.А. Кузьмин, П.П. Ермилов, А.О. Рязанцев // Нефтепромышленное дело. – 2016. – № 9. – С. 43–48.

Поступила 29.05.2018 г.

Информация об авторах

Бикбулатова Г.И., кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазового оборудования и технологии машиностроения Альметьевского государственного нефтяного института.

Галеев А.С., доктор технических наук, профессор кафедры нефтегазового оборудования и технологии машиностроения Альметьевского государственного нефтяного института.

Болтнева Ю.А., старший преподаватель кафедры нефтегазового оборудования и технологии машиностроения Альметьевского государственного нефтяного института.

Ларин П.А., старший преподаватель кафедры информационных технологий, математики и естественных наук филиала Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Октябрьском.

Сулейманов Р.Н., кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий, математики и естественных наук филиала Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Октябрьском.

Филимонов О.В., кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий, математики и естественных наук филиала Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Октябрьском.

UDC 62–531.32

OPTIMIZATION OF PUMPING FIXED VOLUME OF LIQUID ON TWO DIRECTIONS

Golia I. Bikbulatova¹,

agni-ngo@mail.ru

Achmetsalim S. Galeev¹,

agni-ngo@mail.ru

Yulia A. Boltneva¹,

agni-ngo@mail.ru

Petr A. Larin²,

kafedra.itmen@mail.ru

Rais N. Suleymanov²,

kafedra.itmen@mail.ru

Oleg V. Filimonov²,

kafedra.itmen@mail.ru

¹ Almeteyevsk State Oil Institute,
2, Lenin street, Almeteyevsk, Republic of Tatarstan, 423458, Russia.

² Oktyabrsky branch of Ufa State Petroleum Technological University,
54 a, Devonskaya street, Oktyabrsky, Republic of Bashkortostan, 452620, Russia.

The paper introduces a new approach to solving the problem of optimization of dynamic systems «pump+pipe network». In the article the volume of fluid admitted through each pipe in a given time is called the state of pumping. These volumes are taken as basic time-dependent functions describing injection. The system of functions defines an imaginary line – the trajectory of injection in the space, set by the planned volumes of injection through each pipeline. Regulation of flow in the pipelines by any devices, which create local hydrodynamic resistance, allows obtaining different trajectories. The impact of control devices is estimated by the openness coefficient of a pipeline or flow, defined as the ratio of flow in partially blocked pipeline to the flow in the fully open pipeline. The paper considers two options of injection, which demonstrated that different trajectories could meet its own energy consumption. The authors have analyzed the value, equal to the ratio of the pressure produced by the pump to the efficiency corresponding to this pressure, used in quantitative research and assessment of pump operation. It is shown that with increasing pressure or with decreasing feed the given value grows. Since the required pump energy depends on the shape of the trajectory, the energy becomes a functional. To find the minimums of this functional the variational methods are used. This is the way for finding extremal trajectory, where energy and time cost is minimal. A trajectory describing the optimal injection mode is a straight-line segment in an injection space, the ends of which correspond to the initial and final states of injection. To implement this process, the authors proposed the algorithm to determine which pipeline should be partly blocked, and calculate a measure of blocking, considering control device as the device that sets the local resistance coefficient.

The main aim of the research was to determine the optimal way of pumping into two pipelines, in which the pump and the pipeline network are considered as a single interconnected system.

Objects: pumps used to maintain reservoir pressure, two pipelines equipped with devices for controlling fluid flow.

Methods: method for finding the optimal regime – calculus of variations.

Results. Pump operation requires the least amount of energy and time, if the filling of the set volumes occurs simultaneously. The paper introduces the algorithm for determining the degree of blocking the pipelines for pumping in two pipelines.

Key words:

Pipeline, injection trajectory, pump, pressure, flow, consumption.

REFERENCES

1. Bakhtiyarov G.A., Volkov V.G., Nurgaliev R.Z. Experience of optimization of reservoir pressure maintenance system by analyzing current development of oil fields. *Oilfield engineering*, 2017 no. 3, pp. 9–15. In Rus.
2. Parsasadr A., Ahmadi A., Keramat A. Waterhammer caused by intermittent pump failure in pipe systems including parallel pump groups. *37th IAHR World Congress 2017*. Malaysia, Kuala Lumpur, 2017. pp. 444–453.
3. Rabinovich E.Z. *Gidravlika* [Hydraulics]. Moscow, Nedra Publ., 1978. 297 p.
4. Budxram D., Rasek M., Peters R. Simplified method for monitoring the efficiency of pumps. *World Oil*, 2002, no. 6, pp. 79–82.
5. Suleymanov R.N., Galeev A.S., Bikbulatova G.I. *Effektivnost raboti nasosnikh agregatov: monografia* [Efficiency of pumping units operation: monograph]. Ufa, UGNTU Publ., 2004. 100 p.
6. Rakhmanov A.R., Ozheredov E.V., Safiullin I.R. Organization of the system providing monitoring of oil production energy efficiency. *Oilfield engineering*, 2017, no. 4, pp. 25–28. In Rus.
7. Haghghi A., Keramat A. A fuzzy approach for uncertainty in transient analysis of pipe networks. *Proc. of the 11th International Conference on Pressure Surges*. Lisbon, Portugal, 2012. pp. 24–26.
8. Bogatyrev A.G., Lyamin A.V., Levin Yu.A., Yeliseyenko I.N. Method for determining the efficiency of centrifugal pumps of the reservoir pressure maintenance system. *Oilfield engineering*, 2004, no. 5. pp. 22–25. In Rus.

9. Kolosov B., Suleimanov R. Technique for reducing the energy intensity of the injection process in the PPD system and the necessary equipment. *Nefteservis*, 2006, no. 3, pp. 27–29. In Rus.
10. *Metodika opredeleniya KPD nasosnykh agregatov magistralnykh nefteprovodov* [Methodology for determining the efficiency of pumping units of main oil pipelines]. RD 39–0147103–307–85, Minneftprom USSR, approved on December 14, 1985. Ufa, VNI-ISPTneft Publ., 1986. 36 p.
11. Shashi E. *Menon Transmission Pipeline Calculations and Simulations Manual*. Oxford, Technology & Engineering Publ., 2014. 599 p.
12. Shashi E. *Menon Pipeline Planning and Construction Field Manual*. Oxford, Technology & Engineering Publ., 2011. 552 p.
13. Anishchenko V.S. *Znakomstvo s nelineinoy dinamikoy* [Acquaintance with nonlinear dynamics]. Saratov, SSU Publ., 2008. 170 p.
14. Hanks K.H., Stanley G.T. Requirements of Pipeline Simulation: Accurately Modeling Transient Pipeline Operation. *1998 2nd International Pipeline Conference*. Calgary, 1998. Vol. II, pp. 843–850.
15. Richardson J.F., Harker J.H., Backhurst J.R. *Chemical Engineering. V. 1: Fluid Flow, Heat Transfer and Mass Transfer*. Oxford, Butterworth-Heinemann Title, 1999. 526 p.
16. Bird J. *Engineering Mathematics*. 5th ed. Amsterdam, Elsevier Ltd., 2007. 502 p.
17. Elsgolts L.E. *Differentsialnye uravneniya i variatsionnoe ischislenie* [Differential equations and calculus of variations]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 425 p.
18. Milnes M. *The Mathematics of Pumping Water*. Barnsley, AECOM Design Build, 2010. 50 p.
19. Galeev A.C., Suleymanov R.N., Arslanov I.G. Autonomous system for monitoring the operation of the pumping station. *Automation, telemechanization and communication in the oil industry*, 2013, no. 9. pp. 12–15. In Rus.
20. Galeev A.S., Bikbulatova G.I., Boltneva Yu.A., Kuzmin I.A., Ermilov P.P., Ryazantsev A.O. Experience of application of «ASCIR» autonomous control systems and technological parameters registration. *Oilfield engineering*, 2016, no. 9, pp. 43–48. In Rus.

Received: 29 May 2018.

Information about the authors

Golia I. Bikbulatova, Cand. Sc., associate professor, Almet'yevsk State Oil Institute.

Achmetsalim S. Galeev, Dr. Sc., professor, Almet'yevsk State Oil Institute.

Yulia A. Boltneva, senior lector, Almet'yevsk State Oil Institute.

Petr A. Larin, senior lector, Oktyabrsky branch of Ufa State Petroleum Technological University.

Rais N. Suleymanov, Cand. Sc., associate professor, Oktyabrsky branch of Ufa State Petroleum Technological University.

Oleg V. Filimonov, Cand. Sc., associate professor, Oktyabrsky branch of Ufa State Petroleum Technological University.

УДК 544.77, 542.06

УСЛОВИЯ СОВМЕСТНОГО УДАЛЕНИЯ СОЕДИНЕНИЙ КРЕМНИЯ И ГУМИНОВЫХ ВЕЩЕСТВ ИЗ ПРИРОДНЫХ ВОД В ПРИСУТСТВИИ ПРОДУКТОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МАГНЕЗИТА

Костикова Лариса Анатольевна¹,
lak@tpu.ru

Шиян Людмила Николаевна¹,
shln@tpu.ru

Мачехина Ксения Игоревна¹,
mauthksu@yandex.ru

Коршунов Андрей Владимирович¹,
korshunov@tpu.ru

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

Актуальность. Подземные воды Западно-Сибирского региона характеризуются повышенным содержанием ионов железа, силикат ионов и органических веществ гумусового происхождения. Эти примеси способствуют образованию устойчивой коллоидной системы. При использовании природной воды в качестве теплоносителя на поверхности труб формируются силикатные отложения за счет связывания катионов кальция, магния, алюминия, железа. Совместное присутствие силикатов и органических примесей приводит к снижению эффективности очистки воды с применением существующих технологий водоподготовки.

Цель: определение концентрационных и температурных условий образования соединений кремния с гуминовыми веществами и скорости их осаждения в присутствии продуктов термической обработки магнезита (каустического магнезита).

Объекты: природные воды и модельные растворы, содержащие соединения кремния и растворенные гуминовые вещества, каустический магнезит.

Методы: фотоколориметрия, рН-метрия, титриметрия, атомно-эмиссионная спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ICAP-6000).

Результаты. Установлен интервал массовых соотношений растворимых гуминовых веществ и силикатов ГВ: $SiO_3^{2-}=0,8-4$, в котором гуминовые вещества и SiO_3^{2-} -ионы при совместном присутствии в интервале $pH=5...9$ связываются в органо-минеральные комплексы. В природных высокоцветных водах (содержание органических веществ до 30 мгО/л) до 40 % силикат ионов может быть связано в такие комплексы. Размер образующихся коллоидных частиц составил порядка 200 нм, значение ζ -потенциала составило -38 мВ. При использовании каустического магнезита в качестве реагента-осадителя взаимодействие в системе «силикат-гуминовые вещества» протекает в две стадии, определяющие технологическую целесообразность одновременного удаления из воды силикатов и гуминовых веществ.

Ключевые слова:

Природные воды, соединения кремния, органо-минеральные комплексы, размер частиц, очистка воды, каустический магнезит.

Введение

Подземные воды Западной Сибири характеризуются содержанием ионов железа, силикат-ионов и органических веществ гумусового происхождения. Соединения железа и кремния попадают в воду в результате растворения минералов [1], а заболоченность территории способствует обогащению подземных вод гуминовыми веществами. Содержание силикат-ионов в подземных водах варьируется от 10 до 30 мг/л, при нормативном значении 10,0 мг/л [2]. Наличие в воде водорастворимых соединений кремния оказывает негативное влияние по следующим причинам.

Во-первых, избыток силикатов в питьевой воде отрицательно влияет на здоровье людей, провоцируя атеросклеротические процессы в органах и кровеносных сосудах, что влечет за собой инсульты, инфаркты, гипертоническую болезнь и, в конечном итоге, сокращает продолжительность жизни населения северных районов Западной Сибири [3].

Во-вторых, присутствие силикатов серьезно осложняет работу теплоснабжающих предприятий из-за образования в водогрейных трубах силикатной накипи, которая резко снижает тепловую производительность котлов и, как следствие, увеличивает расход топлива котельных. Удаление силикатной накипи по сравнению с очисткой от накипи из солей жесткости дорогой и сложный процесс, вплоть до замены труб, пораженных силикатной накипью [4].

Проблемы, связанные с присутствием силикатов в воде, обусловлены тем, что в настоящее время не существует четкого представления о механизме образования водорастворимых соединений кремния, присутствующих в поверхностных и скважинных водах, что является основным препятствием для нахождения простых и эффективных способов его удаления. Отсутствие знаний о путях образования водорастворимых соединений кремния не позволяет понять структуру этих соедине-

ний и представить их молекулярное строение и, соответственно, их свойства, что осложняет поиск и разработку эффективных способов воздействия.

Одним из способов воздействия, согласно литературным данным [5–10], является изменение рН раствора, приводящее к диссоциации соединений кремния, влияние становится заметным лишь при $\text{pH} > 8$, а присутствие в воде ионов кальция и магния приводит к образованию малорастворимых силикатов, что снижает содержание соединений кремния в растворе. Поэтому основными реагентами для удаления силикат-ионов являются гашеная известь и магнезит, которые, взаимодействуя с кремниевой кислотой, образуют нерастворимые силикаты кальция и магния, соответственно.

Практика показывает, что введение в воду каустического магнезита с температурой до 40°C в количестве 10–15 мг на 1 мг H_2SiO_3 позволяет снизить содержание примесей кремния в растворе до 1–1,5 мг/л. При повышении температуры процесс удаления примесей силикат-ионов протекает более интенсивно. Так, при температуре 96°C остаточное содержание силикат-ионов составляет всего лишь 0,25 мг/л [11].

В литературе нет данных по удалению силикат-ионов в присутствии других компонентов раствора, с которыми он может взаимодействовать в водной среде, например, с гуминовыми веществами.

Цель настоящей работы заключалась в определении концентрационных и температурных условий образования органо-минеральных комплексов силикатов с гуминовыми веществами и их осаждения в присутствии продуктов термической обработки магнезита.

Материалы и методы исследования

В работе рассматривали природные подземные воды Томской области и модельные растворы, содержащие силикат и гумат натрия в концентрациях, близких по содержанию силикат-ионов и растворенных гуминовых веществ к природным водам. Модельные растворы с $\text{pH} = 7,2 \dots 7,5$ готовили по методике, предложенной в [12, 13], путём смешивания растворов органических веществ (концентрацию варьировали в интервале 3,4...100 мг/л), выделенных из торфяных болот Томской области, и метасиликата натрия (в пересчете на кремний 20 мг/л).

Кремний в форме силикат-ионов и кремниевой кислоты определяли с использованием спектрофотометрического метода (фотометр КФК-3, Россия). Методика основана на взаимодействии кремниевой кислоты и силикатов с молибдатом аммония в кислой среде с образованием молибдокремниевой гетерополикислоты желтого цвета с максимумом поглощения при 410 нм [14]. Количественное определение силикат-ионов, связанных с гуминовыми веществами, проводили с использованием экстракции органо-минеральных комплексов хлороформом [15–17]. При этом примеси, связанные с гуминовыми веществами, переходят в ор-

ганическую фазу. Долю силикат-ионов, связанных с гуминовыми веществами, рассчитывали по разности между содержанием кремния в растворе до и после экстракции.

Содержание гуминовых веществ определяли при помощи перманганатометрического титрования и выражали в единицах перманганатной окисляемости (ПО, мгО/л) [18]. Методика основана на окислении органических веществ, присутствующих в анализируемой пробе, перманганатом калия в сернокислой среде при нагревании с последующим добавлением щавелевой кислоты и титрованием её избытка перманганатом.

Определение ионов магния и кальция в воде и растворах проводили путем комплексонометрического титрования, в результате которого образуются окрашенные комплексы определяемых ионов с трилоном Б. Концентрацию ионов Mg^{2+} в растворах определяли по разности значений общей жесткости и концентрации ионов Ca^{2+} .

Водородный показатель (рН) растворов контролировали при помощи рН-метра марки рН-150 МП (Россия) с использованием стеклянного электрода. Характеристики частиц органо-минеральных коллоидов (распределение по размерам, ζ -потенциал) определяли при помощи анализатора Zetasizer Nano ZS (Великобритания). Фильтрацию исследуемых растворов проводили с использованием бумажных фильтров «синяя лента» (диаметр пор 3...5 мкм) и мембран «Millipore» (диаметр пор 400 и 1200 нм).

Результаты и их обсуждение

Влияние соотношения исходных концентраций гумата и силиката натрия на содержание продуктов их взаимодействия – органо-минеральных комплексов – изучали с использованием модельных растворов. Доля SiO_3^{2-} -ионов, образующих органо-минеральные комплексы с ГВ, определяется соотношением ГВ: SiO_3^{2-} и рН раствора. Из результатов анализа модельных растворов различного состава следует (табл. 1), что в интервале рН природной воды 5...9 определяющее значение в связывании ГВ и SiO_3^{2-} представляет их соотношение. В интервале значений ПО растворов 4...10 мгО/л доля связанных SiO_3^{2-} -ионов практически не изменяется и составляет 20...22 % от введенного количества, соотношение связанных компонентов ГВ: SiO_3^{2-} в составе комплексов возрастает от 0,8 до 2,1. Дальнейшее увеличение содержания ГВ в модельных смесях в 8 раз (ПО от 10 до 80 мгО/л) при постоянном начальном содержании SiO_3^{2-} приводит к возрастанию доли связанных SiO_3^{2-} -ионов в два раза (до 40 %). При этом соотношение связанных в органо-минеральные комплексы реагентов ГВ: SiO_3^{2-} достигает 4:1. Дальнейшее увеличение содержания гумата натрия в растворе не приводит к увеличению доли связанных силикат-ионов. Следовательно, до 40 % кремния в природных высокоцветных водах (ПО до 30 мгО/л) может находиться в составе органо-минеральных комплексов.

Таблица 1. Влияние соотношения содержания силикат-ионов и гуминовых веществ в модельных растворах и pH на долю силикат-ионов, связанных в органо-минеральные комплексы

Table 1. Ratio of concentrations of silicate-ions and humic substances in the model solution and concentration of silicate ions combined with the humic substances

| Модельные растворы Model solutions | | | Содержание силикат-ионов в растворе, мг/л Silicon content in a solution, mg/L | | | |
|---------------------------------------|-----------------------------|------|--|--|---|---|
| Si, мг/л mg/L | ПО, мгО/л PO, mg/L | pH | До экстрак- ции хлоро- формом Before ex- traction | После эк- стракции After ex- traction | Связан- ный с ГВ Combined with the HS | Связанный с ГВ, % Combined with the HS, % |
| 20,0 | 0,0 | 7,5 | 21,3 | 20,2 | 1,1 | 5 |
| | 3,4 | 7,7 | 21,7 | 17,4 | 4,3 | 20 |
| | 6,8 | 7,2 | 21,6 | 16,8 | 4,8 | 22 |
| | 10,2 | 7,3 | 22,1 | 17,3 | 4,8 | 22 |
| | 15,0 | 5,3 | 20,2 | 14,9 | 5,3 | 26 |
| | 20,0 | 5,3 | 19,8 | 14,2 | 5,6 | 28 |
| | 30,0 | 5,4 | 21,1 | 15,2 | 5,9 | 28 |
| | 40,0 | 7,4 | 20,9 | 14,8 | 6,1 | 29 |
| | 60,0 | 7,3 | 21,6 | 15,2 | 6,4 | 30 |
| | 80,0 | 7,5 | 22,0 | 12,8 | 9,2 | 42 |
| | 100,0 | 9,2 | 22,0 | 13,5 | 8,5 | 39 |
| 100,0 | 7,5 | 22,3 | 14,1 | 8,2 | 37 | |

Обозначения/Notes: ПО (PO) – перманганатная окисляемость (permanganate oxidizability), ГВ (HS) – гуминовые вещества (humic substances).

Состояние органо-минеральных коллоидных частиц, образующихся в модельных растворах в результате взаимодействия гумата и силиката натрия, исследовали с использованием метода динамического рассеяния света и электрокинетических измерений. В исследуемом диапазоне концентраций ГВ и SiO_3^{2-} происходит образование коллоидных частиц, размеры и зарядовое состояние которых зависит от состава раствора (табл. 2). Увеличение соотношения ГВ: SiO_3^{2-} от 1:1 до 4:1 приводит к увеличению среднего условного диаметра частиц дисперсной фазы в ≈ 3 раза (от 68 до 195 нм). При этом происходит возрастание ζ -потенциала от -50 до -38 мВ. Из сопоставления этих данных с данными табл. 1 следует, что высокое содержание органических веществ в воде в присутствии растворенных силикатов обуславливает образование органо-минеральных дисперсных систем, агрегативная устойчивость которых возрастает при увеличении доли кремния в них.

Таблица 2. Характеристики органо-минеральной дисперсной системы, формирующейся при совместном присутствии гумата и силиката натрия ($C_{\text{Si}}=20$ мг/л) в модельных растворах (pH=7,4)

Table 2. Characteristics of organo-mineral disperse system, which is formed in the joint presence of humate and sodium silicate ($C_{\text{Si}}=20$ mg/L) in model solutions (pH=7,4)

| | | | | |
|---|------|------|------|------|
| Перманганатная окисляемость, мгО/л Permanganate index, mgO/L | 20,0 | 40,0 | 60,0 | 80,0 |
| Средний условный диаметр частиц дисперсной фазы, нм Average particle size of the dispersed phase, nm | 68 | 82 | 167 | 195 |
| ζ -потенциал, мВ ζ -potential, mV | -50 | -48 | -45 | -38 |

При соотношении ГВ: $\text{SiO}_3^{2-} \geq 3$ размеры коллоидных частиц значительно возрастают (табл. 2), что приводит к их коагуляции и снижению содержания кремния в растворе вследствие седиментации. Эффект формирования частиц дисперсной фазы может быть использован при разработке метода очистки высокоцветных природных вод от силикат-ионов.

Известно, что обескремнивание воды с применением реагентных методов очистки проводят в щелочной среде при $\text{pH} \geq 10$ [8]. С учетом этого необходимо определить устойчивость органо-минеральных комплексов кремния в данной области pH. Щелочную среду в модельных растворах создавали путем введения различных реагентов (табл. 3). Из результатов анализа полученных растворов следует, что в щелочной среде комплексы ГВ с SiO_3^{2-} неустойчивы, долей связанного с ГВ силикат-ионов можно пренебречь. Важным фактом является то, что присутствие ГВ в растворах не оказывает существенного влияния на осаждение дисперсной фазы с использованием соединений кальция и магния: снижение содержания силикат-ионов в растворе достигается за счет образования малорастворимых силикатов кальция и магния.

Таблица 3. Содержание силикат-ионов в модельных системах при pH=10 ($C_{\text{Si}}=20$ мг/л; ПО=20 мг/л; нагревание при 90 °C в течение 10 мин)

Table 3. Content of dissolved forms of silicon in model systems at pH=10 ($C_{\text{Si}}=20$ mg/L; PO=20 mg/L; heated at 90 °C for 10 min)

| Введенный реагент, 20 мг/л Introduced reagent, 20 mg/L | Содержание кремния, мг/л Silicon content, mg/L | |
|---|---|--------------------------------|
| | В отсутствие ГВ With HS | В присутствии ГВ Without HS |
| NaOH | 19,9 | 19,9 |
| Na_2CO_3 | 19,9 | 19,9 |
| $\text{Ca}(\text{OH})_2$ | 13,8 | 14,8 |
| MgO | 9,5 | 10,2 |

Обозначения/Notes: ПО (PO) – перманганатная окисляемость (permanganate oxidizability), ГВ (HS) – гуминовые вещества (humic substances)

Для определения термодинамически устойчивых форм нерастворимых продуктов взаимодействия силикат-ионов с щелочными реагентами, образующихся в исследуемых системах (табл. 3), проведено моделирование кислотно-основных равновесий. Расчеты проведены с использованием программы «MINTEQ» [19], результаты представлены в виде диаграмм зависимости логарифма содержания растворимых и нерастворимых форм элементов от pH (рис. 1).

Анализ полученных диаграмм показал, что при совместном присутствии 0,001 М силикат-ионов и катионов магния или кальция в широких интервалах концентраций и pH формируются устойчивые в среде растворов фазы, растворимость которых существенно ниже, чем растворимость кремниевой кислоты и соответствующих карбонатов (рис. 1):

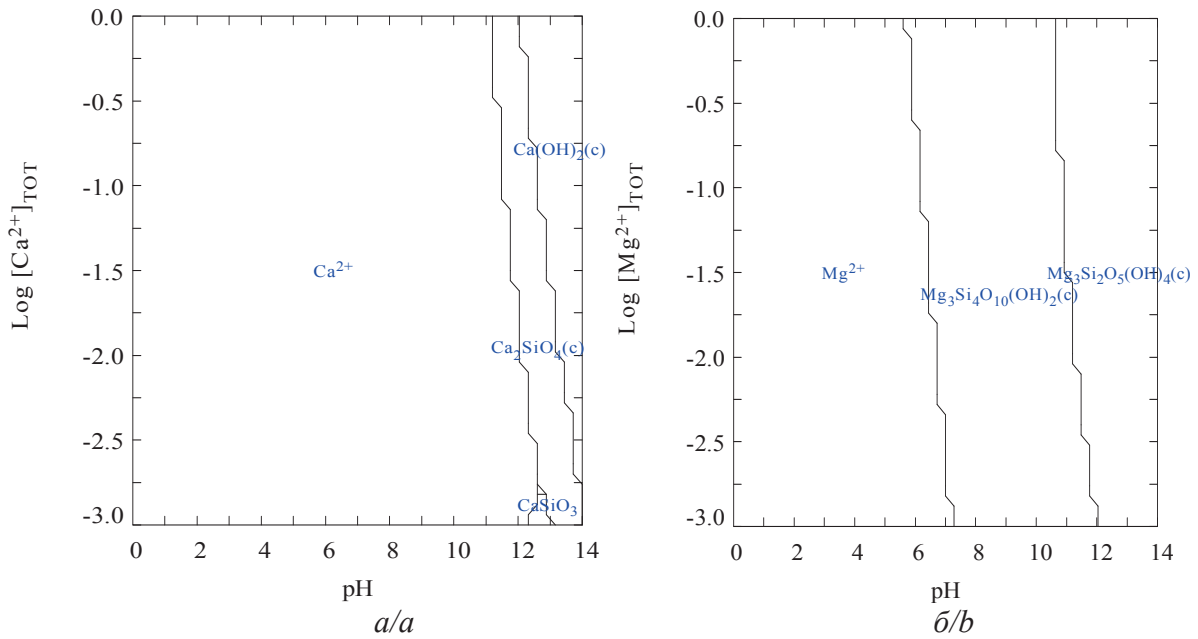
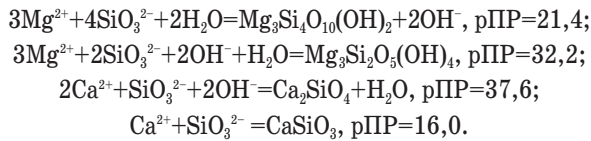


Рис. 1. Расчётные диаграммы устойчивости равновесных форм в системах Ca^{2+} - SiO_3^{2-} - H_2O (а) и Mg^{2+} - SiO_3^{2-} - H_2O (б) в зависимости от pH ($C_0(\text{SiO}_3^{2-})=0,001 \text{ M}$; $t=25^\circ\text{C}$)

Fig. 1. Calculated diagrams of stability of equilibrium forms in the systems Ca^{2+} - SiO_3^{2-} - H_2O (a) и Mg^{2+} - SiO_3^{2-} - H_2O (b) depending on pH ($C_0(\text{SiO}_3^{2-})=0,001 \text{ M}$; $t=25^\circ\text{C}$)



Приведённые выше магниесодержащие малорастворимые соединения широко распространены в земной коре в виде минералов со слоистой структурой (хризотилы $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, тальк $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$). В отличие от основных полисиликатов магния, си-

ликаты кальция (мета- и орто-силикат) устойчивы в сильнощелочной среде, а в нейтральных растворах быстро гидролизуются. В соответствии с диаграммами состав соединений магния определяется pH раствора в большей степени, чем соотношением концентраций исходных реагентов. При этом в интервале $\text{pH}=7\text{...}11$ формируется малорастворимый продукт с большей долей силикат-ионов, чем в сильнощелочной среде (рис. 1). Следовательно,

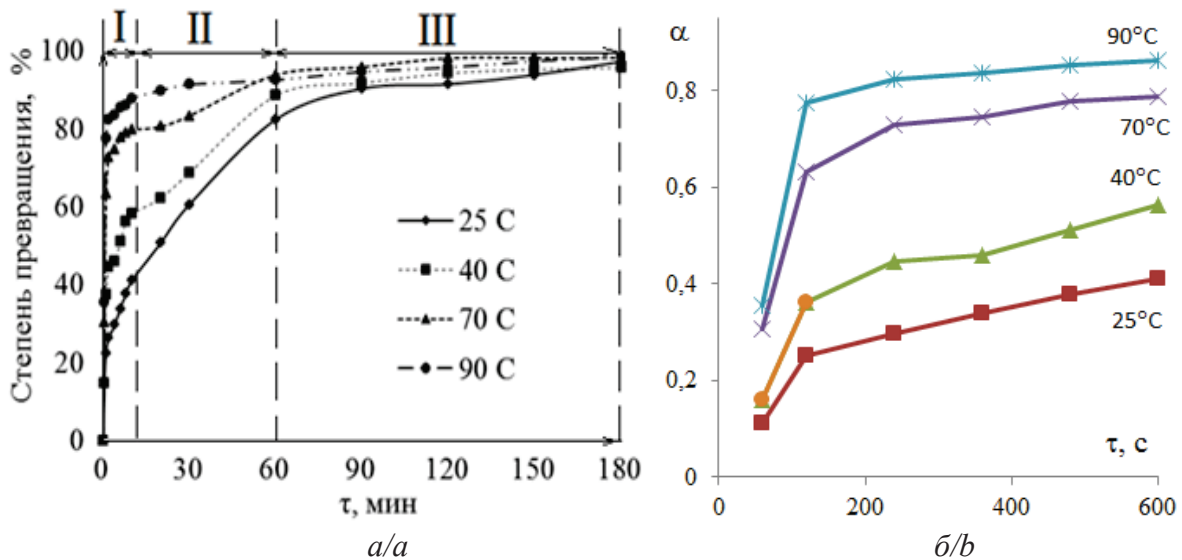


Рис. 2. Зависимость степени превращения SiO_3^{2-} -ионов от времени взаимодействия с частицами каустического магнезита при различных температурах

Fig. 2. Dependence of the degree of transformation of SiO_3^{2-} ions on the time of interaction with particles of caustic magnesite at various temperatures

создание слабощелочной среды при магниезальном обескремнивании воды позволит более эффективно использовать реагент-осадитель и достигать больших степеней очистки от силикат-ионов, чем при $\text{pH} > 11$.

Влияние присутствия в системе гуминовых веществ на скорость взаимодействия силикат-ионов с каустическим магнезитом изучали в интервале 25...90 °С. Реакция между частицами взвеси MgO и SiO_3^{2-} -ионами является гетерогенной и протекает на поверхности частиц каустического магнезита с образованием слоя нерастворимых продуктов. На рис. 2 приведены зависимости степени превращения от времени протекания реакции, рассчитанные по значениям текущих концентраций силикат-ионов в реакционной смеси при различных температурах.

Удаления силикат-ионов из реакционной смеси в зависимости от продолжительности взаимодействия протекает в три этапа (рис. 2, а):

- I – активное протекание реакции (10 мин);
- II – замедление реакции (10...60 мин);
- III – окончание реакции (более 60 мин).

Из анализа начальных участков зависимостей $\alpha = f(\tau)$ (рис. 2, б) следует, что скорость взаимодействия силикат-ионов с оксидом магния с течением времени изменяется немонотонно. При продолжительности взаимодействия ≈ 120 с степень превращения возрастает скачкообразно во всем интервале температур, далее изменение величины α протекает медленно. Максимальное снижение концентрации SiO_3^{2-} -ионов в растворе в начальный период происходит при нагревании ($t \geq 70$ °С), при более низких температурах значения $\alpha < 50$ %. Анализ зависимостей в логарифмических координатах $\ln \alpha = f(\lg \tau)$ показал, что скорость реакции по SiO_3^{2-} -ионам при продолжительности процесса $\tau \leq 120$ с удовлетворительно описывается уравнением 1-го порядка:

$$\alpha = 1 - \exp(-k_{\text{эф}} \tau),$$

где α – степень превращения; $k_{\text{эф}}$ – эффективная константа скорости; τ – время. Путем линеаризации экспериментальных данных в координатах $\ln [1/(1-\alpha)] = f(\tau)$ для начальных участков зависимостей степени превращения от времени при $\tau \leq 120$ с были определены эффективные значения константы скорости реакции при различных температурах (табл. 4).

Таблица 4. Эффективные константы скорости взаимодействия силикат-ионов с частицами каустического магнезита на начальной стадии ($\tau \leq 120$ с) при различных температурах

Table 4. Effective rate constants of interaction of silicate ions with particles of caustic magnesite at the initial stage ($\tau \leq 120$ s) at various temperatures

| $t, ^\circ\text{C}$ | $1/T, \text{K}^{-1}$ | $k_{\text{эф}}, \text{c}^{-1}$ | $\ln k_{\text{эф}}$ |
|---------------------|----------------------|--------------------------------|---------------------|
| 25 | 0,00336 | 0,0030 | -5,8091 |
| 40 | 0,00319 | 0,0045 | -5,4037 |
| 70 | 0,00292 | 0,0106 | -4,5469 |
| 90 | 0,00275 | 0,0175 | -4,0456 |

При увеличении продолжительности взаимодействия $\tau > 120$ с порядок реакции по SiO_3^{2-} -ионам существенно снижается до 0,1...0,3. При этом степени превращения выходят на насыщение (рис. 2, б).

Из полученных данных следует, что реакционная поверхность частиц каустического магнезита быстро блокируется слоем нерастворимых силикатов магния, который играет роль диффузионного барьера и приводит к снижению скорости удаления кремния из раствора в течение II и III периодов протекания реакции (рис. 2, а).

Эффективную энергию активации E_a процесса на начальной стадии ($\tau \leq 120$ с) определяли графически по зависимостям логарифма эффективной константы скорости уменьшения концентрации SiO_3^{2-} -ионов от обратной температуры (табл. 4). График зависимости $\ln k_{\text{эф}} = f(1/T)$ является линейным в исследуемом интервале температур, среднее значение E_a составляет 26 кДж/моль. Следовательно, в начальный период взаимодействие силикат-ионов с поверхностью частиц каустического магнезита протекает быстро, замедленной стадией является диффузия реагентов к реакционной поверхности. В результате реакции образуются нерастворимые силикаты магния, слой которых блокирует поверхность частиц каустического магнезита и замедляет процесс. Существенное возрастание величины α для 1-го и 2-го периодов процесса при нагревании происходит в связи с повышением растворимости MgO в этих условиях [20], что приводит к повышению концентрации ионов магния в приповерхностном слое частиц каустического магнезита и возрастанию скорости взаимодействия с силикат-ионами.

Выводы

1. С использованием модельных растворов, содержащих силикат и гумат натрия в концентрациях, близких к содержанию ионов кремния и гуминовых веществ в природных водах, определен интервал соотношений (мг/л) ГВ: $\text{SiO}_3^{2-} = 0,8...4$, в котором ГВ и SiO_3^{2-} -ионы при совместном присутствии в интервале $\text{pH} = 5...9$ связываются в органо-минеральные комплексы. Показано, что в природных высокоцветных водах (величина ПО до 30 мгО/л) до 40 % силикат-ионов входит в состав таких комплексов, что вызывает сложности в процессах водоподготовки.
2. Кремнийсодержащие органо-минеральные комплексы в воде и растворах способствуют формированию дисперсной фазы, размеры и заряд частиц которой определяется соотношением ГВ: SiO_3^{2-} . Увеличение этого соотношения в интервале 1...4 при $\text{pH} \approx 7$ обуславливает увеличение среднего условного диаметра коллоидных частиц от 68 до 195 нм и возрастание ζ -потенциала от -50 до -38 мВ, что выражается в снижении агрегативной устойчивости такой дисперсной системы.

3. По результатам моделирования кислотно-основных равновесий в системах $\text{Ca}^{2+}-\text{SiO}_3^{2-}-\text{H}_2\text{O}$ и $\text{Mg}^{2+}-\text{SiO}_3^{2-}-\text{H}_2\text{O}$ показано, что наименее растворимыми термодинамически устойчивыми фазами в области $\text{pH}>7$ являются основные полисиликаты магния $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ и $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$. В отличие от них, малорастворимые мета- и ортосиликаты кальция образуются в сильнощелочной среде ($\text{pH}>12$).
4. По результатам изучения скорости взаимодействия частиц каустического магнезита с сили-

кат-ионами в перемешиваемой суспензии в присутствии ГВ показано, что начальные участки зависимостей степени превращения от времени ($\tau \leq 120$ с) описываются уравнением 1-го порядка, определены эффективные константы скорости реакции. Для интервала температур 25...90 °С определена эффективная энергия активации, равная 26 кДж/моль, что свидетельствует о диффузионном контроле процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Iron oxidation in different types of groundwater of Western Siberia / L.V. Serikov, E.A. Tropina, L.N. Shiyan, F.H. Frimmel, G. Metreveli, M. Delay // Journal for Soils and Sediments. – 2009. – № 2. – P. 103–110.
2. Konchakova N.V., Ushakova N.S., Aikina T.Yu. Ecological risk assessment of Tomsk region groundwater used for drinking purposes // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – V. 33. – P. 012022(1–6).
3. Colloid Stability of Iron Compounds in Groundwater of Western Siberia / L.N. Shiyan, E.A. Tropina, K.I. Machekhina, E.N. Gryaznova, V.V. An. – 2014. – V. 3:260. DOI: 10.1186/2193–1801–3–260, <http://www.springerplus.com/content/3/1/260>.
4. Санитарные правила и нормы СанПиН 2.1.4.1074–01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем водоснабжения. Контроль качества. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. – М.: Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России, 2002. – 103 с.
5. Стерман Л.С., Покровский В.Н. Физические и химические методы обработки воды на ТЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 328 с.
6. Chan S.H. A review on solubility and polymerization of silica // Geothermics. – 1989. – V. 18. – № 1/2. – P. 49–56.
7. Исследование интенсифицированной коагуляционной очистки воды с использованием микропеска / Б.Е. Рябчиков, С.Ю. Ларионов, А.А. Пантелеев, М.М. Шилов // Водоснабжение и санитарная техника. – 2015. – № 5. – С. 14–21.
8. Жадан А.В. Совершенствование технологии обработки воды на ТЭС на базе ионного обмена и мембранных методов: дис... канд. тех. наук. – Иваново, 2013. – 193 с.
9. Raschman P., Fedorocková A. Study of Inhibiting Effect of Acid Concentration on the Dissolution Rate of Magnesium Oxide during the Leaching of Dead-burned Magnesite // Hydrometallurgy. – 2004. – V. 71. – P. 403–412.
10. Den W., Wang C.-J. Removal of silica from brackish water by electrocoagulation pretreatment to prevent fouling of reverse osmosis membranes // Separation and Purification Technology. – 2008. – V. 59. – № 1.3. – P. 318–325.
11. Семенова И.В., Тимофеев М.В., Хорошилов А.В. Изучение состава и структуры осадков, образующихся при обработке воды щелочью и щелочным реагентом Гидро-Икс (HYDRO-X) // Энергосбережение и водоподготовка. – 2003. – № 4. – С. 25–28.
12. Способ приготовления модельного коллоидного раствора: пат. Рос. Федерация № 2502556, заявл. 12.07.2012, опубл. 27.12.2013, Бюл. № 11. – 5 с.
13. ГОСТ 6709–72. Вода дистиллированная. Технические условия. – Взамен ГОСТ 6709–53; Введ. 01.01.74. – М.: Изд-во стандартов, 1997. – 7 с.
14. РД 52.24.433–2005. Массовая концентрация кремния в поверхностных водах суши. Методика выполнения измерений фотометрическим методом в виде желтой формы молибдокремниевой кислоты. Введ. 01.07.2005. – М.: Росгидромет, 2005. – 28 с.
15. Барс Е.А., Коган С.С. Методическое руководство по исследованию органических веществ подземных вод нефтегазоносных областей. – М.: Недра, 1979. – 156 с.
16. Humic acid desorption from a positively charged nanocellulose surface / H. Sehaqui, L. Schaufelberger, B. Michen, T. Zimmermann // J. Coll. Int. Sci. – 2017. – № 504. – P. 500–506.
17. Способ определения концентрации кремния в воде: пат. Рос. Федерация № 2656121, заявл. 10.01.2017, опубл. 31.05.2018, Бюл. № 16. – 3 с.
18. ГОСТ Р 55684–2013. Вода питьевая. Метод определения перманганатной окисляемости. Введ. 31.10.2013. – М.: Стандартинформ, 2014. – 27 с.
19. Felmy A., Girvin D., Jenne E. MINTEQA: A computer program for calculating aqueous geochemical equilibria. – Washington: US Environmental Protection Agency, 1984. – 98 p.
20. Рабинович В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник. – Л.: Химия, 1991. – 432 с.

Поступила 15.01.2019 г.

Информация об авторах

Костикова Л.А., инженер-проектировщик Центра коллективного пользования «Физико-химические методы анализа» Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Шилян Л.Н., кандидат физико-математических наук, доцент отделения естественных наук Школы базовой инженерной подготовки Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Мачехина К.И., кандидат технических наук, доцент отделения естественных наук Школы базовой инженерной подготовки Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Коршунов А.В., доктор химических наук, профессор отделения естественных наук Школы базовой инженерной подготовки Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 544.77, 542.06

CONDITIONS OF COMBINED SEDIMENTATION OF SILICON AND HUMIC SUBSTANCES FROM NATURAL WATERS IN THE PRESENCE OF CAUSTIC MAGNESITE

Larisa A. Kostikova¹,
lak@tpu.ru

Lyudmila N. Shiyan¹,
shln@tpu.ru

Ksenia I. Machekhina¹,
mauthksu@yandex.ru

Andrey V. Korshunov¹,
korshunov@tpu.ru

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

The relevance. Ground sources of drinking water supply in the West Siberian region are characterized by high content of iron ions, silicate ions and organic substances of humus origin. These impurities lead to formation of a stable colloidal system. When using water as a cooler and in heating systems, silicate deposits are formed on the surface of the pipes, due to the ability of silicic acid to form insoluble compounds with calcium and magnesium cations, as well as with aluminum, iron and sodium cations. The combined presence of silicates and organic impurities reduces the effectiveness of existing water purification technologies.

The aim of the research is to study the conditions of formation of silicon compounds with humic substances and the kinetics of interaction with caustic magnesite.

Objects of research are natural waters and model solutions containing silicon compounds and dissolved humic substances, natural caustic magnesite.

Methods: photocolorimeter, pH-meter, titrometry, inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICAP-6000).

Results. The authors have established the concentration ratio of silicate ions/humic substances in which colloidal particles are formed at concentrations of silicate ions 20 mg/L and humic substances 80 mg/L at pH=5..9. The size of the resulting colloidal particles is 200 nm, and the value of ζ -potential is -38 mV. It is shown that in the range of pH values from 7,0 to 10 the colloidal compounds are stable. When using caustic magnesite as a precipitant reagent, the interaction in the «silicate–humic substances» system proceeds in two stages, which determine the technological feasibility of simultaneous removal of silicates and humic substances from water.

Key words:

Natural water, silicon compounds, organic-mineral substances, particle size, water purification, caustic magnesite.

REFERENCES

- Serikov L.V., Tropina E.A., Shiyan L.N., Frimmel F.H., Metreveli G., Delay M., Iron oxidation in different types of groundwater of Western Siberia. *Journal for Soils and Sediments*, 2009, no. 2, pp. 103–110.
- Konchakova N.V., Ushakova N.S., Aikina T.Yu. Ecological risk assessment of Tomsk region groundwater used for drinking purposes. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 33, pp. 012022 (1–6).
- Shiyan L.N., Tropina E.A., Machekhina K.I., Gryaznova E.N., An V.V. *Colloid Stability of Iron Compounds in Groundwater of Western Siberia*. 2014, vol. 3. DOI: 10.1186/2193–1801–3–260, <http://www.springerplus.com/content/3/1/260>.
- Sanitarnie pravila i normy SanPin 2.1.4.1074–01. Pitievaya voda. Gigienicheskiye trebovaniya k kachestvu vodi tsentralizovannykh sistem vodosnabzheniya. Kontrol kachestva. Sanitarno-epidemiologicheskie pravila i normativy* [Sanitary rules and regulations SanPiN 2.1.4.1074–01. Drinking water. Hygienic requirements for water quality of centralized water supply systems. Quality control. The sanitary and epidemiological rules and norms]. Moscow, Federal Centre for Sanitary Inspection Ministry of Health of Russia, 2002. 103 p.
- Sterman L.S., Pokrovskiy V.N. *Fizicheskie i khimicheskie metody obrabotki vody na TES* [Physical and chemical methods of water treatment at TPPs]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 328 p.
- Chan S.H. A review on solubility and polymerization of silica. *Geothermics*, 1989, vol. 18, no. 1/2, pp. 49–56.
- Ryabchikov B.E., Larionov S.Yu., Pantelev A.A., Shilov M.M. *Issledovanie intensifitsirovannoy koagulyatsionnoy ochistki vody s ispolzovaniem mikropeska* [Investigation of intensified coagulation water purification using microsand]. *Water supply and sanitary equipment*, 2015, no. 5, pp. 14?21.
- Zhadan A.V. *Sovershenstvovanie tekhnologii obrabotki vody na TES na baze ionnogo obmena i membrannykh metodov*. Dis. Kand. nauk [Improvement of water treatment technology at TPPs based on ion exchange and membrane methods. Cand. Diss.]. Ivanovo, 2013. 193 p.
- Raschman P.I., Fedorocková A. Study of Inhibiting Effect of Acid Concentration on the Dissolution Rate of Magnesium Oxide during the Leaching of Dead-burned Magnesite. *Hydrometallurgy*, 2004, vol. 71, pp. 403–412.
- Den W., Wang C.-J. Removal of silica from brackish water by electrocoagulation pretreatment to prevent fouling of reverse osmosis membranes. *Separation and Purification Technology*, vol. 59, pp. 318–325.
- Semenova I.V., Timofeev M.V., Khoroshilov A.V. *Izuchenie sostava i struktury osadkov obrazuyushchikhsya pri obrabotke vody shchelochyu i shchelochnym reagentom gidro iks (HYDRO-X)* [Study of composition and structure of sediments formed during water treatment with alkali and with the alkaline reagent Hydro-X]. *Energy Saving and Water Treatment*, 2003, no. 4, pp. 25–28.

12. Shiyani L.N., Tropina E.A., Machekhina K.I., Grayznova E.N., Vlasov V.A. *Sposob prigotovleniya modelnogo kolloidnogo rastvora* [A method of preparation of the model colloidal solution]. Patent RF, no. 2502556, 2013.
13. *GOST 6709–72. Voda distillirovannaya. Tekhnicheskie usloviya. Vzamen GOST 6409–53; Vved. 01.01.74* [State Standard 6709–72. Distilled water. Technical conditions. Instead of the State Standard 6709–53; Introduced 01.01.74]. Moscow, Publ. House of Standards, 1997. 7 p.
14. *Rukovodyashchii dokument 52.24.433–2005. Massovaya kontsentratsiya kremniya v poverkhnostnykh vodakh sushi. Metodika vypolneniya izmereniy fotometricheskim metodom v vide zheltoy formy molibdokremniyevoiy kisloty. Vved. 01.07.2005* [Management directive 52.24.433–2005. Mass concentration of silicon in surface natural waters. A methodical aid for photometric measurements in the yellow form of molybdosilicic acid. Introduced 01.07.2005]. Moscow, Rosgidromet Publ., 2005. 28 p.
15. Bars E.A., Kogan S.S. *Metodicheskoe rukovodstvo po issledovaniyu organicheskikh veshchestv podzemnykh vod neftegazonosnykh oblastey* [Methodological guide to the study of organic matter in groundwater oil and gas regions]. Moscow, Nedra Publ., 1979. 156 p.
16. Sehaqui H., Schaufelberger L., Michen B., Zimmermann T. Humic acid desorption from a positively charged nanocellulose surface. *J. Coll. Int. Sci.*, 2017, no. 504, pp. 500–506.
17. Shiyani L.N., Machekhina K.I., Kostikova L.A. *Sposob opredeleniya koncentracii kremniya v vode* [A method for determination of silicon concentration in water]. Patent RF, no. 2656121, 2018.
18. *GOST R 55684–2013. Voda pitievaya. Metod opredeleniya permanganatnoy oksilyayemosti. Vved. 31.10.2013* [State Standard R 55684–2013. Drinking water. Methods of determination of permanganate oxidizability. Introduced 31.10.2013]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 27 p.
19. Felmy A., Girvin D., Jenne E. *MINTEQ: a computer program for calculating aqueous geochemical equilibria*. Washington, US Environmental Protection Agency, 1984. 98 p.
20. Rabinovich V.A., Khavin Z.I. *Kratkiy khimicheskii spravochnik* [Brief Chemical Reference]. Leningrad, Khimiya Publ., 1991. 432 p.

Received: 15 January 2019.

Information about the authors

Larisa A. Kostikova, engineer-designer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Lyudmila N. Shiyani, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Ksenia I. Machekhina, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Andrey V. Korshunov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 621.31:620.91

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ И ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МИКРОМОЩНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Хомутов Станислав Олегович¹,
homutov.so@yandex.ru

Полищук Владимир Иосифович¹,
polischuk_vi@mail.ru

Сташко Василий Иванович¹,
altgtu@mail.ru

¹ Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
Россия, 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46.

Актуальность. Изменения геополитики и конъюнктуры мировых энергетических рынков всё больше и больше оказывают влияние на мировую экономику, вынуждая не только совершенствовать энергетические технологии, но и определять приоритеты государства в области энергетической политики. Такими приоритетами являются увеличение генерации от новых видов возобновляемых источников энергии и быстрое развитие соответствующих технологий, которые, в свою очередь, обеспечивают удешевление производства. Вместе с этим известно, что повысить надежность энергосистемы и одновременно увеличить производство электроэнергии можно за счет распределённой энергетики, основой которой является, в том числе, и микрогенерация от солнечных электростанций. В этой связи необходимы дополнительные исследования по адаптации существующих методик расчета фотоэлектрических систем к их использованию при разработке и построении маломощных солнечных электростанций. Актуальность обусловлена еще и тем, что необходимо создать максимально эффективную и недорогую систему преобразования солнечной энергии в электрическую, которая бы соответствовала любым заданным техническим требованиям, была надежной и простой в эксплуатации.

Цель: разработать эффективную фотоэлектрическую систему и создать недорогую микромощную солнечную электростанцию с заранее заданными параметрами и техническими характеристиками для дальнейших экспериментальных исследований.

Методы. При выполнении расчетов и исследовании основных режимов работы и элементов конструкции фотоэлектрических систем использовались результаты многочисленных научных исследований, в том числе и прикладных, и имеющийся на сегодняшний день опыт в области солнечной энергетики, который был получен при выполнении некоторых теоретических и экспериментальных работ. При разработке и моделировании электронных схем использовались многофункциональные системы DTP-Trace и EasyEDA.

Результаты. Обоснована целесообразность применения более простых методик определения вероятной или фактической инсоляции с использованием программного обеспечения PVsyst, и погрешностью расчетов за один год не более 10 %. Разработаны: 1) технология для экспериментального производства фотоэлектрических модулей заданных геометрических размеров и номинальной мощности; 2) надежная за счет актуаторов система управления двухосным солнечным трекером, повышающая эффективность фотоэлектрических систем в широтах Западной и Юго-Западной Сибири; 3) структурная схема управления микромощной солнечной электростанцией; 4) электронные схемы солнечного контроллера MPPT, преобразователя DC-DC, инвертора DC-AC и главного управляющего блока на основе микроконтроллера ATmega326.

Ключевые слова:

Возобновляемые источники энергии, солнечные электростанции, автономная система электропитания, фотоэлектрический модуль, фотоэлемент, солнечный контроллер, трекер, актуатор.

Введение

Начавшиеся в первом десятилетии 2000-х гг. изменения в структуре использования энергетических ресурсов и рост производства электроэнергии от возобновляемых источников энергии (ВИЭ) убедительно подтверждают тот факт, что мировая энергетика находится на пороге глобальных изменений. Необратимость перехода к следующему технологическому укладу обусловлена еще и тем, что одновременно с нарастающим износом основных фондов в энергетической отрасли динамично развиваются ресурсы распределённой энергетики, спрос на энергию растет, а модель поведения потребителей постепенно начинает изменяться [1].

По мнению экспертов, в ближайшие 3–5 лет передовые энергетические и информационные тех-

нологии, в результате конвергенции, будут полностью доминировать на рынках энергетического оборудования, инжиниринга, программных и прочих технических систем. В перспективе это позволит не только решить проблемы развития и эффективности функционирования отечественной энергетики, но и обеспечить национальную безопасность в этой сфере.

Анализ состояния и динамики развития существующих новых и перспективных энергетических технологий позволяет сделать вывод о том, что наиболее динамично в последние годы развивается солнечная энергетика [2, 3].

Согласно данным Международного агентства по возобновляемой энергии (IRENA), солнечная энергетика продемонстрировала впечатляющую

динамику развития, увеличив производство электроэнергии за 2008–2017 гг. в 25,7 раза [4]. Снижаются цены на оборудование для солнечных электростанций (СЭС), что ведет к снижению стоимости электроэнергии, которая уже к 2025 г., согласно ожиданиям IRENA, подешевеет на 57 % [5].

Дальнейшее экстенсивное наращивание традиционных генерирующих мощностей и электросетевой инфраструктуры не в лучшую сторону влияет на надежность всей энергосистемы, ведёт к росту потерь и увеличению эксплуатационных расходов. Качество электроэнергии в существующих централизованных системах электроснабжения также оказывает влияние на состояние электрооборудования, снижая его срок службы, что требует коррекции параметров надежности основных элементов системы электроснабжения [6].

В электроэнергетике существует множество самых разноплановых проблем, решить которые можно, в том числе, с помощью создания систем распределённой энергетики, основой которой являются ВИЭ. Этот процесс идет в настоящее время, но его темпы пока еще недостаточно высоки, так как имеющаяся энергосистема изначально создавалась как централизованная.

Для повышения темпов интеграции ВИЭ с существующей энергосистемой необходимо решить ряд технических задач, главная из которых заключается в непостоянстве выработки энергии и необходимости её накопления. Решить данную проблему можно путем объединения источников энергии в интеллектуальную систему – Smart Energy System, позволяющую накапливать и хранить не только электрическую, но и тепловую энергию, что гораздо дешевле и более эффективно [7, 8]. Безусловно, такой вариант развития электроэнергетики может иметь место, но создание Smart Energy System, кроме всего прочего, потребует, во-первых, немалых временных затрат, а во-вторых, она не может быть создана без достаточно развитой распределённой микрогенерации и так называемых MicroGrid – малых локальных сетей.

Таким образом, одним из наиболее оптимальных решений с целью более динамичного развития распределённой энергетики является разработка и внедрение электростанций небольшой мощности, в данном случае – микромощных СЭС. Причем независимо от мощности СЭС должна иметь устройство сопряжения с внешней сетью. Это позволит повысить эффективность микрогенерации, за счет использования MicroGrid как накопитель бесконечной емкости, мгновенно реагируя на спрос на электроэнергию из внешней сети или необходимость увеличения потребления собственной системой электроснабжения. Основные преимущества такой модели распределённой генерации заключаются в том, что она оказывает позитивное влияние на режимы работы электрических сетей с экономической точки зрения и значительно сокращает эксплуатационные затраты [9].

Анализ состояния рынка энергоустановок, которые работают на основе использования ВИЭ и могут быть использованы в качестве объектов распределённой мини- и микрогенерации [10], показывает, что солнечные электростанции небольшой мощности получают всё большее распространение.

Вместе с тем, несмотря на то, что распределённой энергетике и совершенствованию солнечных систем небольшой мощности в России уделяется достаточно большое внимание, массового распространения, как это происходит в других странах, эти технологии еще не получили.

Целью исследования является разработка эффективной и недорогой микромощной СЭС на основе использования имеющегося на сегодняшний день опыта в этой области, полученного при выполнении ряда теоретических и экспериментальных работ. Данные исследования носят прикладной характер и предполагают при создании экспериментальной установки использование только доступных средств разработки и технологий, недорогих комплектующих, электронных компонентов и материалов.

Определение вероятной и фактической инсоляции

Как правило, создание любых систем, использующих солнечную энергию, всегда начинается с определения вероятной или фактической инсоляции, определения эффективности СЭС для конкретных географических условий. В последние годы в сообществе ученых существуют различные, порой прямо противоположные, мнения по поводу рентабельности (ERoEI – Energy Return on Energy Invested) СЭС, размещаемых в регионах с умеренной инсоляцией [11–13]. Так как территория России в основном находится в географических широтах с умеренной и пониженной инсоляцией, то при расчетах поступающей солнечной энергии определяющими являются метеорологические условия и положение Солнца над горизонтом, которое изменяется в достаточно широких пределах в зависимости от времени года. Поэтому расчет инсоляции требует особого внимания, так как даже малейшие ошибки на данном этапе проектирования могут негативно отразиться на конечном результате, резко понизив эффективность СЭС или увеличив расходы на её строительство.

Одна из основных проблем точного определения зависимости энергетических характеристик фотоэлектрических преобразователей (ФП) от уровня солнечного излучения заключается в том, что основные, оказывающие воздействующие на ФП факторы имеют стохастическую природу. Но зависимость характеристик ФП от внешних факторов, как и их нелинейность и другие особенности, давно изучены и широко используются в исследовательских и практических работах. При этом математическое моделирование солнечных систем выполняется с использованием специального программного обеспечения и баз данных, учитывающих реальную инсоляцию на конкретной

территории. Например, это могут быть базы данных NASA SSE или многолетние массивы данных метеостанций [13, 14]. Особо следует отметить имитационное моделирование, позволяющее с достаточной высокой точностью рассчитать значение солнечной радиации для любого местоположения СЭС и на любой день года. Таким образом, появляется возможность согласовать суточные объемы производства и потребления электроэнергии для конкретных реальных условий эксплуатации [15]. Вместе с тем для расчета параметров солнечных систем небольшой мощности объем вычислений и расчетов целесообразно максимально ограничивать. Например, судя по результатам применения более простых методик [16] с использованием программного обеспечения PVsyst, погрешность расчетов за период в один год может составлять максимум 10 %.

Таким образом, согласно методике оценки энергии солнечного излучения [17], рассчитаем полученную ФП за один месяц энергию W по формуле:

$$W = nW_{24}. \quad (1)$$

В формуле (1) W_{24} – суммарная энергия за характерные сутки месяца; n – количество дней в месяце. Суммарная суточная энергия W_{24} определяется следующим выражением:

$$W = \sum_{i=0}^{23} P_i. \quad (2)$$

В выражении (2) P_i – инсоляция каждого i -го часа характерных суток, которая вычисляется по формуле (3):

$$P_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n P_{ij}, \quad (3)$$

где P_{ij} – почасовая мощность инсоляции каждого j -го дня месяца.

Использование заложенных в PVsyst статистических данных позволяет быстро рассчитать значение инсоляции ($\text{Вт}/\text{м}^2$), т. е. поступающую на поверхность ФП за сутки энергию, и построить годовой график выработки электроэнергии ($\text{кВт}\cdot\text{ч}$) по месяцам.

Расчет мощности фотоэлектрического модуля

Выбор мощности СЭС – это следующий важный этап исследований. В нашем случае для микрогенерации мощность может находиться в диапазоне 0,01–15 кВт, а при разработке экспериментальной установки она была выбрана в пределах 50–60 Вт.

Фактически все исследователи при разработке или испытаниях различных систем преобразования солнечной энергии в электрическую используют готовые промышленные солнечные панели. Это оправдано тем, что любые имеющие практическую ценность исследования, результаты которых в ближайшей перспективе могут получить широкое распространение, нецелесообразно проводить с использованием в конструкции экспериментальной

установки уникальных и дорогостоящих компонентов, комплектующих, материалов и т. д. Однако, если изготовление фотоэлектрических элементов – это сложный и регламентированный процесс, доступный только для крупных промышленных производств, то изготовление экспериментального фотоэлектрического модуля (ФМ) из готовых фотоэлементов вполне возможно в обычных лабораторных условиях.

В этой связи ниже приводится технология изготовления ФМ, которая может быть полезной не только для тех, кто занимается исследованиями, но и для предпринимателей или представителей бизнеса, пожелавших освоить на своих предприятиях выпуск новой высокотехнологичной продукции.

Мощность создаваемого ФМ будет зависеть от двух главных параметров: площади активной поверхности и КПД фотоэлементов, из которой она состоит. Сегодня наибольшее распространение получили фотоэлементы, изготовленные на основе моно- и поликристаллического кремния, которые способны генерировать напряжение около 0,5 В. Соответственно, ток и мощность фотоэлементов определяется их геометрическими размерами и особенностью технологии изготовления, например, числом токопроводящих шин ВВ (bus bar). Основные параметры и характеристики некоторых фотоэлементов, представлены в таблице.

Таблица. Характеристики фотоэлементов

Table. Characteristics of solar cells

| Исходный материал, кремний Source material, silicon | Размеры, мм Dimensions, mm | Число ВВ Number of bus bar | Ток, А Electric current, A | Мощность, Вт Power, W | КПД, % Efficiency, % |
|--|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Монокристаллический Monocrystalline | 156×156 | 4 | 9,6 | 4,8 | 19,4 |
| | 156×156 | 3 | 8,9 | 4,6 | 19,0 |
| | 125×125 | 2 | 5,4 | 2,7 | 17,6 |
| Поликристаллический Polycrystalline | 156×156 | 4 | 8,8 | 4,4 | 18,8 |
| | 156×156 | 3 | 8,4 | 4,2 | 18,0 |
| | 152×52 | 3 | 2,8 | 1,4 | 17,5 |
| | 52×52 | 1 | 0,86 | 0,43 | 17,0 |

Мощность P одного ФМ рассчитывается по следующей формуле:

$$P = \sum_{n=1}^n U_{mp} I_{mp}. \quad (4)$$

Значения U_{mp} и I_{mp} в формуле (4) – это напряжение и ток при максимальной мощности, а n – число последовательных соединенных фотоэлементов.

Таким образом, зная стандартные размеры фотоэлементов и требуемую мощность, можно рассчитать площадь S_M , предварительно определив длину L_M (5) и ширину B_M (6) активной части модуля:

$$L_M = n_y l_L + (n_y d_y), \quad (5)$$

$$B_M = n_x l_B + (n_x d_x), \quad (6)$$

где n_y и n_x – число элементов по длине и ширине ФМ; l_L – длина одного элемента (определяется направлением вдоль шин ВВ); l_B – ширина одного элемента; d_y и d_x – расстояние между элементами по длине и ширине соответственно.

У автономных СЭС номинальное напряжение ФМ должно соответствовать напряжению накопителей электроэнергии, в качестве которых используются различные типы аккумуляторных батарей, напряжение которых чаще всего равно 12 В. Аккумуляторы могут соединяться параллельно, увеличивая емкость, или последовательно, увеличивая напряжение с 12 до 24, 36, 48 В, и т. д. Именно эти значения и определяют значение напряжения массива или одиночного ФМ.

У сетевых СЭС, как правило, отсутствует необходимость в преобразовании постоянного напряжения из низкого в высокое посредством повышающего преобразователя DC/DC (boost converter), так как требуемое напряжение получают путем последовательного соединения нескольких солнечных модулей. Это уменьшает величину постоянного тока при его преобразовании в переменное синусоидальное, что повышает надежность и эффективность инвертора. Поэтому при выборе напряжения модуля главной характеристикой является U_{mp} – напряжение при максимальной мощности, от которого будет зависеть и значения U_{oc} – напряжение холостого хода, и I_c – ток короткого замыкания. Соответственно, минимальное число элементов n может быть определено следующим выражением:

$$n \geq U_{mp} / U_{sc}, \quad (7)$$

где U_{sc} – напряжение одного фотоэлемента.

В результате, по формуле (7) находим оптимальное значение n , которое будет равно 36 для систем на 12 В, и 72 – для систем на 24 В. Такое количество фотоэлементов обеспечивает необходимое напряжение 18 или 32 В и ток для зарядки одного или соединенных последовательно двух аккумуляторов. Соответственно, при использовании фотоэлементов размером 156×156 мм (таблица) размеры и мощность ФМ будут максимальным. Если требуется мощность меньше, то используются фотоэлементы меньшего размера. Например, разрезав фотоэлемент (кремневую пластину) мощностью в 4,2 Вт на две части, вместе с уменьшением площади в два раза, до 2,1 Вт, уменьшится и мощность.

В данной исследовательской работе для экспериментальной установки требовался близкий к квадратной форме модуль мощностью 50–60 Вт и напряжением U_{mp} 15–25 В. Для его изготовления были выбраны поликристаллические элементы 156×156 мм, 4ВВ, мощностью 4,4 Вт (рис. 1).

Расчеты выполнялись для двух вариантов разрезания кремневой пластины: разрезание на две равные части; разрезание на три равные части.

При разрезании фотоэлемента на две равные части, при $n=36$, мощность ФМ составила 79 Вт, а

размеры – 628×711 мм, при $d_y=d_x=1$ мм. Разрезав элемент на три части, суммарная мощность 36 последовательно соединенных фотоэлементов составила 50 Вт, а размеры – 628×477 мм.

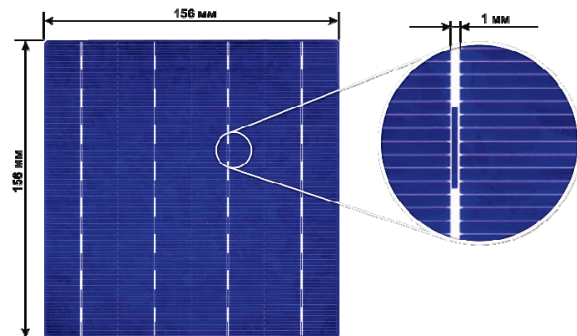


Рис. 1. Поликристаллический фотоэлемент 4,4 Вт (4ВВ)

Fig. 1. Polycrystalline solar cell with 4,4 W (4BB)

Данный вариант конструкции и был выбран за основу, но в каждую последовательную цепочку из девяти фотоэлементов было добавлено еще по три. В результате размеры составили 628×636 мм, $n=48$, $P=67$ Вт, а $U_{mp}=24$ В, т. е. добавленная площадь в 0,0998 м² увеличила производительность ФМ на 34 %. Схема соединений фотоэлементов в ФМ представлена на рис. 2, добавленные фотоэлементы выделены зелёным цветом.

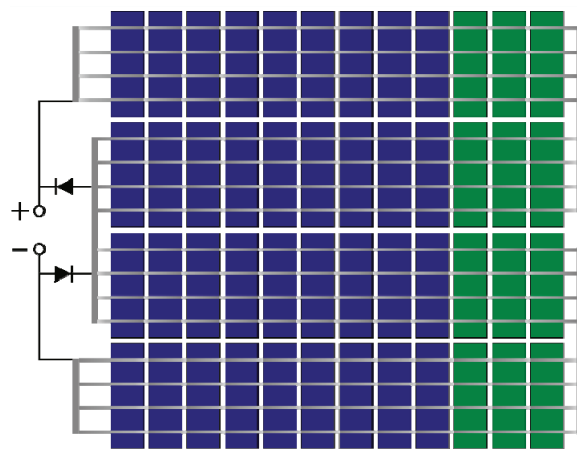


Рис. 2. Схема подключения солнечных элементов в модуле

Fig. 2. Scheme of solar cells connection in the module

Особенностью микромощных СЭС являются их небольшие размеры и возможная работа в условиях искусственного затенения. Обычно при естественном полном или частичном затенении (облачность, снег, дождь) недостающая мощность компенсируется установкой дополнительных модулей, что требует наличия дополнительной площади. Если такой возможности нет, то установка солнечной электростанции в данном месте будет заведомо экономически невыгодна. При искусственном затенении, когда, например, СЭС находится в тени здания до или после полудня, компенсировать потери энергии можно за счет постоянной

ориентации ФМ перпендикулярно потоку солнечного излучения до конца светового дня или до образования тени. Соответственно, если отслеживать положение Солнца при отсутствии искусственного затенения – эффективность СЭС будет максимальной.

Анализ исследовательских работ [18–26] показывает, что солнечные трекеры (solar tracker – отслеживание Солнца) способны повысить эффективность СЭС до 50 %. Максимальные расчетные значения увеличения выработанной модулем мощности для одноосной системы составляют около 35 %, для двухосной – до 55 %.

Повышение эффективности СЭС с помощью трекеров

Исследования различных типов трекеров, в том числе предназначенных для солнечных концентраторов и коллекторов, показали, что отслеживание изменяющейся в течении дня эклиптики гораздо важнее, чем отслеживание угла Солнца относительно горизонта, которое дает прибавку к мощности в 7–10 %. Такой подход упрощает систему фактически в два раза и, соответственно, повышает её надежность. Тем не менее, усложнение механики трекера (перемещение в двух плоскостях вместо одной) оправдывается экспериментальными исследованиями, где полученные результаты отличаются от расчетных. Так, двухосный солнечный трекер [27] при испытании в пасмурную погоду увеличил выработку на 9,87 %, а в солнечные дни [28] – до 20 % и более.

В ряде работ указывается, что чем ближе СЭС к экватору, тем меньше эффект от использования даже одноосевого трекера [29]. По данным из других исследовательских работ, мощность, вырабатываемая СЭС с подвижной системой ФМ, на экваторе и на полюсе отличается незначительно, примерно на 5 %. При этом результаты сравнения энергоэффективности неподвижных и подвижных солнечных систем для географического положения г. Томска (56°29' с. ш., 84°58' в. д.) показывают,

что отношение мощности к площади ФМ подвижной конструкции даже зимой (угол максимального подъема Солнца 10°) на 27 Вт/м² больше, чем для неподвижной [30].

При рассмотрении существующих в России (Челябинская, Оренбургская, Томская области) систем слежения за солнцем и систем, которые испытаны в текущем году, были проанализированы различные обоснования необходимости внедрения ФМ с солнечными трекерами. Наиболее ценными являются результаты исследований, в процессе проведения которых была экспериментально доказана высокая эффективность применения следящих систем, позволяющих увеличить КПД ФМ до 50 % [31].

Как уже было отмечено, основная проблема подвижных систем слежения за солнцем – это надежность мехатроники, которая почти в 5 раз ниже, чем у неподвижных систем. В этой связи в разрабатываемой микромощной СЭС в качестве основных элементов конструкции трекера наиболее подходящим вариантом является использование линейных актуаторов или актуаторов вращения. Современные актуаторы могут работать в любых погодных условиях, не боятся воды и пыли, надежны и долговечны.

Схема управления актуаторами стандартная, с двумя мостовыми выходными каскадами, подключенными к цифровым выходам микроконтроллера, на аналоговые входы которого поступают сигналы с четырех датчиков освещения (рис. 3).

Разработка схемы управления микромощной солнечной электростанцией

Следующей важной частью солнечной электростанции любого типа является так называемый солнечный котроллер – преобразователь напряжения DC-DC (direct current – постоянный ток), одной из основных функций которого является регулирование заданных параметров напряжения и тока зарядки аккумуляторной батареи (АБ). Харак-

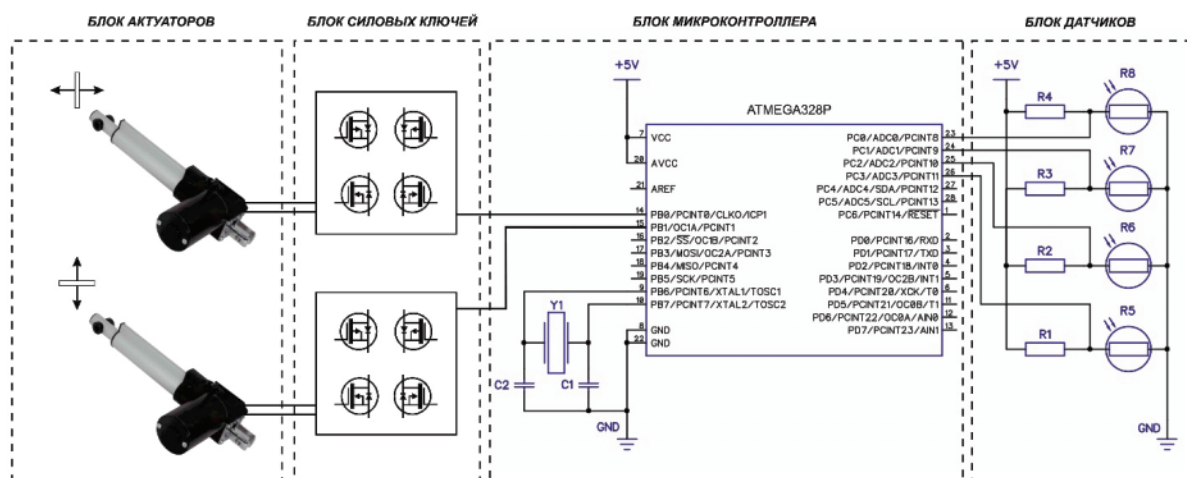


Рис. 3. Схема управления солнечным трекером

Fig. 3. Control circuit of a solar tracker

теристики разных типов АБ имеют различия по параметрам зарядки и разрядки, небольшие отклонения от которых ведут к значительному сокращению периода эксплуатации. Выработка электроэнергии СЭС непостоянна в течение всего светового дня, может резко изменяться в короткие промежутки времени и зависит не только от внешних воздействующих факторов, но и от величины потерь, которые могут быть в самой СЭС, т. е. уже после преобразования солнечной энергии в электрическую.

Для уменьшения потерь и повышения КПД в большинстве случаев применяются простые схемы непосредственных преобразователей напряжения, с минимальным количеством силовых ключей [32–34]. Однако недостатком такого решения является предельный режим работы переключения силового транзистора, требующий введения демпфирующих пассивных цепей, что сопровождается нежелательным переходным процессом, который, в свою очередь, ограничивает частоту переключения.

Наиболее перспективным является построение DC-DC преобразователей по вольтодобавочной топологии, которая позволяет разделить ток ФМ по нескольким мостовым преобразователям, что существенно уменьшает статические потери [35]. Таким образом, обеспечение LCL-T контуром мягкой коммутации транзисторов позволяет получить достаточно высокий КПД преобразования, выше 98 %. Вместе с тем отмечается [36], что, например, при работе систем электропитания геофизических приборов могут быть кратковременные перегрузки, из-за которых DC-DC преобразователь с вольтодобавочной схемой может перейти в режим ограничения тока. Поэтому предлагается ввести в схему дискретный переключатель, который при перегрузке позволяет вручную перевести преобразователь из вольтодобавочного режима в классический резонансный.

Учитывая вышеизложенное, при разработке солнечного контроллера для микроомощной СЭС в части преобразователя DC-DC решено все функции по контролю за входными и выходными параметрами, а также управление режимами работы автоматизировать посредством применения в схеме микроконтроллера.

Регулирование необходимых параметров напряжения и тока зарядки АБ в современных СЭС – это только одна, безусловно важная, часть солнечного контроллера, которая может быть выполнена по максимально упрощенной схеме в виде контроллера, регулирующего ток и напряжение с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Устройства такого типа в солнечной энергетике называют PWM (pulse-width modulation) контроллерами. Вторая, не менее важная часть всей системы вторичного преобразования энергии в высокоэффективной СЭС – это МРРТ (maximum power point tracking) устройство отслеживания точки максимальной мощности.

Мощность солнечного излучения в суточном цикле изменяется в достаточно широких пределах от нуля до максимума, и, следовательно, количество вырабатываемой СЭС энергии также является переменным. Всё это, вместе с другими факторами, оказывающими влияние на эффективность фотоэлектрической системы, требует постоянной настройки вторичных, адаптивных преобразователей электроэнергии. Эту функцию выполняют контроллеры МРРТ, работающие по одному из двух алгоритмов: с подбором шага (адаптивный) или возмущения и наблюдения (неадаптивный) [37].

По имеющимся данным, полученным в результате исследований алгоритмов поиска точки максимальной мощности, наиболее эффективным является алгоритм подбора шага, так как при этом точность регулирования основных параметров (ток, напряжение, мощность) увеличивается до 99 % [38].

Результаты многочисленных исследований подтверждают, что алгоритм подбора шага (с нечетким логическим шагом или комбинированный с фиксированным), применяемый в контроллерах МРРТ фотоэлектрических систем, является наиболее эффективным (эффективность отслеживания до 99,6 %) по сравнению с алгоритмом фиксированного размера шага [39–48].

Структурная схема предлагаемой к реализации системы управления микроомощной СЭС на основе микроконтроллера ATmega326 представлена на рис. 4. Данный микроконтроллер используется в популярной платформе аппаратно-программных средств «Ардуино», которая широко используется для построения различных автоматизированных систем и экспериментальных исследований, в том числе, и в системах солнечной энергетики [23, 48].

Кроме рассмотренных в данной публикации основных элементов и функциональных блоков микроомощной СЭС, на рис. 4 представлены блоки 6–9. Блок накопителей – 6 может состоять из различного количества аккумуляторных батарей, общая емкость которых зависит от мощности ФМ. В данном конкретном случае для ФМ мощностью 60 Вт необходимо устанавливать одну батарею на 18 А·ч или две соединенные параллельно по 12 А·ч для мобильного/переносного варианта СЭС, две соединенные параллельно батареи 18 А·ч – для стационарного варианта.

Блок индикации – 7 предназначен для вывода информации о состоянии всех основных блоков СЭС, ручного программирования режимов работы и отображения статистических данных. Он выполнен по стандартной схеме на основе дисплея LCD 1602 или LCD 2004, подсоединенного к микроконтроллеру по интерфейсу I2C/ПЦ.

Инвертор DC-AC – 8 служит для преобразования постоянного тока (12–24 В) в синусоидальный переменный ток напряжением 220 В. Выходная мощность инвертора разрабатываемой СЭС также зависит от мощности ФМ и емкости аккумулятор-

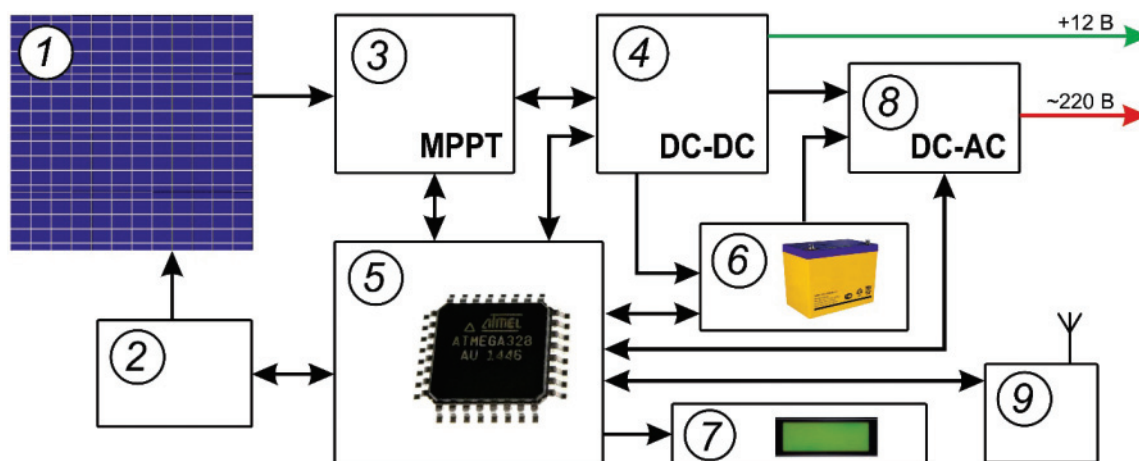


Рис. 4. Структурная схема управления микромощной солнечной электростанцией: 1 – ФМ; 2 – трекер; 3 – MPPT; 4 – преобразователь DC-DC; 5 – блок микроконтроллера; 6 – блок накопителей (аккумуляторных батарей); 7 – блок индикации; 8 – инвертор DC-AC (преобразователь постоянного тока в синусоидальный переменный); 9 – блок связи с внешними устройствами и удаленного управления

Fig. 4. Block diagram of micro-power solar power plant control: 1 – solar panel; 2 – solar tracker; 3 – MPPT; 4 – DC-DC converter; 5 – micro-controller unit; 6 – energy storage (battery); 7 – display unit; 8 – DC converter into a sinusoidal alternating current; 9 – communication unit with external devices and remote control

ных батарей и в данной разработке составляет 50 Вт. Формирователь переменного напряжения частотой 50 Гц для инверторов мощностью до 0,1 кВт выполнен по упрощенной схеме, с использованием микросхемы TL494CN (КР1114ЕУ4 – отечественный аналог) и низкочастотного выходного трансформатора. Для более мощных инверторов используется промышленная плата «чистый синус» с микросхемой EG8010 и двумя полумостовыми драйверами IR2110 или IR2113.

Основная проблема современных преобразователей DC-AC – это невысокий КПД и достаточно высокое собственное потребление. Поэтому с целью повышения экономичности инвертор включается в работу только при необходимости использования переменного напряжения 220 В, а контроль режима его работы осуществляется блоком микроконтроллера – 5.

Блок – 9 служит для подключения к микромощной СЭС внешних устройств и обеспечения удаленного доступа. Данный блок является опциональным, но его наличие в экспериментальной установке является очень важным, так как это позволяет в режиме реального времени отслеживать состояние всех функциональных блоков и вести сбор статистических данных. В настоящее время рассматривается реализация нескольких вариантов построения этого блока, в зависимости от способа подключения к сети Интернет. Это может быть Wi-Fi на основе широко распространенного модуля с контроллером ESP8266, модем GSM на основе SIM800L или обычный сетевой интерфейс Ethernet на основе ENC28J60.

Все схемы и печатные платы электронных блоков разработаны с помощью многофункциональной САПР DipTrace и онлайн-редактора схем и печатных плат EasyEDA. Эскиз переносной СЭС мощностью 60 Вт представлен на рис. 5.

нальной САПР DipTrace и онлайн-редактора схем и печатных плат EasyEDA. Эскиз переносной СЭС мощностью 60 Вт представлен на рис. 5.



Рис. 5. Эскиз переносной микромощной солнечной электростанции

Fig. 5. Sketch of portable micro-powerful solar power plant

Заключение

1. Применение сложных методик расчета инсоляции при разработке микромощных солнечных электростанций фактически не влияет на результат, а погрешность при использовании менее сложных методик расчетов может составлять не более 10 % за период в один год.

2. Предложена несложная технология изготовления экспериментальных фотоэлектрических модулей заданной мощности, размеров и геометрической формы.
3. На основе анализа теоретических и экспериментальных разработок в области систем слежения за солнцем разработана система управления двухосным солнечным трекером на основе актуато-

ров. Данная система позволяет повысить эффективность фотоэлектрических систем в широтах Западной и Юго-Западной Сибири до 50 %.

4. Снижение потерь при вторичном преобразовании полученной от фотоэлектрических преобразователей энергии достигнуто благодаря использованию главного управляющего блока на основе микроконтроллера ATmega326.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Strategic prospects of the electric power industry of Russia / A.A. Makarov, F.V. Veselov, A.S. Makarova, T.V. Novikova, T.G. Pankrushina // *Thermal Engineering*. – 2017. – V. 64. – Iss. 11. – P. 817–828. URL: <https://doi.org/10.1134/S0040601517110064> (дата обращения 11.01.2019).
2. Cherepovitsyn A., Tsvetkov P. Overview of the prospects for developing a renewable energy in Russia // *Proc. of 2017 International Conference on Green Energy and Applications, ICGEA 2017*. – P. 113–118. DOI: 10.1109/ICGEA.2017.7925466
3. Porfiriev B.N., Roginko S.A. Energy on renewable sources: Prospects for the world and for Russia // *Herald of the Russian Academy of Sciences*. – 1 November 2016. – V. 86. – Iss. 6. – P. 433–440.
4. IRENA (2018), Renewable capacity statistics 2018, International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi. URL: <https://ru.scribd.com/document/382990659/IRENA-RE-Capacity-Statistics-2018> (дата обращения 10.01.2019).
5. IRENA (2016), The Power to Change: Solar and Wind Cost Reduction Potential to 2025. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_Power_to_Change_2016.pdf (дата обращения 10.01.2019).
6. Ustinov D.A., Baburin S.V. Influence by technological process onto mineral resources sector enterprise power supplies reliability parameters // *International Journal of Applied Engineering Research (IJAER)*. – 2016. – V. 11. – Iss. 7. – P. 5267–5270.
7. Energy storage and smart energy systems / H. Lund, P.A. Østergaard, D. Connolly, I. Ridjan, B.V. Mathiesen, F. Hvelplund, J.Z. Thellufsen, P. Sorknes // *Int. J. Sustainable Energy Plann. Manage.* – 2016. – V. 11. – P. 3–14. URL: <https://doi.org/10.5278/ijsepm.2016.11.2> (дата обращения 11.01.2019).
8. Smart energy systems for coherent 100 % renewable energy and transport solutions / B.V. Mathiesen, H. Lund, D. Connolly, H. Wenzel, P.A. Østergaard, B. Möller, S. Nielsen, I. Ridjan, P. Karnøe, K. Sperling, F.K. Hvelplund // *Appl. Energy*. – 2015. – V. 145. – P. 139–154. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.075> (дата обращения 11.01.2019).
9. Wang Y, Huang Y, Wang Y, Li F, Zhang Y, Tian C. Operation Optimization in a Smart Micro-Grid in the Presence of Distributed Generation and Demand Response. *Sustainability*. – 2018. – V. 10. – Iss 3. – P. 847. URL: <https://doi.org/10.3390/su10030847> (дата обращения 11.01.2019).
10. Abramovich B.N., Prochorova V.B., Sychev Yu.A. The Application of Modern Information Technologies for Power Monitoring and Control in Conditions of Distributed Generation // *Proc. of the 16th conference of FRUCT association*. – Oulu, Finland, 27–31 October, 2014. – P. 3–8. DOI: 10.1109/FRUCT.2014.7000938.
11. Ferroni F., Hopkirk R.J. Energy Return on Energy Invested (EROI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation // *Energy Policy*. – 2016. – V. 94. – P. 336–344.
12. Energy Return on Energy Invested (ERoEI) for Photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation: a comprehensive response / M. Raugei, S. Sgouridis, D. Murphy, V. Fthenakis, R. Frischknecht, Ch. Breyer, U. Bardi, Ch. Barnhart, A. Buckley, M. Carbajales-Dale, D. Csala, M. de Wild-Scholten, G. Heath, A. Jäger-Waldau, Ch. Jones, A. Keller, E. Leccisi, P. Mancare-
- lla, N. Pearsall, A. Siegel, W. Sinke, Ph. Stolz // *Energy Policy*. – 2017. – V. 102. – P. 377–384.
13. Ferroni F., Guekos A., Hopkirk R.J. Further considerations to: Energy Return on Energy Invested (EROEI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation // *Energy Policy*. – 2017. – V. 107. – P. 498–505. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.05.007> (дата обращения 11.01.2019).
14. Карамов Д.Н. Математическое моделирование солнечной радиации с использованием многолетних метеорологических рядов, находящихся в открытом доступе // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328. – № 6. – С. 28–37.
15. Карамов Д.Н. Формирование исходных метеорологических массивов с использованием многолетних рядов FM 12 Супор и МЕТАР в системных энергетических исследованиях // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 1. – С. 69–88.
16. Обухов С.Г., Плотников И.А. Имитационная модель режимов работы автономной фотоэлектрической станции с учетом реальных условий эксплуатации // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328. – № 6. – С. 38–51.
17. Дмитриенко В.Н., Лукутин Б.В. Методика оценки энергии солнечного излучения для фотоэлектростанции // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328. – № 5. – С. 49–55.
18. Monthly profile analysis based on a two-axis solar tracker proposal for photovoltaic panels / F.M. Hoffmann, R.F. Molz, J.V. Kothe, E.O.B. Nara, L.P.C. Tedesco // *Renewable Energy*. – 2018. – V. 115. – P. 750–759. DOI: 10.1016/j.renene.2017.08.079.
19. An economical, two axes solar tracking system for implementation in Brazil / D.R. Carvalho, A.F. Lacerda Filho, R.C. Resende, M.A. Possi, J.P. Kruckeberg // *Applied Engineering in Agriculture*. – 2013. – V. 29. – Iss. 1. – P. 123–128. DOI: 10.13031/2013.42525.
20. Comparative analysis of fixed and sun tracking low power PV systems considering energy consumption / G.C. Lazaroiu, M. Longo, M. Roscia, M. Pagano // *Energy Conversion and Management*. – 2015. – V. 92. – P. 143–148. DOI: 10.1016/j.enconman.2014.12.046.
21. Tharamuttam J.K., Ng A.K. Design and Development of an Automatic Solar Tracker // *Energy Procedia*. – 2017. – V. 143. – P. 629–634.
22. A solar automatic tracking system that generates power for lighting greenhouses / Q.-X. Zhang, H.-Y. Yu, Q.-Y. Zhang, Z.-Y. Zhang, C.-H. Shao, D. Yang // *Energies*. – 2015. – V. 8. – Iss. 7. – P. 7367–7380. DOI: 10.3390/en8077367.
23. New prototype of photovoltaic solar tracker based on Arduino / C. Morón, D. Ferrández, P. Saiz, G. Vega, J.P. Diaz // *Energies*. – 2017. – V. 10. – Iss. 9. – Article no. 1298. DOI: 10.3390/en10091298.
24. Design and construction of sun tracking systems for solar parabolic concentrator displacement / S. Skouri, A. Ben Haj Ali, S. Bouadila, M. Ben Salah, S. Ben Nasrallah // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – V. 60. – P. 1419–1429. DOI: 10.1016/j.rser.2016.03.006.

25. Development and performance analysis of a two-axis solar tracker for concentrated photovoltaics / S.J. Oh, M. Burhan, K.C. Ng, Y. Kim, W. Chun // *International Journal of Energy Research*. – 2015. – V. 39. – Iss. 7. – P. 965–976. DOI: 10.1002/er.3306.
26. Fathabadi H. Comparative study between two novel sensorless and sensor based dual-axis solar trackers // *Solar Energy*. – 2016. – V. 138. – P. 67–76. DOI: 10.1016/j.solener.2016.09.009.
27. Algarin C.R., Castro A.O., Naranjo J.C. Dual-Axis Solar Tracker for Using in Photovoltaic Systems // *International Journal of Renewable Energy Research*. – 2017. – V. 7. – № 1. – P. 137–145.
28. Design of two axes sun tracking controller with analytically solar radiation calculations / S. Yilmaz, H. Ozcalik, O. Dogmus, F. Dincer, O. Akgol, M. Karaaslan // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. United Kingdom. – March 2015. – V. 43. – P. 997–1005.
29. Comparative performance analysis between static solar panels and single-axis tracking system on a hot climate region near to the equator / R. Vieira, F. Guerra, M. Vale, M. Araújo // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – October 2016. – V. 64. – P. 672–681.
30. Энергоэффективность подвижных и неподвижных конструкций солнечных панелей / К.А. Гросс, П.Я. Крауиньш, Д.П. Крауиньш, М.С. Кухта, А.П. Соколов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 3. – С. 113–122.
31. Митрофанов С.В., Немальцев А.Ю., Байкашенов Д.К. Первичная апробация автоматизированного двухкоординатного солнечного трекера в климатических условиях Оренбургской области как перспектива создания программно-аппаратного комплекса // *Альтернативная энергетика и экология*. – 2018. – № 7–9 (255–257). – С. 43–54.
32. Вопросы линеаризации математической модели преобразователя напряжения, применяемого в системах электропитания, работающих на основе возобновляемых источников энергии / Р.К. Диксон, Г.Я. Михальченко, С.Г. Михальченко, В.А. Русскин, С.М. Семенов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328. – № 1. – С. 89–99.
33. Mikhachenko S.G., Apasov V.I. Applying a mathematical model for determining power section ratings of a buck-boost converter // 17th International Conference on micro/nanotechnologies and electron devices. – Erlagol, Russia, 2016. – P. 507–511.
34. Mikhachenko G., Mikhachenko S. Bifurcation behavior in multi-parallel interleaved buck converter // *Control and Communications (SIBCON), 2015 International Siberian Conference*. – 2015. – P. 1–7. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147147.
35. Осипов А.В., Запольский С.А. Вольтодобавочный резонансный LCL-T преобразователь для автономных систем электропитания на возобновляемых источниках энергии // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 3. – С. 77–88.
36. Вольтодобавочный последовательный резонансный преобразователь с изменяемой структурой для систем электропитания / А.В. Осипов, Е.В. Ярославцев, Е.Ю. Буркин, В.В. Свиридов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 2. – С. 27–37.
37. Подход к построению адаптивного алгоритма экстремального регулирования мощности в системе солнечной энергетики / С.Г. Михальченко, В.А. Русскин, С.М. Семенов, И.П. Орлянский, С. Хэллз // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 3. – С. 102–112.
38. Русскин В.А., Семенов С.М., Диксон Р.К. Исследование алгоритмов поиска точки максимальной мощности для повышающего преобразователя напряжения солнечного инвертора // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2016. – Т. 327. – № 4. – С. 78–87.
39. Macaulay, J., Zhou, Z. A Fuzzy Logical-Based Variable Step Size P&O MPPT Algorithm for Photovoltaic System // *Energies*. – 2018. – V. 11. – Iss. 6. DOI: 10.3390/en11061340.
40. Al-Majidi S.D., Abbod M.F., Al-Raweshdy H.S. A novel maximum power point tracking technique based on fuzzy logic for photovoltaic systems // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2018. – V. 43. – Iss. 31. – P. 14158–14171.
41. Framework of Maximum Power Extraction from Solar PV Panel Using Self Predictive Perturb and Observe Algorithm / N. Kumar, I. Hussain, B. Singh, B.K. Panigrahi // *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. – 2018. – V. 9. – Iss. 2. – P. 895–903. DOI: 10.1109/TSTE.2017.2764266.
42. Fireworks enriched P&O algorithm for GMPPT and detection of partial shading in PV systems / C. Manickam, G.P. Raman, G.R. Raman, S.I. Ganesan, N. Chilakapati // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2017. – V. 32. – Iss. 6. – P. 4432–4443. DOI: 10.1109/TPEL.2016.2604279.
43. Ahmed J., Salam Z. An improved perturb and observe (P&O) maximum power point tracking (MPPT) algorithm for higher efficiency. *Applied Energy*. – 2015. – V. 150. – P. 97–108. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.04.006.
44. Baraskar S., Jain S.K., Padhy P.K. Fuzzy logic assisted P and O based improved MPPT for photovoltaic systems // *International Conference on Emerging Trends in Electrical, Electronics and Sustainable Energy Systems, ICETEESSES 2016*. Article no. 7581369. – P. 250–255. DOI: 10.1109/ICETEESSES.2016.7581369.
45. Y?ksek, G.; Mete, A.N. A hybrid variable step size MPPT method based on P&O and INC methods. In *Proceedings of the 2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, ELECO 2017*. – Bursa, Turkey, 2017. – P. 949–953.
46. Harrag A., Messalti S. Variable step size modified P&O MPPT algorithm using GA-based hybrid offline/online PID controller // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – V. 49. – Article no. 4432. – P. 1247–1260. DOI: 10.1016/j.rser.2015.05.003.
47. MPPT for PV system based on variable step size P & O algorithm / A. Jusoh, R. Alik, T.K. Guan, T. Sutikno // *Telkommika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*. – 2017. – V. 15. – Iss. 1. – P. 79–92. DOI: 10.12928/telkommika.v15i1.3160.
48. Implementation in arduino of MPPT using variable step size P&O algorithm in PV installations / M. Elyaqouti, S. Hakim, S. Farhat, L. Bouhouch, A. Ihlal // *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. – 2017. – V. 8. – Iss. 1. – P. 434–443.

Поступила 15.01.2019 г.

Информация об авторах

Хомутов С.О., доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

Полищук В.И., доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

Сташко В.И., кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

UDC 621.31:620.91

STUDY OF THE BASIC OPERATION MODES AND STRUCTURAL COMPONENTS OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS TO CONSTRUCT A MICROPOWER SOLAR POWER PLANT

Stanislav O. Khomutov¹,

homutov.so@yandex.ru

Vladimir I. Polishchuk¹,

polischuk_vi@mail.ru

Vasilii I. Stashko¹,

stashko@list.ru

¹ Polzunov Altai State Technical University,
46, Lenin avenue, Barnaul, 656038, Russia.

The relevance. Changes in geopolitics and conjuncture of the world energy markets, impact more and more the world economy, forcing not only to improve energy technologies, but also to determine the priorities of the state in the field of energy policy. One of these priorities is to increase generation from new types of renewable energy sources and rapid development of appropriate technologies, which, in their turn, provide cheaper production. At the same time, it is known that it is possible to increase the reliability of the power system and at the same time to increase the production of electricity at the expense of distributed energy, the basis of which is micro-generation from solar power plants. In this regard, additional research is needed to adapt the existing methods of calculation of photovoltaic systems to their use in development and construction of low-power solar power plants. The relevance is also caused by the fact that it is necessary to create the most effective and inexpensive system for converting solar energy into electrical energy, which would meet any given technical requirements, would be reliable and easy to operate.

The main aim of the research is to develop an effective photovoltaic system and design an inexpensive microelectric solar power plant with specified parameters and technical characteristics for further experimental studies.

The methods. When calculating and studying the main operation modes and structural elements of photovoltaic systems, the authors have used the results of numerous scientific studies, including applied research, and available experience in the field of solar energy, which was obtained in the performance of some theoretical and experimental work. DipTrace and EasyEDA systems were used in development and modeling of electronic circuits.

The results. The authors substantiate the expediency of application of more simple methods to determine the probable or actual exposure with the use of the software PVsyst, with an error of no more than 10 %. They developed the technology for experimental production of photovoltaic modules of given geometric dimensions and nominal power and the reliable control system for a biaxial solar tracker due to the actuators, which increases the efficiency of photovoltaic systems in the latitudes of Western and South-Western Siberia. A block diagram for controlling a micro-power solar power plant and electronic circuits of the MPPT solar controller, DC-DC Converter, DC-AC inverter, and the main control unit based on the ATmega326 microcontroller were designed.

Key words:

Renewable energy sources, solar power plants, autonomous power supply system, photovoltaic module, solar cell, solar controller, tracker, actuator.

REFERENCES

- Makarov A.A., Veselov F.V., Makarova A.S., Novikova T.V., Pankrushina T.G. Strategic prospects of the electric power industry of Russia. *Thermal Engineering*, 2017, vol. 64, no. 11, pp. 817–828. Available at: <https://doi.org/10.1134/S0040601517110064> (accessed 11 January 2019).
- Cherepovitsyn A., Tcvetkov P. Overview of the prospects for developing a renewable energy in Russia. *Proc. of 2017 International Conference on Green Energy and Applications, ICGEA 2017*. pp. 113–118. DOI: 10.1109/ICGEA.2017.7925466
- Porfiriev B.N., Roginko S.A. Energy on renewable sources: Prospects for the world and for Russia. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 1 November 2016, vol. 86, Iss. 6, pp. 433–440.
- IRENA (2018). *Renewable capacity statistics 2018*, International Renewable Energy Agency (IRENA). Abu Dhabi. URL: <https://ru.scribd.com/document/382990659/IRENA-RE-Capacity-Statistics-2018> (10.01.2019).
- IRENA (2016). *The Power to Change: Solar and Wind Cost Reduction Potential to 2025*. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_Power_to_Change_2016.pdf (дата обращения 10.01.2019).
- Ustinov D.A., Baburin S.V. Influence by technological process onto mineral resources sector enterprise power supplies reliability parameters. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2016, vol. 11, no. 7, pp. 5267–5270.
- Lund H., Østergaard P.A., Connolly D., Ridjan I., Mathiesen B.V., Hvelplund F., Thellufsen J.Z., Sorknes P. Energy storage and smart energy systems. *Int. J. Sustainable Energy Plann. Manage*, 2016 vol. 11, pp. 3–14. Available at: <https://doi.org/10.5278/ijsep.2016.11.2> (accessed 11 January 2019).
- Mathiesen B.V., Lund H., Connolly D., Wenzel H., Østergaard P.A., Möller B., Nielsen S., Ridjan I., Karnøe P., Sperling K., Hvelplund F.K. Smart energy systems for coherent 100 % renewable energy and transport solutions. *Appl. Energy*, 2015, vol. 145, pp. 139–154. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.075> (accessed 11 January 2019).
- Wang Y., Huang Y., Wang Y., Li F., Zhang, Y., Tian C. Operation Optimization in a Smart Micro-Grid in the Presence of Distributed Generation and Demand Response. *Sustainability*, 2018, vol. 10, no. 3, 847. Available at: <https://doi.org/10.3390/su10030847> (accessed 11 January 2019).
- Abramovich B.N., Prochorova V.B., Sychev Yu.A. The Application of Modern Information Technologies for Power Monitoring and Control in Conditions of Distributed Generation. *Proc. of the 16th conference of FRUCT association*. Oulu, Finland 27–31 October, 2014. pp. 3–8. DOI: 10.1109/FRUCT.2014.7000938.

11. Ferroni F., Hopkirk R.J. Energy Return on Energy Invested (EROI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation. *Energy Policy*, 2016, vol. 94, pp. 336–344.
12. Raugei M., Sgouridis S., Murphy D., Fthenakis V., Frischknecht R., Breyer Ch., Bardi U., Barnhart Ch., Buckley A., Carbajales-Dale M., Csala D., De Wild-Scholten M., Heath G., Jæger-Waldau A., Jones Ch., Keller A., Leccisi E., Mancarella P., Pearsall N., Siegel A., Sinke W., Stolz Ph. Energy Return on Energy Invested (ERoEI) for Photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation: a comprehensive response. *Energy Policy*, 2017, vol. 102, pp. 377–384.
13. Ferroni F., Guekos A., Hopkirk R.J. Further considerations to: Energy Return on Energy Invested (ERoEI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation. *Energy Policy*, 2017, vol. 107, pp. 498–505. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.05.007> (accessed 11 January 2019).
14. Karamov D.N. Mathematical modeling of solar radiation based on open access long-term meteorological observation data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 6, pp. 28–37. In Rus.
15. Karamov D.N. Formation of initial meteorological arrays using long-term series FM 12 Synop and METAR in system energy studies. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 1, pp. 69–88. In Rus.
16. Obukhov S.G., Plotnikov I.A. Simulation model of operation of autonomous photovoltaic plant under actual operating conditions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 6, pp. 38–51. In Rus.
17. Dmitrienko V.N., Lukutin B.V. Method for estimating solar radiation energy for photovoltaic plants. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 5, pp. 49–55. In Rus.
18. Hoffmann F.M., Molz R.F., Kothe J.V., Nara E.O.B., Tedesco L.P.C. Monthly profile analysis based on a two-axis solar tracker proposal for photovoltaic panels. *Renewable Energy*, 2018, vol. 115, pp. 750–759. DOI: 10.1016/j.renene.2017.08.079.
19. Carvalho D.R., Lacerda Filho A.F., Resende R.C., Possi M.A., Kruckeberg J.P. An economical, two axes solar tracking system for implementation in Brazil. *Applied Engineering in Agriculture*, 2013, vol. 29, no. 1, pp. 123–128. DOI: 10.13031/2013.42525.
20. Lazaroiu G.C., Longo M., Roscia M., Pagano M. Comparative analysis of fixed and sun tracking low power PV systems considering energy consumption. *Energy Conversion and Management*, 2015, vol. 92, pp. 143–148. DOI: 10.1016/j.enconman.2014.12.046.
21. Tharamuttam J.K., Ng A.K. Design and Development of an Automatic Solar Tracker. *Energy Procedia*, 2017, vol. 143, pp. 629–634.
22. Zhang Q.-X., Yu H.-Y., Zhang Q.-Y., Zhang Z.-Y., Shao C.-H., Yang D. A solar automatic tracking system that generates power for lighting greenhouses. *Energies*, 2015, vol. 8, no. 7, pp. 7367–7380. DOI: 10.3390/en8077367.
23. Morón C., Ferrández D., Sai, P., Vega G., Diaz J.P. New prototype of photovoltaic solar tracker based on Arduino. *Energies*, 2017, vol. 10, no. 9, art. no. 1298. DOI: 10.3390/en10091298.
24. Skouri S., Ben Haj Ali A., Bouadila S., Ben Salah M., Ben Nasrallah S. Design and construction of sun tracking systems for solar parabolic concentrator displacement. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 60, pp. 1419–1429. DOI: 10.1016/j.rser.2016.03.006.
25. Oh S.J., Burhan M., Ng K.C., Kim Y., Chun W. Development and performance analysis of a two-axis solar tracker for concentrated photovoltaics. *International Journal of Energy Research*, 2015, vol. 39, no. 7, pp. 965–976. DOI: 10.1002/er.3306.
26. Fathabadi H. Comparative study between two novel sensorless and sensor based dual-axis solar trackers. *Solar Energy*, 2016, vol. 138, pp. 67–76. DOI: 10.1016/j.solener.2016.09.009.
27. Algarin C.R., Castro A.O., Naranjo J.C. Dual-Axis Solar Tracker for Using in Photovoltaic Systems. *International Journal of Renewable Energy Research*, 2017, vol. 7, no. 1, pp. 137–145.
28. Yilmaz S., Ozcalik H., Dogmus O., Dincer F., Akgol O., Karaaslan M. Design of two axes sun tracking controller with analytically solar radiation calculations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, March 2015, vol. 43, pp. 997–1005.
29. Vieira R., Guerra F., Vale M., Araújo M. Comparative performance analysis between static solar panels and single-axis tracking system on a hot climate region near to the equator. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, October 2016, vol. 64, pp. 672–681.
30. Gross K.A., Krauinsh P.Ya., Krauinsh D.P., Kukhta M.S., Sokolov A.P. Energy efficiency of movable and immobile constructions of solar panels. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 3, pp. 113–122. In Rus.
31. Mitrofanov S.V., Nemaltsev A.Yu., Baykasenov D.K. Primary Testing of Automated Dual-Axis Solar Tracker in the Climatic Conditions of the Orenburg Region as the Prospects for the Establishment of a Hardware-Software Complex. *Alternative energy and ecology*, 2018, no. 7–9 (255–257), pp. 43–54. In Rus.
32. Dixon R.C., Mikhailchenko G.Ya., Mikhailchenko S.G., Ruskin V.A., Semenov S.M. Issues of linearization of a two-phase boost DC-DC converter applied in the power supply systems operating on renewable energy sources. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 1, pp. 89–99. In Rus.
33. Mikhailchenko S.G., Apasov V.I. Applying a mathematical model for determining power section ratings of a buck-boost converter. *17th International Conference on micro/nanotechnologies and electron devices*. Erlagol, Russia, 2016. pp. 507–511.
34. Mikhailchenko G., Mikhailchenko S. Bifurcation behavior in multi-parallel interleaved buck converter. *International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015*. Omsk, Russia, 2015. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147147.
35. Osipov A.V., Zapolskiy S.A. Boost type resonant LCL-T converter for autonomous power supply system from renewable sources. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 3, pp. 77–88. In Rus.
36. Osipov A.V., Yaroslavtsev E.V., Burkin E.Yu., Sviridov V.V. Boost type series resonant converter with flexible structure for power supplies. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 2, pp. 27–37. In Rus.
37. Mikhailchenko S.G., Ruskin V.A., Semenov S.M., Orlyanskiy I.P., Halász S. Construction of adaptive algorithm of power extreme control in solar energy system. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 3, pp. 102–112. In Rus.
38. Ruskin V.A., Semenov S.M., Dixon R.C. Study of algorithms for tracking maximum power point for boost DC-DC converter of solar inverter. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 4, pp. 78–87. In Rus.
39. Macaulay J., Zhou Z. A fuzzy logical-based variable step size P&O MPPT algorithm for photovoltaic system. *Energies*, 2018, vol. 11, no. 6. DOI: 10.3390/en11061340.
40. Al-Majidi S.D., Abbod M.F., Al-Raweshidy H.S. A novel maximum power point tracking technique based on fuzzy logic for photovoltaic systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, vol. 43, no. 31, pp. 14158–14171.
41. Kumar N., Hussain I., Singh B., Panigrahi B.K. Framework of Maximum Power Extraction from Solar PV Panel Using Self Predictive Perturb and Observe Algorithm. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018, vol. 9, no. 2, pp. 895–903. DOI: 10.1109/TSTE.2017.2764266.
42. Manickam C., Raman G.P., Raman G.R., Ganesan S.I., Chilakapati N. Fireworks enriched P&O algorithm for GMPPT and detec-

- tion of partial shading in PV systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, vol. 32, no. 6, pp. 4432–4443. DOI: 10.1109/TPEL.2016.2604279.
43. Ahmed J., Salam Z. An improved perturb and observe (P&O) maximum power point tracking (MPPT) algorithm for higher efficiency. *Applied Energy*, 2015, vol. 150, pp. 97–108. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.04.006.
44. Baraskar S., Jain S.K., Padhy P.K. Fuzzy logic assisted P and O based improved MPPT for photovoltaic systems. *International Conference on Emerging Trends in Electrical, Electronics and Sustainable Energy Systems, ICETEESES 2016*. Article no. 7581369, pp. 250–255. DOI: 10.1109/ICETEESES.2016.7581369.
45. Yuksek G., Mete A.N. A hybrid variable step size MPPT method based on P&O and INC methods. *2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, ELECO 2017*. 2018 January, pp. 949–953.
46. Harrag A., Messalti S. Variable step size modified P&O MPPT algorithm using GA-based hybrid offline/online PID controller. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 49, Article no. 4432, pp. 1247–1260. DOI: 10.1016/j.rser.2015.05.003.
47. Jusoh A., Alik R., Guan T.K., Sutikno T. MPPT for PV system based on variable step size P & O algorithm. *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 2017, vol. 15, no. 1, pp. 79–92. DOI: 10.12928/telkomnika.v15i1.3160.
48. Elyaqouti M., Hakim S., Farhat S., Bouhouch L., Ihlal A. Implementation in arduino of MPPT using variable step size P&O algorithm in PV installations. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 434–443.

Received: 15 January 2019.

Information about the authors

Stanislav O. Khomutov, Dr. Sc., professor, Polzunov Altai State Technical University.

Vladimir I. Polishchuk, Dr. Sc., professor, Polzunov Altai State Technical University.

Vasiliy I. Stashko, Cand. Sc., associate professor, Polzunov Altai State Technical University.

УДК 519.688:622.276

АДАПТИВНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН НА ПРОГНОЗИРУЮЩИХ МОДЕЛЯХ

Сергеев Виктор Леонидович¹,
SVL00@tpu.ru

Донг Ван Хоанг¹,
hoang.tpu@gmail.com

Фам Динь Ан¹,
phaman.tpu@gmail.com

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

Актуальность обусловлена необходимостью интерпретации результатов нестационарных гидродинамических исследований горизонтальных скважин в условиях отсутствия на кривой восстановления давления участка позднего радиального потока.

Целью исследования является разработка и исследование моделей и алгоритмов адаптивной идентификации и интерпретации результатов гидродинамических исследований горизонтальных скважин с прогнозированием недовосстановленного участка кривой забойного давления позднего радиального потока.

Методы исследования. Используются теоретические и практические разработки в области адаптивной интерпретации гидродинамических исследований скважин, методов оптимизации функций, линейной алгебры, современных исследований системного анализа, идентификации и адаптации систем. Для решения задач идентификации и прогноза использованы эволюционные феноменологические модели кривой восстановления забойного давления с переменными, зависящими от времени параметрами, с учетом дополнительной информации о пластовом давлении. Интерпретация кривой восстановления забойного давления осуществлялась на основе метода адаптивной идентификации. Решение задач проводилось с использованием промышленных данных гидродинамических исследований горизонтальных скважин нефтяных месторождений по кривой восстановления давления.

Результаты. Исследованы потенциальные возможности эволюционных феноменологических моделей с переменными параметрами для идентификации и прогноза кривой восстановления забойного давления при отсутствии участка позднего радиального потока. На примерах обработки результатов гидродинамических исследований горизонтальных скважин нефтяного месторождения показано, что разработанные модели и алгоритмы адаптивной идентификации и интерпретации позволяют: прогнозировать забойное давление на недовосстановленном участке кривой восстановления давления, определять латеральную проницаемость, скин-фактор, эффективную длину скважины и время завершения исследований в процессе их проведения, сократить время простоя скважин.

Ключевые слова:

Интерпретация, идентификация, адаптация, гидродинамические исследования скважин, кривая восстановления давления, горизонтальные скважины, нефтяные низкопроницаемые коллектора, феноменологические модели, априорная информация.

Введение

В настоящее время использование традиционных графоаналитических методов интерпретации результатов нестационарных гидродинамических исследований (ГДИ) горизонтальных скважин, основанных на анализе кривой восстановления забойного давления (КВД) и ее производной, вызывает значительные трудности, связанные с отсутствием на КВД участка позднего радиального потока либо со значительными искажениями на этом участке забойного давления. Так, для получения полноценных КВД горизонтальных скважин низкопроницаемых коллекторов, с присутствием участка позднего радиального потока, требуется проведение достаточно продолжительных исследований, порядка 500 часов и более. Интерпретация таких КВД требует привлечения квалифицированных интерпретаторов, снижает оперативность получения результатов, приводит к простоям скважин и значительным материальным затратам [1–8].

В этой связи актуальной является задача разработки моделей и алгоритмов оперативной обработки результатов ГДИ горизонтальных скважин в процессе проведения гидродинамических исследований в условиях частичного либо полного отсутствия на КВД участка позднего радиального потока длительностью порядка 50–100 часов, что является более приемлемым с точки зрения простоя скважин. Решение данной задачи было рассмотрено в работе [9], где предложен метод адаптивной интерпретации ГДИ горизонтальных скважин нефтяных пластов с использованием уравнения Вольтерра 1-го рода с переменными параметрами. Показано, что разработанные модели и алгоритмы идентификации и интерпретации позволяют оперативно обрабатывать короткие недовосстановленные КВД, поскольку стабилизация оценок латеральной проницаемости наступает уже на стадии линейного потока либо на начальной стадии позднего радиального потока. Однако, если на стадии линейного потока стабилизация оценок латераль-

ной проницаемости не наблюдается и требуется по ряду причин прервать исследования, вопрос идентификации и интерпретации таких недовосстановленных КВД остается открытым.

В данной работе предлагается метод оперативной идентификации и интерпретации результатов ГДИ горизонтальных скважин на прогнозирующих феноменологических моделях, позволяющий определять забойное давление на недовосстановленном участке КВД, пластовое давление и фильтрационные параметры пласта в условиях отсутствия позднего радиального потока, когда стабилизация оценок латеральной проницаемости не наступает.

Модели и алгоритмы идентификации и прогноза КВД

Основой алгоритмов идентификации и прогноза недовосстановленного участка позднего радиального потока КВД являются феноменологические модели забойного давления с переменными параметрами $\alpha_n = a(t_n)$, с учетом дополнительной информации о пластовом давлении $\bar{p}_{пл}$ вида:

$$\begin{cases} P_3^*(t_n) = P_3(t_0) + f(t_n, \alpha_n) + \xi(t_n), & n = \overline{1, nk}, \\ h_{к, n} \bar{p}_{пл} = f(\bar{t}_в, \alpha_n) + \eta_n. \end{cases} \quad (1)$$

где $P_3^*(t_n), f(t_n, \alpha_n)$ – фактические и вычисленные на основе феноменологической модели (табл. 1) значения забойного давления, полученные в разные моменты времени $t_n \in [t_0, t_{nk}]$; t_0 – время начала исследования, ч; t_{nk} – момент времени завершения исследования, ч; $P_3(t_0)$ – значение забойного давления в момент времени t_0 , атм; $\alpha_n (n = \overline{1, nk})$ – параметры феноменологической модели забойного давления в моменты времени t_n ; $\bar{P}_{пл}$ – экспертная оценка пластового давления, атм; $\bar{t}_в$ – экспертная оценка момента времени восстановления забойного давления до пластового, ч; $h_{к, n}$ – параметр корректировки экспертной оценки пластового давления; ξ_n, η_n – случайные величины, представляющие погрешности измерений забойного давления, ошибки экспертных оценок, и т. п.

Прогнозные значения недовосстановленного участка КВД на время τ вычисляем по формуле (2).

$$\hat{P}_3(t_n + \tau) = P_3(t_0) + f(t_n + \tau, \alpha_n^*(h_n^*)), \quad (2)$$

где оценки параметров модели (1) $\alpha_n^*(h_n^*)$ и управляющих параметров h_n^* определяем согласно методу адаптивной интерпретации путем решения оптимизационных задач [10]

$$\alpha_n^*(h_n) = \arg \min_{\alpha_n} (J_0(\alpha_n, h_{\zeta, n}) + J_a(\alpha_n, h_{p, v}, h_{к, v})), \quad (3)$$

$$h_n^* = \arg \min_{h_n} J_0(\alpha_n^*(h_n)), \quad (4)$$

где запись $\arg \min_x f(x)$ означает точку минимума x^* функции $f(x)$ ($f(x^*) = \min_x f(x)$);

$$J_0(\alpha_n, h_{\zeta, n}) = \sum_{i=1}^n K \left(\frac{t_n - t_i}{h_{\zeta, n}} \right) (P_3^*(t_n) - (P_3(t_0) + f(t_n, \alpha_n)))^2$$

– показатель качества модели забойного давления;

$$J_a(\alpha_n, h_{\delta, n}, h_{к, n}) = h_{p, n} (h_{к, n} \bar{p}_{пл} - f(\bar{t}_в, \alpha_n))^2$$

– показатель качества модели экспертной оценки пластового давления $\bar{P}_{пл}$; $h_n^*(h_{\zeta, n}, h_{p, n}, h_{к, n})$ – вектор управляющих параметров, забывания, регуляризации и корректировки экспертной оценки пластового давления, соответственно [11].

На рис. 1, 2 приведены исходные КВД (линия 1) скважин № 1, 2 Верхнечонского месторождения и восстановленные значения забойного давления (линия 2), полученные с использованием феноменологической модели № 3 (табл. 1).

В табл. 1 приведены феноменологические модели КВД [12–19] и относительные ошибки δ_τ (5) прогноза забойного давления на время τ , полученные с момента времени завершения линейного потока $t_{л} = 10$ ч (для скважины № 1) и $t_{л} = 40$ ч (для скважины № 2) с использованием промысловых данных забойного давления, приведенных на рис. 1, 2.

$$\delta_\tau = \left| \frac{P_3(t_n + \tau) - \hat{P}_3(t_n + \tau)}{P_3(t_n + \tau)} \right| \cdot 100, \quad (5)$$

где $P_3(t_n + \tau)$ – значения забойных давлений, атм; $\hat{P}_3(t_n + \tau)$ – прогнозные значения забойного давления, атм.

На рис. 3, 4 приведены оценки пластового давления $P_{пл}^*$ и их относительные ошибки $\delta_{пл}$, определенные по формулам (6) и (7).

$$P_{пл}^* = f(\bar{t}_в, \alpha_n^*(h_n^*)); \quad (6)$$

$$\delta_{пл} = \left| \frac{P_{пл} - P_{пл}^*}{P_{пл}} \right| \quad (7)$$

с использованием феноменологической модели № 3, где $P_{пл}$ – точное значение пластового давления скважины № 2, атм.

Отметим, что точное значение пластового давления скважины № 2 $P_{пл} = 106,7$ атм, а экспертная оценка пластового давления $\bar{P}_{пл}$ принималась равной 111 атм, с ошибкой порядка 4 %.

Решение оптимизационных задач по определению параметров модели КВД (3) проводилось с использованием метода деформированного многогранника [20]. Оптимизационная задача по определению вектора управляющих параметров (4), по аналогии с [11], сводилась к последовательному решению одномерных оптимизационных задач по определению параметра регуляризации, корректировки и забывания методом дихотомии [20].

На рис. 3, 4 приведены оценки пластового давления и их относительные ошибки, полученные с использованием феноменологических моделей КВД, представленных в табл. 1.

Таблица 1. Феноменологические модели КВД и относительная ошибка прогноза забойного давления

Table 1. Phenomenological models and relative errors of forecasting of bottomhole pressure

| Модели КВД Models of pressure build-up curve | Название Name (author) | Номер скважины Well number | Относительная ошибка прогноза на время τ (ч), % Relative errors of forecasting at the moment τ (hour), % | | | |
|---|------------------------------|-------------------------------|---|-----------|------------|------------|
| | | | $\tau=40$ | $\tau=80$ | $\tau=120$ | $\tau=160$ |
| $\Delta D = \frac{1}{(1 + e^{-\alpha_2 t})} \times (\alpha_1 + \alpha_2 \ln t)$ | Хоанг-Ан Hoang-An | 1 | 0,02 | 0,018 | 0,15 | 0,16 |
| | | 2 | 0,31 | 0,42 | 0,56 | 0,53 |
| $\Delta P = \alpha_1 (1 - e^{-\alpha_2 t})^{\alpha_3}$ | Берталанфи Bertalanffy | 1 | 0,065 | 0,027 | 0,058 | 0,12 |
| | | 2 | 0,06 | 0,56 | 0,98 | 0,45 |
| $\Delta P = \alpha_1 e^{\alpha_2 t - \alpha_3}$ | Кольрауш Kohlrausch | 1 | 0,068 | 0,071 | 0,12 | 0,14 |
| | | 2 | 0,13 | 0,48 | 1,12 | 0,89 |

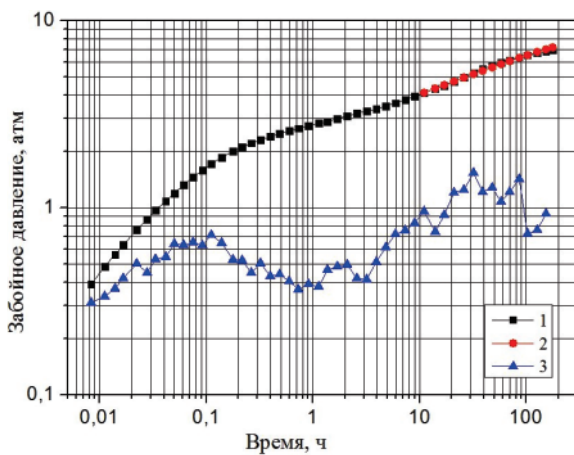


Рис. 1. Исходная КВД скважины № 1 (линия 1) и её производная (линия 3), прогнозная (восстановленная) КВД (линия 2) с использованием модели Берталанфи

Fig. 1. Initial pressure build-up curve of well no. 1 (line 1) and its pressure derivative, expected (recovered) pressure buildup curves (line 2) using the Bertalanffy model

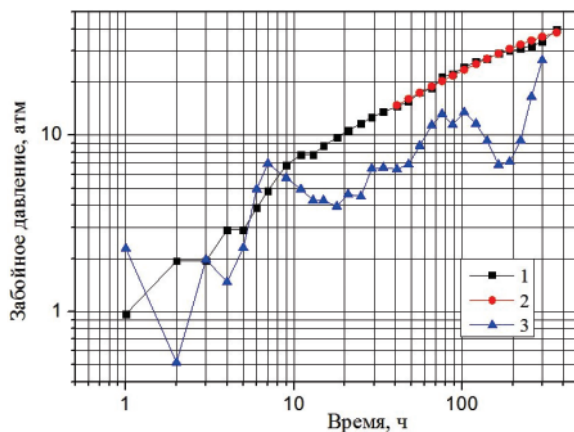


Рис. 2. Исходная КВД скважины № 2 (линия 1) и её производная (линия 3), прогнозная (восстановленная) КВД (линия 2) с использованием модели Берталанфи

Fig. 2. Initial pressure build-up curve of well no. 2 (line 1) and its pressure derivative, expected (recovered) pressure buildup curves (line 2) using the Bertalanffy model

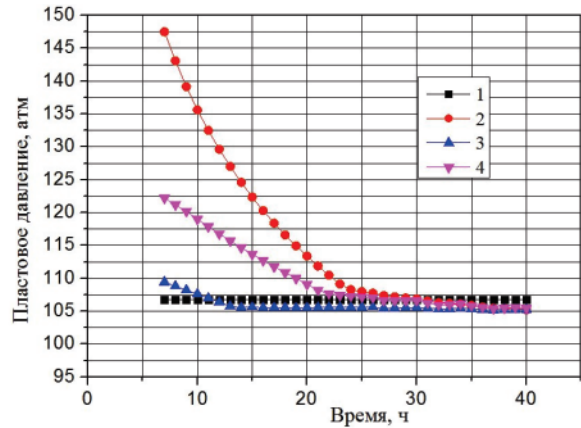


Рис. 3. Оценки пластового давления скважины № 2 (линия 1 – фактическое значение пластового давления; линия 2 – по модели Хоанг-Ан; линия 3 – по модели Берталанфи; линия 4 – по модели Кольрауш)

Fig. 3. Estimates of reservoir pressure of well no. 2 (line 1 – actual value of reservoir pressure; line 2 – with the Hoang-An model; line 3 – with the Bertalanffy model; line 4 – with the Kohlrausch model)

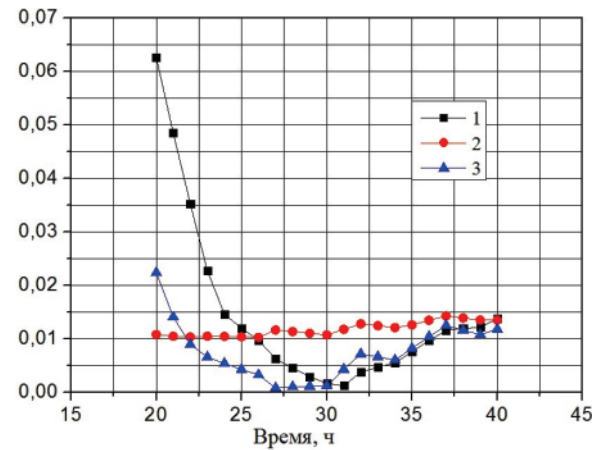


Рис. 4. Относительные ошибки оценок пластового давления скважины № 2 (линия 1 – по модели Хоанг-Ан; линия 2 – по модели Берталанфи; линия 3 – по модели Кольрауш)

Fig. 4. Relative errors of reservoir pressure estimations of well no. 2 (line 1 – with the Hoang-An model; line 2 – with the Bertalanffy model; line 3 – with the Kohlrausch model)

Анализ результатов, приведенных на рис. 3, 4 и в табл. 1, показывает, что алгоритмы адаптивной идентификации и прогноза на основе феноменологических моделей КВД позволяют достаточно точно определять пластовое давление (с ошибкой порядка 0,1–0,2 %) и прогнозировать забойные давления на завершающей стадии линейного потока.

Результаты интерпретации КВД с восстановлением позднего радиального потока

Процесс интерпретации КВД с прогнозированием невосстановленного участка забойного давления осуществляется по следующей схеме:

1. Определяем латеральную проницаемость пласта, пластовое давление и скин-фактор с ис-

- пользованием модели КВД позднего радиального режима течения [9]. В момент времени стабилизации оценок латеральной проницаемости процесс гидродинамических исследований завершается (рис. 5, 6, линия 2).
2. Если стабилизация оценок латеральной проницаемости не наступает (рис. 5, 6, линия 1), то осуществляется прогноз недовосстановленного участка КВД с использованием прогнозирующих моделей (2).
 3. С использованием восстановленных значений забойных давлений и модели КВД (9) определяем оценки латеральной проницаемости до их стабилизации, а также оценки пластового давления, горизонтальной эффективной длины ствола и скин-фактора скважины.
- Результаты интерпретации КВД с восстановлением позднего радиального потока горизонтальных скважин № 1, 2 приведены на рис. 5, 6 и в табл. 3. Процесс восстановления забойного давления начинается с момента времени $t_n=10$ ч и $t_n=40$ ч для скважин № 1, 2 соответственно. На рис. 5, 6 приведены оценки латеральной проницаемости скважин № 1, 2 (8).

$$k_{r,n}^* = \frac{C_s q_0 \mu B}{4\pi \alpha_{1,n}^* (\beta_n^*, h_n^*) h} \quad (8)$$

для полных и восстановленных КВД, полученные с использованием модели забойного давления вида [9]:

$$\begin{cases} P_{3,n}^* = P_{3,n} + \xi_n = P(t_0) + \\ + \alpha_{1n} \int_{t_{nl}}^{t_{nk}} \frac{(1-q(\alpha_{3n}, t_n))}{t_n - \tau} \exp\left(-\frac{\alpha_{2n}}{(t_n - \tau)}\right) d\tau + \xi_n, \\ n = \overline{nl, nk}; \\ P_{пл} = P_{3,n+\tau} + \eta_{2,n+\tau}, \tau > t_k, \end{cases} \quad (9)$$

где $q(\alpha_{3n}, t_n) \rightarrow 0$ при $t_n \rightarrow \infty$. $\alpha_{1n} = \frac{C_s q_0 \mu B}{4\pi k_{r,n} h}$;

$\alpha_{2n} = \frac{\phi \mu r_{пр,n}^2}{4k_{r,n}}$; $k_{r,n}$ – латеральная проницаемость

(проницаемость позднего радиального потока); q_0 – дебит скважины в момент ее остановки при t_0 , $\text{см}^3/\text{с}$; ϕ – пористость, доля; μ – вязкость нефти, сПз ; B – объемный коэффициент нефти, $\text{м}^3/\text{м}^3$; $r_{пр,n}$ – приведенный радиус скважины, см ; h – толщина пласта, см ; C_s – константа, зависящая от используемой системы единиц; χ_n , η_n – случайные неконтролируемые факторы, представляющие различного рода погрешности измерений забойных давлений, ошибки экспертных оценок, неточности модели КВД и т. п.

Для интегрированной модели (9) оптимальные оценки параметров и управляющих параметров определяются по схеме, изложенной в работе [20].

В табл. 2 приведены используемые при интерпретации исходные данные и дополнительные априорные сведения для скважин № 1, 2.

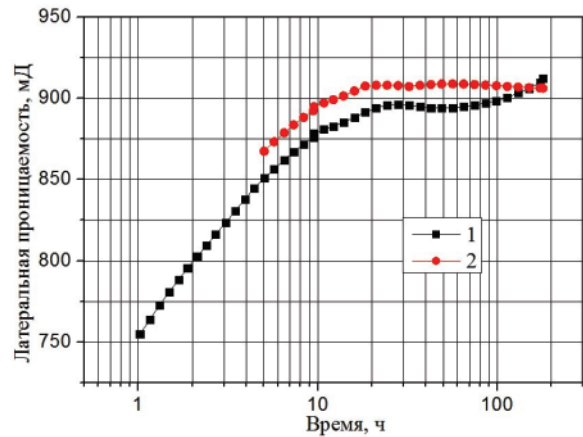


Рис. 5. Оценки латеральной проницаемости скважины № 1 (линия 1 – для полной КВД, линия 2 – для восстановленной КВД)

Fig. 5. Estimates of radial permeability of well no. 1 (line 1 – with total pressure build-up curve; line 2 – with recovered pressure build-up curve)

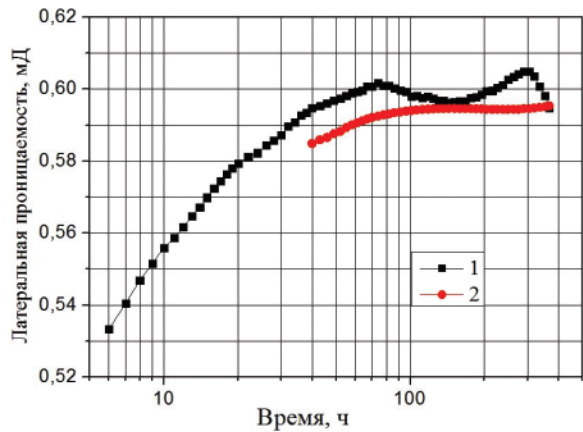


Рис. 6. Оценки латеральной проницаемости скважины № 2 (линия 1 – для полной КВД, линия 2 – для восстановленной КВД)

Fig. 6. Estimates of radial permeability of well no. 2 (line 1 – with total pressure build-up curve; line 2 – with recovered pressure build-up curve)

Таблица 2. Исходные данные и дополнительные априорные сведения по скважинам № 1, 2

Table 2. Initial and additional a priori data of wells no. 1, 2

| Исходные данные и экспертные оценки параметров пласта и скважин № 1, 2 (в системе единиц СИ) Initial data and expert estimates of reservoir and well parameters (International System of Units (SI)) | Скважина Well | |
|---|----------------------|----------------------|
| | 1 | 2 |
| Динамическая вязкость нефти, сП Dynamic viscosity of oil, cP | 3,92 | 0,54 |
| Коэффициент сжимаемости нефти, атм^{-1} Oil compressibility factor, atm^{-1} | $1,78 \cdot 10^{-4}$ | $1,95 \cdot 10^{-4}$ |
| Радиус скважины, м/Well radius, m | 0,108 | 0,108 |
| Атмосферное давление, ат/Atmosphere pressure, at | 1,033 | 1,033 |
| Температура при нормальных условия (+20 °C) К Temperature, standard conditions (+20 °C) K | 293 | 293 |
| Коэффициент сжимаемости системы, атм^{-1} System compressibility factor, atm^{-1} | $4,32 \cdot 10^{-4}$ | $1,95 \cdot 10^{-4}$ |
| Пористость/Porosity | 0,13 | 0,135 |
| Дебит скважины до остановки, $\text{м}^3/\text{сут}$ Well rate before shut-in, m^3/day | 137 | 11 |
| Экспертная оценка радиальной проницаемости Expert of radial flow permeability | – | – |

Таблица 3. Результаты интерпретации КВД скважин № 1 и 2
Table 3. Results of pressure build-up curve interpretation of wells no. 1 and 2

| КВД Pressure build-up curve | Метод Method | Сква- жина Well | Время Time | Оценки параметров пласта Estimates of reservoir parameters | | |
|--------------------------------------|-----------------|-----------------------|---------------|--|---|---|
| | | | | Латеральная проницаемость, мД Radial permeability, mD | Эффективная длина скважины, м Effective wellbore length, m | Полный скин-фактор Total skin factor |
| Полная Total | Saphir | 1 | 179 | 889 | 356 | -5,93 |
| | | 2 | 366 | 0,67 | 119 | -4,85 |
| | АИ | 1 | 32 | 896 | 369 | -5,86 |
| | | 2 | 80 | 0,60 | 115 | -5,10 |
| Восстано- вленная Recovered | Saphir | 1 | 179 | 801 | 399 | -6,35 |
| | | 2 | 366 | 0,54 | 100 | -5,10 |
| | АИ | 1 | 10 | 911 | 367 | -5,84 |
| | | 2 | 40 | 0,59 | 119 | -5,11 |

В табл. 3 приведены оценки параметров пласта и скважины, полученные к моменту времени их стабилизации с использованием программы Saphir и методом адаптивной интерпретации. Эффективная длина горизонтального ствола определяется по формуле (10), где $\alpha_{2,л,n}^*$ – оценки параметра модели линейного потока. Оценки полного скин-фактора получены из модели позднего радиального потока по формуле (11), где α_1^* , α_2^* – параметры модели позднего радиального потока.

$$L_n^* = \frac{C_r q B}{h \alpha_{2,л,n}^*} \sqrt{\frac{\mu}{\pi k_r C_l}}; \quad (10)$$

$$S_{общ}^* = 0.5 \left(\frac{\alpha_1^*}{\alpha_2^*} - 2.3 \text{Log} \left(\frac{2.25 k_{xy}}{m C_l \mu r_c^2} \right) \right). \quad (11)$$

Анализ результатов, приведенных на рис. 5, 6 и в табл. 3, показывает, что адаптивный метод ин-

терпретации КВД горизонтальных скважин на основе прогнозирующих моделей позволяет обрабатывать короткие невосстановленные КВД и определять параметры пласта и скважины, что существенно сокращает время простоя скважин. Для двух горизонтальных скважин необходимо время исследований при использовании программного комплекса Saphir составляет 545 ч. С помощью метода адаптивной интерпретации КВД достаточно 50 ч гидродинамических исследований скважин.

Выводы

Предложены модели и алгоритмы прогнозирования невосстановленного участка КВД с использованием феноменологических моделей с переменными параметрами с учетом и корректировкой дополнительной информации о пластовом давлении.

На примере обработки данных гидродинамических исследований двух горизонтальных скважин Верхнеченского нефтяного месторождения методом адаптивной интерпретации показано, что разработанные модели и алгоритмы позволяют:

- 1) прогнозировать забойное давление на невосстановленном участке КВД;
- 2) в процессе проведения исследований определять латеральную проницаемость, пластовое давление, скин-фактор, эффективную длину скважины и время завершения гидродинамических исследований в условиях отсутствия на кривой восстановления давления участка позднего радиального потока;
- 3) сократить время простоя скважин (применение метода адаптивной идентификации и интерпретации на прогнозирующих моделях для двух горизонтальных скважин позволяет сократить время простоя скважин в 10 раз с 545 до 50 ч).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Развитие геофизического и гидродинамического мониторинга на этапе перехода к разработке объектов с трудноизвлекаемыми запасами нефти / В.Г. Мартынов, А.И. Ипатов, М.И. Кременецкий, Д.Н. Гуляев, В.М. Кричевский, В.В. Кокурина, С.И. Мельников // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 3. – С. 106–109.
2. Диагностика сложных трещин в коллекторах низкой проницаемости по результатам гидродинамических исследований / А.А. Вячистая, В.В. Кокурина, М.И. Кременецкий, Е.И. Гришина, Н.А. Морозовский // Каротажник. – 2017. – № 3. – С. 38–61.
3. Bourdet D., Ayoub J.A., Pirard Y.M. Use of pressure derivative in well test interpretation // Society of Petroleum Engineers. – 1989. – № 12777. – P. 293–302.
4. Joshi S.D. Horizontal well technology. – Oklahoma: PenWell Publ. comp., 1991. – 381 p.
5. Хисамов Р.С., Сулейманов Э.И., Фархуллин Р.Г. Гидродинамические исследования скважин и методы обработки результатов измерений. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2000. – 228 с.
6. Kuchuk F.J., Onur M., Hollaender F. Pressure transient formation and well testing: Convolution, Deconvolution and Nonline Estimation. – Amsterdam: Elsevier, Developments in Petroleum Science, 2010. – 389 p.
7. Kuchuk F.J. Well testing and interpretation for horizontal wells // Journal of Petroleum Technology. – January 1995. – V. 47. – № 1. – P. 36–41.
8. Кременецкий М.И., Ипатов А.И., Гуляев Д.Н. Информационное обеспечение и технологии гидродинамического моделирования нефтяных и газовых скважин. – М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2012. – 896 с.
9. Сергеев В.Л., Донг Ван Хоанг. Адаптивная интерпретация гидродинамических исследований горизонтальных скважин с идентификацией псевдораздиального потока // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 10. – С. 67–73.
10. Пантелеев А.В., Летова Т.А. Методы оптимизации в примерах и задачах. – СПб.: Изд-во «Лань», 2015. – 512 с.
11. Sergeev V.L., Dong Van Hoang. Adaptive identification and interpretation of pressure transient tests of horizontal wells: Chal-

- enges and perspectives // Proc. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – V. 43. – № 1. – P. 1–6.
12. Хасанов М.М., Карачурин Н.А., Тяжев Е.А. Оценка извлекаемых запасов на основе феноменологических моделей // Вестник инженерного центра ЮКОС. – 2001. – № 2. – С. 3–7.
13. Мирзаджанзаде А.Х., Хасанов М.М., Бахтизин Р.Н. Моделирование процессов нефтегазодобычи. Нелинейность, неравномерность, неопределенность. – М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2005. – 368 с.
14. Соколов В.А. Эволюционные управления как феноменологические модели разработки нефтяных залежей // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. – 2006. – № 2. – С. 1–36. URL: http://ogbus.ru/authors/SokolovVA/SokolovVA_1.pdf (дата обращения 20.01.2017).
15. Clark A.J., Lake L.W., Patzek T.W. Production forecasting with logistic growth models // Society of Petroleum Engineers. – 2011. – № 144790. – P. 1–11.
16. Tsoularis A., Wallace J. Analysis of logistic growth models // Mathematical Biosciences. – 2002. – № 179. – P. 21–55.
17. Valko P.P., Lee W.J. A better way to forecast production from unconventional gas wells // Society of Petroleum Engineers. – 2010. – № 134231. – P. 1–16.
18. Yousuf W., Blasingame T.A. New models for time-cumulative behavior of unconventional reservoir-diagnostic relations, production forecasting, and EUR methods // Unconventional resources technology conference. – 2016. – № 2461766. – P. 1–24.
19. Сергеев В.Л., Нгуен К.Х., Нгуен Т.Х.Ф. Адаптивная идентификация жизненного цикла систем методом интегрированных феноменологических моделей с переменными параметрами // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 12. – С. 101–109.
20. Сергеев В.Л., Ву К.Д. Адаптивная интерпретации гидродинамических исследований с учетом влияния ствола скважины // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 9. – С. 70–77.

Поступила 02.10.2018 г.

Информация об авторах

Сергеев В.Л., доктор технических наук, профессор отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Донг Ван Хоанг, аспирант отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Фам Динь Ан, магистр отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 519.688:622.276

ADAPTIVE INTERPRETATION OF THE RESULTS OF HORIZONTAL WELL PRODUCTION TESTING USING FORECASTING MODELS

Viktor L. Sergeev¹,
SergeevVL@ignd.tpu.ru

Dong Van Hoang¹,
hoang.tpu@gmail.com

Pham Dinh An¹,
phaman.tpu@gmail.com

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

The relevance of the research is caused by the need to interpret the results of testing horizontal well in the absence of the late-time radial flow on pressure build-up curves.

The main aim of the research is to develop models and algorithms for adaptive identification and interpretation of testing horizontal wells with forecasting the late-time radial flow regime of pressure build-up curves.

The methods. The authors have used the theoretical and practical developments in the field of adaptive interpretation of well testing, optimization methods, linear algebra, current research of system analysis, identification and adaptation of system. To solve the problems of identification and forecasting, the authors used evolutionary phenomenological models of pressure build-up curves with variable time-dependent parameters taking into account additional prior information on reservoir pressure. The pressure build-up curves were interpreted on the basis of the adaptive identification method. The problems were solved using the field data of testing horizontal wells of oil fields on the pressure build-up curves.

The results. The authors investigated potentialities of evolutionary phenomenological models with variable parameters for identifying and forecasting the pressure build-up curve in the absence of the late-time radial flow regime. The results of interpretation of testing horizontal well show that the developed models and algorithms of adaptive identification and interpretation allow: reliable enough prediction of bottomhole pressure that has not recovered on the pressure build-up curve; determination of lateral permeability, skin factor, effective well length and the well shut-in time during the well testing, significant reduction of the well shut-in time.

Key words:

Interpretation, identification, adaptation, well testing, pressure build-up curve, horizontal wells, low-permeability oil reservoir, phenomenological models, a prior information.

REFERENCES

- Martynov V.G., Ipatov A.I., Kremenetskiy M.I., Gulyaev D.N., Krichevskiy V.M., Kokurina V.V., Melnikov S.I. Permanent reservoir monitoring by logging gages at the stage of tight oil recovery. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2014, no. 1, pp. 106–109. In Rus.
- Vyachistaya A.A., Kokurina B.B., Kremenetskiy M.I., Grishina E.I., Morozovskiy N.A. Diagnostic complex fractures in low-permeability reservoir based on the results of pressure transient testing. *Karotaznik*, 2017, no. 3, pp. 38–61. In Rus.
- Bourdet D., Ayoub J.A., Pirard Y.M. Use of pressure derivative in well test interpretation. *Society of Petroleum Engineers*, 1989, no. 12777, pp. 293–302.
- Joshi S.D. *Horizontal well technology*. Oklahoma, PenWell Publ. comp., 1991. 381 p.
- Khisamov R.S., Suleymanov E.I., Farkhullin R.G. *Gidrodinamicheskie issledovaniya skvazhin i metody obrabotki rezultatov izmereniy* [Hydrodynamic studies of wells and methods of processing the results of measurements]. Moscow, VNIIOENG Publ., 2000. 228 p.
- Kuchuk F.J., Onur M., Hollaender F. *Pressure transient formation and well testing: Convolution, Deconvolution and Nonlinear Estimation*. Amsterdam, Elsevier, Developments in Petroleum Science, 2010. 389 p.
- Kuchuk F.J. Well testing and interpretation for horizontal wells. *Journal of Petroleum Technology*, January 1995, vol. 47, no. 1, pp. 36–41.
- Kremenetskiy M.I., Ipatov A.I., Gulyaev D.N. *Informatsionoe obespechenie i tekhnologii gidrodinamicheskogo modelirovaniya neftnyanykh i gazovykh zalezhey* [Information and technology of hydrodynamic modeling of oil and gas deposits]. Moscow; Izhevsk, Institute of computer research Press, 2012. 896 p.
- Sergeev V.L., Dong Van Hoang. Adaptive interpretation of pressure transient tests of horizontal wells with pseudoradial flow identification. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 10, pp. 67–73. In Rus.
- Pantelev A.V., Letova T.A. *Metody optimizatsii v primerakh i zadachakh* [Optimization methods in examples and tasks]. St-Petersburg, Lan Publ., 2015. 512 p.
- Sergeev V.L., Dong Van Hoang. Adaptive identification and interpretation of pressure transient tests of horizontal wells: Challenges and perspectives. *Proc. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43, no. 1, pp. 1–6.
- Khasanov M.M., Karachurin N.A., Tyazev E.A. Estimation of recoverable resources based on phenomenological models. *Bulletin of Engineering Center YuKOS*, 2001, no. 2, pp. 3–7. In Rus.
- Mirzadzhanzade A.Kh., Khasanov M.M., Bakhtizin R.N. *Modelirovanie protsessov neftegazodobychi, Nelineynost, Neravnovesnost, Neopredelennost* [Modeling of oil and gas production processes, Nonlinearity, Nonequilibrium, Uncertainty]. Moscow; Izhevsk, Institute of Computer Science, 2005. 368 p.
- Sokolov V.A. *Evolutsionnye uravneniya kak fenomenologicheskie modeli razrabotki neftyanukh zalezhey* [Evolution equations as phenomenological models of development of oil fields]. *Neftgazovoe delo*, 2006, no. 2, p. 1–36. Available at: http://ogbus.ru/authors/SokolovVA/SokolovVA_1 (accessed at 20 January 2017).

15. Clark A.J., Lake L.W., Patzek T.W. Production forecasting with logistic growth models. *Society of Petroleum Engineers*, 2011, no. 144790, pp. 1–11.
16. Tsoularis A., Wallace J. Analysis of logistic growth models. *Mathematical Biosciences*, 2002, no. 179, pp. 21–55.
17. Valko P.P., Lee W.J. A better way to forecast production from unconventional gas wells. *Society of Petroleum Engineers*, 2010, no. 134231, pp. 1–16.
18. Yousuf W., Blasingame T.A. New models for time-cumulative behavior of unconventional reservoir-diagnostic relations, production forecasting, and EUR methods. *Unconventional resources technology conference*, 2016, no. 2461766, pp. 1–24.
19. Sergeev V.L., Nguyen Q. Huy, Nguyen T.H. Phuong. Adaptive identification of system lifecycle by the method of integrated phenomenological models with variable parameters. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 12, pp. 101–109. In Rus.
20. Sergeev V.L., Vu Quang Duc. Adaptive interpretation of the results of hydrodynamic research considering a wellbore storage. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 9, pp. 70–77. In Rus.

Received: 2 October 2018.

Information about the authors

Viktor L. Sergeev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Dong Van Hoang, postgraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

Pham Dinh An, master, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 621.311

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕГИОНАЛЬНО ОБОСОБЛЕННОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Архипова Ольга Владимировна¹,
arkh82@mail.ru

Ковалев Владимир Захарович¹,
vz_kovalev@mail.ru

Хамитов Рустам Нуриманович²,
apple_27@mail.ru

¹ Югорский государственный университет,
Россия, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16.

² Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью устранения разрыва между существующими подходами к моделированию изолированных систем электроснабжения и необходимостью учета динамических процессов в их физически разнородных подсистемах, образующих совокупность, при наличии слабых связей и слабых взаимодействий между единичными системами.

Цель исследования: сконструировать проблемно-ориентированный численный метод, непосредственно применимый к математическим моделям совокупности изолированных систем электроснабжения и существенно превосходящий по критерию «время счета – точность счета» универсальные численные методы.

Объект: электротехнический комплекс, состоящий из совокупности изолированных систем электроснабжения, объединенных слабыми связями и слабыми взаимодействиями.

Методы. При анализе формы и структуры исходной математической модели совокупности электротехнических комплексов, состоящих из изолированных систем электроснабжения, объединенных слабыми связями и слабыми взаимодействиями, и при конструировании проблемно-ориентированного численного метода использованы: энергетический подход к построению математических моделей электротехнических комплексов и систем, теория численных методов решения жестких систем дифференциальных уравнений, корректные допущения при составлении математических моделей и компьютерное моделирование.

Результаты. Введено в рассмотрение понятие «Регионально обособленный электротехнический комплекс», и выявлены его характерные признаки. Показана возможность создания новых алгоритмов управления «Регионально обособленным электротехническим комплексом», в целях снижения возможного экологического ущерба и средней расчётной себестоимости производства электроэнергии электростанциями, входящими в «Регионально обособленный электротехнический комплекс». Выявлена исходная структура математической модели «Регионально обособленного электротехнического комплекса». Показано принципиальное отличие структуры данной модели от модели в нормальной форме Коши. Обосновано принципиальное наличие свойств жесткости и сверхжесткости у анализируемого класса моделей. Сконструирован и реализован в программе ВКМ-3 проблемно ориентированный трехшаговый численный метод, применимый к исходной математической модели «Регионально обособленного электротехнического комплекса». Проведен численный эксперимент, показавший, на идеализированных математических моделях «Регионально обособленного электротехнического комплекса», существенное преимущество программы ВКМ-3, по критерию «время счета – точность счета» в области применимости.

Ключевые слова:

Регионально обособленный электротехнический комплекс, возобновляемые источники энергии, оптимизация, численные методы, энергоэффективность.

Введение

Характер развития мировой экономики в значительной мере обусловлен увеличением объемов потребления электрической энергии и экспансией сырьевых отраслей промышленности в области, удаленные от централизованного электроснабжения [1]. Соответственно возникает задача оптимального проектирования совокупностей изолированных систем электроснабжения для децентрализованных зон электроснабжения.

В первую очередь сюда относятся районы Крайнего Севера, Восточной Сибири, Дальнего Востока. Здесь добывается более 75 % российской нефти, более 90 % российского газа. Большая часть этих территорий находится в условиях децентрализованного энергоснабжения, где осуществляется жизнедеятельность более чем в 70 городах, 360 поселках и 1400 малых населенных пунктах [1, 2].

Изолированные системы электроснабжения (ИСЭ) строятся, как правило, на базе дизельных электростанций (ДЭС). Рассматриваемый класс ИСЭ характеризуется: отсутствием электрической связи с крупными энергосистемами, отсутствием электрической связи между отдельными ИСЭ, сложной логистикой доставки топлива, запасных частей и других расходных материалов. Сезонность поставок, их многоэтапность: железная дорога, речной флот, «зимники», вертолеты, автомобильный транспорт – приводят к высокой себестоимости вырабатываемой электроэнергии из-за по-

вышения транспортной составляющей стоимости топлива. Так, в прибрежной Арктической зоне цена топлива возрастает от 1,2–1,3 раза при использовании автотранспорта до 2–3 раз при использовании авиадоставок [3, 4]. Как следствие, в некоторых поселениях рассматриваемых районов себестоимость одного киловатт-часа электроэнергии зачастую превышает 25–40 р. и может достигать до 150 р. и выше [4].

В то же время регионы расположения рассматриваемого класса ИСЭ, как правило, обладают значительными ресурсами возобновляемых источников энергии (ВИЭ): ветровая энергия, гидроэнергия малых рек, геотермальная энергия, солнечная энергия и другие. При этом климатические и логистические различия отдельных зон присутствия ИСЭ определяют зачастую противоположные требования к выбору применяемого типа ВИЭ или даже к отказу от использования.

Следующая «исторически сложившаяся» особенность данных ИСЭ – обилие в одном регионе используемых типоразмеров основного оборудования и их изготовителей. Например, по данным [5], на семь ИСЭ Ленинского района Якутии приходится семь (!) типоразмеров дизель-электрических установок (ДЭУ) нескольких заводов изготовителей. При этом у пяти из семи ИСЭ фактические ежегодные выработки электроэнергии практически равны (табл. 1). Что говорит о нерациональном подходе к типизации оборудования.

Неоспоримо влияние дизельной генерации электроэнергии на экологию региона размещения и «в то же время стремление каждого предприятия самостоятельно решить означенные выше проблемы, что в целом снижает эффективность инвестиционных вложений в энергоэкологические мероприятия» [6].

Данные обстоятельства вызывают дополнительные расходы на логистику, складские запасы, обслуживание и ремонт. Как следствие – увеличенная нагрузка на бюджеты регионов и корпораций, снижение показателей энергоэффективности, негативное влияние на экологические параметры, применительно к региону размещения ИСЭ [7].

Отметим, как одно из новых направлений развития ИСЭ, применение накопителей энергии: гравитационных, кинетических, на основе сжатого воздуха, электрохимических и других [8]. Промышленное применение таких устройств в составе гибридных (сочетающих несколько физически разнородных принципов преобразования энергии) автономных электростанций пока единично.

Существует ряд специфических электротехнических комплексов, составляющих ИСЭ, для которых динамические режимы работы являются основными и обусловлены реализуемым технологическим процессом. Характерный пример такого потребителя – электротехнический комплекс буровой установки [9]. Следствие из указанного обстоятельства – либо оптимизация РОЭТК (как совокупности ИСЭ) на принципах декомпозиции си-

стемы с последующей ее обратной сборкой (как принято в настоящее время) с естественной потерей степени адекватности, либо конструирование методов, работающих с приемлемой характеристикой «время счета – точность счета». Что важно для последующей оптимизации всей РОЭТК с учетом слабых связей.

В то же время современные методики оптимизации структуры и состава ИСЭ фактически ориентированы на оптимизацию экологоэнергетических показателей единичной ИСЭ, без строгого учета взаимного влияния принимаемых проектных решений по отдельным ИСЭ. Основой таких методик служат усредненные многолетние статистические данные [5, 10–17].

Возникает задача оптимального сочетания надежной, хорошо освоенной технологии дизельной генерации электроэнергии с развивающимися технологиями использования ВИЭ [18, 19]. В настоящее время комбинированное использование этих видов энергии носит эпизодический и исследовательский характер, хотя не подлежит сомнению важная социально-экономическая роль таких подходов [3, 20, 21].

Очевидно, что утверждение 23 января 2015 г. Правительством РФ Постановления № 47 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства РФ по вопросам стимулирования использования возобновляемых источников энергии на розничных рынках электроэнергии» окажет дополнительное стимулирующее воздействие на увеличение доли ВИЭ в энергобалансах ИСЭ [22].

Указанные особенности и противоречия для своего разрешения требуют создания теории и методики проектирования оптимальных, в некотором смысле, совокупностей ИСЭ рассматриваемого класса с использованием ВИЭ.

Теория

Введем в рассмотрение следующее понятие: «Регионально обособленный электротехнический комплекс (РОЭТК)» – обособленная совокупность изолированных систем электроснабжения, характеризующаяся отсутствием электрической связи между отдельными ИСЭ, при одновременном наличии «слабых связей» и «слабых взаимодействий» между ИСЭ, входящими в данную совокупность. Причем «слабые связи» и «слабые взаимодействия» влияют как на интегральные показатели указанной совокупности (энергоэффективность, уровень экологичности производства электроэнергии, себестоимость производства электроэнергии), так и на структуру и принципы построения и функционирования каждой из изолированных систем электроснабжения данной совокупности на протяжении всего жизненного цикла.

Отметим:

- термины «слабые связи» и «слабые взаимодействия» в данном контексте соответствуют смыслу определений Б.И. Кудрина и В.К. Лозенко и коррелируются с понятием «бизнес-связи» [7];

- предложенная в данной работе формулировка понятия РОЭТК является логическим развитием работ [7, 21].

Сформулированное выше понятие РОЭТК обуславливает жесткую необходимость оптимизации всей совокупности ИСЭ, входящих в РОЭТК. В качестве критерия оптимизации может выступать энергоэффективность в сочетании с требованиями типизации, экологичности, надежности [1, 3, 5, 6, 16, 23, 24]. Обобщающими в данном случае становятся LCOE, sLCOE, LACE – «критерии, основанные на оценке средней расчётной себестоимости производства электроэнергии на протяжении всего жизненного цикла электростанции (включая все возможные инвестиции, затраты и доходы)» [25].

Таблица 1. Типоразмер ДЭС совокупности ИСЭ Ленинского района Якутии (по данным [5])

Table 1. Typical size of a diesel power plant (DPP) of the isolated electrical power supply system (IEPSS) complex of Leninsky district of Yakutia (according to [5])

| Мощность дизельной электрогенераторной установки (ДЭУ), кВт Capacity of diesel electric generating set (DES), kW | 200 | 100 | 75 | 60 | 30 | 16 | 8 | Кол-во ДЭУ, шт. Number of DES, pcs | Фактическая выработка электроэнергии, о.е. Actual output of electric power, p.u. |
|---|-----|-----|----|----|----|----|---|---------------------------------------|---|
| с. Чамча vil. Chamcha | – | 2 | – | 1 | – | – | – | 3 | 1,2 |
| с. Хамра vil. Khamra | – | 1 | 1 | 1 | 1 | – | – | 4 | 1,0 |
| с. Натора vil. Natora | 1 | 2 | – | – | – | – | – | 3 | 0,96 |
| с. Турукта vil. Turukta | – | 1 | 1 | 2 | 1 | – | – | 5 | 0,82 |
| с. Толон vil. Tolon | – | 1 | – | 2 | 1 | – | – | 4 | 0,80 |
| с. Иньялы vil. Innyaly | – | – | – | – | 2 | 1 | – | 3 | 0,42 |
| с. Алысардах vil. Alysardakh | – | – | – | – | – | – | 1 | 2 | 0,045 |

Соответственно первоочередными становятся задачи:

- выявление исходной структуры математической модели совокупности энергопреобразующих элементов РОЭТК, с учетом «слабых связей» и «слабых взаимодействий»;
- конструирование проблемно-ориентированного численного метода, применимого к исходной математической модели РОЭТК;
- проведение численного эксперимента по сравнению программных реализаций численных методов извлечения информации из исходной математической модели РОЭТК;
- построение системы географических, климатических, административных, корпоративных или иных критериев включения отдельных ИСЭ в РОЭТК;
- построение системы географических, климатических, административных, корпоративных,

экономических или иных критериев включения конкретного вида/видов ВИЭ в состав отдельной ИСЭ входящей в РОЭТК;

- построение критерия/критериев оптимальности РОЭТК;
- построение методики оптимизации РОЭТК.

Отметим, что предметом данной статьи являются первые три из указанных задач. Возможные пути решения остальных задач будут рассмотрены в последующих публикациях.

Энергетический подход к математическому моделированию электротехнических комплексов и систем, развиваемый в работе [26] и базирующийся на формализме Лагранжа, с неукоснительностью приводит к построению исходных математических моделей основных взаимодействующих физически разнородных энергопреобразующих элементов РОЭТК в следующем виде:

$$\frac{dU_*^T}{dt} = f(Q_\Sigma, Q_b, t), \quad (1)$$

$$U_*^T = U_*^T(Q_\Sigma, Q_b), \quad (2)$$

где Q_Σ и Q_b – векторы обобщенных координат и обобщенных скоростей.

Идентификацию параметров электромеханических и других компонент РОЭТК, входящих в данную модель, предлагается проводить по методикам, синтезированным на основании работ [27, 28].

Исходная форма уравнений (1), (2) для своего решения требует подстановки алгебраических уравнений (2) в уравнения (1) и соответствующего построения матрицы Якоби:

$$A(Q, Q_b) = \partial U_*^T / \partial Q_\Sigma. \quad (3)$$

Далее для перехода к модели, представленной нормальной формой Коши, необходима трудоемкая (до 90 % времени счета) операция обращения матрицы Якоби (3). Как следствие возникает необходимость конструирования специализированного численного метода, применимого к исходным уравнениям (1), (2).

Физическая разнородность взаимодействующих в РОЭТК компонент (электрические цепи, магнитные цепи, механические цепи, химические элементы, ...) приводит к наличию в математической модели различающихся на порядки постоянных времени, так называемая «жесткость» и «сверхжесткость» модели [26, 29]. Численно это явление характеризуется коэффициентом жесткости $k_{ж}$:

$$k_{ж} = \max_{1 \leq k \leq n} \tau_k / \min_{1 \leq m \leq n} \tau_m, \quad (4)$$

где n – размерность системы уравнений; τ – постоянная времени системы.

Принято считать математическую модель жесткой при $k_{ж} > 100$.

Указанное обстоятельство, в свою очередь, накладывает требования на вычислительную устойчивость применяемого для решения системы уравнений (1), (2) численного метода [26, 29, 30].

В данном направлении разработан непосредственно применимый к модели (1), (2) численный трехшаговый метод вида:

$$Q_{SUM(n+3)}(t+3h) = Q_{SUM(n)}(t) + G \left[(A\psi, A_f, h, a_{\text{неяв}})_{(n+k)}^m; \beta_{0\text{неяв}}; \beta_{1\text{неяв}}; \beta_{2\text{неяв}}; \beta_{3\text{неяв}}; a_{\text{неяв}}; h; f_n; f_{n+1}; f_{n+2}; f_{n+3} \right], \quad (5)$$

где G – функционал; $Q_{SUM(n)}$ – суммарный вектор Q_{Σ} и Q_b в момент времени t ; h – шаг интегрирования; $a_{\text{неяв}}$ и $\beta_{3\text{неяв}}$ – свободные параметры метода;

$$A_{\psi} = \frac{\partial U(Q_{SUM})}{\partial Q_{SUM}}; \quad A_f = \frac{\partial f_*^m(Q_{SUM}, t)}{\partial Q_{SUM}}$$

Предложенный метод является проблемно-ориентированным развитием группы линейных многошаговых методов [31], обладает свойством А-устойчивости и третьим порядком точности, в смысле определений работ G. Hall, J.M. Watt, E. Hairer, G. Wanner [29, 31].

Результаты вычислительных экспериментов

Сравнительная оценка вычислительных свойств метода (3) производилась на наборе тестовых математических моделей, имеющем точное решение и содержащем как модели в нормальной форме Коши, так и модели в форме (1), (2). Структура уравнений данных моделей синтезирована так, чтобы соответствовать структуре математической модели ДЭУ с асинхронной машиной в режиме генератора (АГ), при допущении о ненасыщенности магнитопровода (тест 1). Набор переменных коэффициентов в тестовой модели позволяет задавать вычислительные характеристики, соответствующие различными схемами построения ИСЭ при использовании ВИЭ [8, 10, 13–15]. Тест 2 учитывает в модели ИСЭ наличие накопителя энергии НЭ [32, 33], дополнительно к ДЭУ с АГ. Тест 3 соответствует структуре модели ИСЭ в составе: ДЭУ, АГ, НЭ и ветрогенераторной установки (ВЭУ) [16, 34]. Тесты 4, 5 эквивалентизируют вычислительные свойства математической модели гибридной ИСЭ в составе: ДЭУ, АГ, НЭ, ВЭУ, фотоэлектрическая энергоустановка (ФЭУ) и преобразователь напряжения (АС-DC-АС) соответственно [35–37]. Тесты 6, 7 – математические модели в нормальной форме Коши [29].

Характерное для математических моделей РОЭТК свойство жесткости (4) моделируется в тестах 3–5 и 7, где $k_{ж} > 100$.

Соответственно, требуются жесткоустойчивые численные методы извлечения информации из математических моделей. Для сравнительного тестирования принята версия методов Гира [30], реализованная в программе DIFSUB [38].

Предлагаемый проблемно-ориентированный численный метод (5) реализован в программе ВКМ-3. Здесь использованы принципы изменения шага интегрирования и оценки локальной и глобальной погрешностей, реализованные в программе ВКМ-2 [26] и коррелирующиеся с принципами

построения вычислительного процесса в программе DIFSUB.

Оценивалось время счета при равных заданных относительных погрешностях (критерий «время счета – точность счета»). Время счета программой ВКМ-2 принималось за единицу. Результаты сравнительного тестирования для случая заданной относительной погрешности $e < 0,01$ приведены в табл. 2.

Анализ результатов вычислительного эксперимента показал:

- программа ВКМ-3, реализующая формулу численного метода (5), эффективна на математических моделях, представленных в форме (1), (2) (задачи 1–5, табл. 2);
- преимущество программы ВКМ-3 по критерию «время счета – точность счета» зависит от коэффициента жесткости модели, ее размерности, допустимой погрешности расчета;
- программа ВКМ-3 на задачах в нормальной форме Коши (задачи 6, 7, табл. 2) преимуществ не имеет.

Таким образом, область применимости предложенного метода (5), реализованного в программе ВКМ-3, можно определить как математические модели РОЭТК в форме уравнений (1), (2).

Обсуждение результатов

Выявленный существенный признак РОЭТК – наличие «слабых связей» и «слабых взаимодействий», определяет особенности и отличия каждого регионально обособленного электротехнического комплекса в целом. Индивидуальные характеристики РОЭТК формируются значительной территориальной удаленностью от центра энергетических нагрузок ИЭС, входящих в РОЭТК. Климатические и логистические различия отдельных зон присутствия РОЭТК определяют зачастую противоположные требования к выбору типа ВИЭ внутри РОЭТК.

Таблица 2. Относительное время счёта тестовых моделей РОЭТК при допустимой погрешности $e < 0,01$

Table 2. Relative time of regionally isolated electrotechnical complex (RIEC) test models calculation with allowable error $e < 0,01$

| Тестовая модель РОЭТК (test) RIEC test model (test) | Коэффициент жесткости модели РОЭТК, $k_{ж}$ Stiffness factor of RIEC model, k_s | DIFSB | ВКМ-2 | ВКМ-3 |
|--|--|-------|-------|-------|
| 1 | 3 | 11 | 1 | 0,41 |
| 2 | 30 | 12 | | 0,43 |
| 3 | 300 | 12 | | 0,33 |
| 4 | 1600 | 10 | | 0,36 |
| 5 | 3000 | 9 | | 0,28 |
| 6 | 30 | 0,49 | | 0,75 |
| 7 | 3000 | 0,63 | | 0,71 |

Учет указанных обстоятельств в единой математической модели РОЭТК в целях последующей оценки экологических параметров и энергоэффективности всего РОЭТК в целом приводит к появле-

нию свойств жесткости и сверхжесткости математической модели (1), (2). При этом математическая модель РОЭТК имеет исходную форму, отличную от нормальной формы Коши. Условия сводимости модели (1), (2) к нормальной форме Коши, степень снижения ее адекватности при этой процедуре требует отдельного исследования.

Предложенный численный метод (5) и его программная реализация ВКМ-3, в силу «узкой» специализации на моделях вида (1), (2), имеет многократные преимущества перед универсальными программами и позволяет перейти к решению задач анализа динамических режимов работы гибридных электростанций с позиций управления сверхкраткосрочными прогнозами ресурсов ВИЭ и соответствующей оптимизации структуры РОЭТК на протяжении всего жизненного цикла.

Выводы

1. Введено в рассмотрение понятие «Регионально обособленный электротехнический комплекс

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lukutin B.V. Simulation and optimization of wind and diesel power supply systems // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – Tomsk, 2017. – P. 012090.
2. Елистратов В.В. Автономное энергоснабжение энергокомплексами на базе возобновляемых источников энергии // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2016. – № 3 (171). – С. 72–75.
3. Елистратов В.В. Энергетический, экологический и социально-экономический аспекты в энергоснабжении северных и арктических территорий РФ // Экологический вестник России. – 2017. – № 11. – С. 30–35.
4. Минин В.А., Рожкова А.А. Оценка эффективности внедрения ветроэнергетических установок на дизельных электростанциях в арктической зоне РФ // Труды Кольского научного центра РАН. – 2017. – № 1–14 (8). – С. 93–99.
5. Карамов Д.Н. Оптимизация состава оборудования автономных энергокомплексов, использующих возобновляемые источники и накопители энергии: дис.... канд. техн. наук. – Иркутск, 2016. – 152 с.
6. Балабанов М.С., Бабошкина С.В., Хамитов Р.Н. Экологические аспекты в энергосберегающей политике на этапе создания в России интеллектуальных энергосистем с адаптивной сетью // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 11. – С. 141–152.
7. Ковалев В.З., Архипова О.В. Энергетические аспекты регионально обособленного электротехнического комплекса // Вестник Югорского государственного университета. – 2015. – № S2 (37). – С. 217–218.
8. Тарасенко А.Б., Попель О.С. Подходы к оценке и примеры применимости накопителей электрической энергии для различных приложений // Возобновляемая энергетика XXI век: Энергетическая и экономическая эффективность: Материалы Международного конгресса REENCON-XXI. – М., 2016. – С. 243–249.
9. Оптимизация загрузки дизель-генераторов автономной системы электроснабжения куста буровых установок // Официальный сайт Группы Компаний «ДИАЛ». URL: <http://compensation.ru/articles/optimizatsiya-zagruzki-dizel-generatorov-avtonomnoy-sistemy-elektrosnabzheniya-kusta-burovykh-ustano> (дата обращения 29.11.2018).

(РОЭТК)» – обособленная совокупность изолированных систем электроснабжения.

2. Выявлена исходная структура математических моделей основных энергопреобразующих элементов РОЭТК, с учетом характерных «слабых связей» и «слабых влияний». Показано принципиальное отличие структуры данной модели от нормальной формы Коши.
3. Сконструирован и реализован в программе ВКМ-3 специализированный трехшаговый численный метод, применимый к исходной математической модели РОЭТК.
4. Проведен численный эксперимент, показавший на математических моделях РОЭТК существенное преимущество программы ВКМ-3, по критерию «время счета – точность счета», в области применимости.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства ХМАО-Югры в рамках научного проекта № 18-47-860017.

10. Xiaonan Wang, Ahmet Palazoglu, Nael H. El-Farra. Operation of Residential Hybrid Renewable Energy Systems: Integrating Forecasting, Optimization and Demand Response // 2014 American Control Conference (ACC). – Portland, Oregon, USA, June 4–6, 2014. – P. 5043–5048.
11. Марченко О.В., Соломин С.В. Анализ совместного использования энергии солнца и ветра в системах автономного электроснабжения // Промышленная энергетика. – 2016. – № 9. – С. 39–43.
12. Minna Ranjeva, Anil K. Kulkarni. Design Optimization of a Hybrid, Small, Decentralized Power Plant for Remote/Rural Areas // Energy Procedia. – 2012. – V. 20. – P. 258–270.
13. Суслов К.В. Развитие систем электроснабжения изолированных территорий России с использованием возобновляемых источников энергии // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т. 21. – № 5 (124). – С. 131–142.
14. Atiqur Rahman M.M., Al Awami A.T., Rahim A.H.M.A. Hydro-PV-wind-battery-diesel based stand-alone hybrid power system // International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology (ICEEICT). – Dhaka, 2014. – P. 1–6.
15. Experimental analysis of a solar PV/diesel hybrid system without storage: Focus on its dynamic behavior / D. Yamegueu, Y. Azoumah, X. Py, H. Kottin // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2013. – V. 44. – P. 267–274.
16. Kovalev V.Z., Arkhipova O.V. Structural optimization technology for fleet of wind-diesel power plants // Petroleum Engineering: scientific and technical journal. – 2014. – V. 12. – № 4. – P. 119–124.
17. Технико-экономический анализ применения ветро-дизельных электростанций для электроснабжения энергоудаленных поселений / Е.Н. Соснина, А.В. Шалухо, И.А. Липужин, Т.А. Александрова // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. – 2016. – № 1. – С. 65–72.
18. Dufo-López R., Bernal-Agustín J.L. Multi-objective optimization minimizing cost and life cycle emissions of stand-alone PV-wind-diesel systems with batteries storage // Applied Energy. – 2011. – V. 88. – P. 4033–4041.
19. Dekker J., Nthontho M., Chowdhury S. Economic analysis of PV/diesel hybrid power systems in different climatic zones of South Africa // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2012. – V. 40. – № 1. – P. 104–112.

20. Lahimer A.A., Alghoul M.A., Yousif Fadhil. Research and development aspects on decentralized electrification options for rural household // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2013. – V. 24. – P. 314–324.
21. Архипова О.В. Принципы оптимизации электроснабжения населенных пунктов крайнего севера на базе ветродизельных комплексов // *Вестник Югорского государственного университета*. – 2015. – № S2 (37). – С. 204–206.
22. О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам стимулирования использования возобновляемых источников энергии на розничных рынках электрической энергии: Постановление Правительства РФ от 23.01.2015 № 47 // *Собрание законодательства РФ*. – 2005. – № 5. – Ст. 827.
23. Hопule E., Gavrilas M., Atanasoae P. Optimal design of a hybrid distributed generation system // *49th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*. – Cluj-Napoca, 2014. – P. 1–6.
24. Decentralized energy generation for end-use applications: Economic, social and environmental benefits assessment / D.O. Akinyele, R.K. Rayudu, N.K.C. Nair, B. Chakrabarti // *Innovative Smart Grid Technologies – Asia (ISGT Asia)*, IEEE. – Kuala Lumpur, 2014. – P. 84–89.
25. Черняховская Ю.В. Эволюция методологических подходов к оценке стоимости электроэнергии. Анализ зарубежного опыта // *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*. – 2016. – № 4. – С. 56–68.
26. Ковалев В.З., Мальгин Г.В., Архипова О.В. Математическое моделирование электротехнических комплексов нефтегазодобычи в задачах энергосбережения: монография. – Ханты-Мансийск: Департамент образования и науки ХМАО-Югры, Югорский государственный университет, 2008. – 222 с.
27. Боловин Е.В., Глазырин А.С. Метод идентификации параметров погружных асинхронных электродвигателей установок электроприводных центробежных насосов для добычи нефти // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328. – № 1. – С. 123–131.
28. Ковалев В.З., Щербakov А.Г. Информационная система идентификации параметров математических моделей электротехнических комплексов // *Системы управления и информационные технологии*. – 2009. – Т. 35. – № 1. – С. 57–59.
29. Hairer E., Wanner G. *Solving Ordinary Differential Equations II: Stiff and Differential-Algebraic Problems* // *Springer Series in Computational Mathematics*. – 1996. – V. 14. – 614 p.
30. Гридин В.Н., Рыжов Н.Г., Анисимов В.И., Абухазим М.М. Методы повышения эффективности процессов моделирования динамических режимов нелинейных систем // *Информационные технологии*. – 2017. – Т. 23. – № 11. – С. 796–802.
31. Hall G. *Modern Numerical Methods for Ordinary Differential Equations* / ed. by G. Hall, J.M. Watt. – Oxford, UK: Clarendon Press, 1976. – 312 p.
32. Tremblay O., Dessaint L. Experimental validation of a battery dynamic model for EV application // *World Electric Vehicle Journal*. – 2009. – № 3. – P. 1–10.
33. Thomachan A. Kattakayam, Srinivasan K. Lead acid batteries in solar refrigeration systems // *Renewable Energy*. – 2004. – V. 29. – P. 1243–1250.
34. Musgrove P. *Wind Energy*. – Cambridge: Cambridge university press, 2010. – 323 p.
35. Salas V., Olias E. Overview of the state of technique for PV inverters used in low voltage gridconnected PV systems: Inverters above 10kW // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2011. – V. 15. – P. 1250–1257.
36. Hassaine L., Olias E., Quintero J. Overview of power inverter topologies and control structures for grid connected photovoltaic systems // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014. – V. 30. – P. 796–807.
37. Levelized cost of electricity renewable energy technologies / C. Kost, S Shammugam., V. Jülch, H.-T. Nguyen, T. Schlegl. – Freiburg: Fraunhofer institute for solar energy systems ISE, 2018. – 34 p.
38. Gear C.W. The Algorithm 407: DIFSUB for solution of ordinary differential equations // *Communications of the ACM*. – 1971. – V. 14. – № 3. – P. 185–190.

Поступила 17.12.2018 г.

Информация об авторах

Архипова О.В., старший преподаватель кафедры энергетики Югорского государственного университета.

Ковалев В.З., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой энергетики Югорского государственного университета.

Хамитов Р.Н., доктор технических наук, профессор кафедры электрической техники Омского государственного технического университета.

UDC 621.311

METHODOLOGY OF MODELING REGIONALLY ISOLATED ELECTROTECHNICAL COMPLEX

Olga V. Arkhipova¹,
arkh82@mail.ru

Vladimir Z. Kovalev¹,
vz_kovalev@mail.ru

Rustam N. Khamitov²,
apple_27@mail.ru

¹ Yugra State University,
16, Chekhov Street, Khanty-Mansiysk, 628012, Russia.

² Omsk State Technical University,
11, Mira Avenue, Omsk, 644050, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to bridge the gap between the existing approaches to modeling isolated systems of power supply considering dynamic processes in their physically diverse subsystems, in the presence of weak communications and weak interactions between single systems.

The aim of the research is to design the problem-oriented numerical method directly applicable to initial mathematical models of the isolated systems of power supply, and having advantage by criterion «counting duration – account accuracy» in relation to universal numerical methods.

Object: electrotechnical complex consisting of set of the isolated systems of power supply united by weak communications and weak interactions.

Methods. When analyzing a form and structure of initial mathematical model of set of the electrotechnical complexes consisting of the isolated systems of power supply united by weak communications and weak interactions, and when designing a problem-oriented numerical method the authors have used: power approach to mathematical modeling of electrotechnical complexes and systems, provision of theoretical bases of electrical equipment, theory of numerical methods of solution of rigid systems of the differential equations, correct assumptions by drawing up mathematical models and computer modeling.

Results. The paper introduces the concept «Regionally isolated electrotechnical complex» and the authors determine its characteristic signs. The article considers the possibility of developing new algorithms for controlling the «Regionally isolated electrotechnical complex» to decrease the possible ecological damage and average settlement cost of electric power production by the power plants included in «Regionally isolated electrotechnical complex». The authors determined the initial structure of the mathematical model of «Regionally isolated electrotechnical complex». The paper demonstrates the fundamental difference between the structure of the given model and the model in a normal form of Cauchy. Basic presence of properties of rigidity and superrigidity at the analyzed class of models is given. The authors designed and realized in the BKM-3 program the focused three-step numerical method applicable to the initial mathematical model of «Regionally isolated electrotechnical complex». The authors carried out the numerical experiment which shown the essential advantage of the BKM-3 program, by criterion «counting duration – account accuracy» in the field of applicability, on the idealized mathematical models of «Regionally isolated electrotechnical complex».

Key words:

Regionally isolated electrotechnical complex, renewable energy sources, optimization, numerical methods, energy efficiency.

The research was financially supported by the RFBR and the Government of the Khanty-Mansiysk Autonomous region-Yugra within the scientific project no. 18–47–860017.

REFERENCES

- Lukutin B.V. Simulation and optimization of wind and diesel power supply systems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Tomsk, 2017. pp. 012090.
- Elistratov V.V. Autonomous power supply by power complexes based on renewable energy sources. *Plumbing, heating, air conditioning*, 2016, no. 3 (171), pp. 72–75. In Rus.
- Elistratov V.V. Energy, environmental and socio-economic aspects in the energy supply of the northern and Arctic territories of the Russian Federation. *Ecological Bulletin of Russia*, 2017, no. 11, pp. 30–35. In Rus.
- Minin V.A., Rozhkova A.A. Evaluation of the effectiveness of introducing wind power plants on diesel power plants in the Arctic zone of the Russian Federation. *Works of the Kola peninsula Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2017, no. 1–14 (8), pp. 93–99. In Rus.
- Karamov D.N. *Optimizatsiya sostava oborudovaniya avtonomnykh energokompleksov, ispolzuyushchikh vozobnovlyemye istochniki i nakopiteli energii*. Dis. Kand. nauk [Optimization of the equipment of autonomous power complexes using renewable sources and energy storage. Cand. Diss.]. Irkutsk, 2016. 152 p.
- Balabanov M.S., Baboshkina S.V., Khamitov R.N. Environmental aspects in the energy-saving policy at the stage of development of intelligent energy systems with an actively adaptive network in Russia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 11, pp. 141–152. In Rus.
- Kovalev V.Z., Arkhipova O.V. Energy aspects of a regionally isolated electrical complex. *Bulletin of the Yugra State University*, 2015, no. S2 (37), pp. 217–218. In Rus.
- Tarasenko A.B., Popel O.S. Podkhody k otsenke i primery primenosti nakopiteley elektricheskoy energii dlya razlichnykh prilozheniy [Assessment approaches and examples of the applicability of electrical energy storage devices for various applications]. *Vozobnovlyemaya energetika XXI vek: Energeticheskaya i ekonomicheskaya effektivnost. Materialy Mezhdunarodnogo kongressa REENCON-XXI* [Renewable Energy XXI Century: Energy and Economic Efficiency. Proc. of the International Congress]. Moscow, 2016. pp. 243–249.

9. Optimizatsiya zagruzki dizel-generatorov avtonomnoy sistemy elektrosnabzheniya kusta burovykh ustanovok [Optimization of loading diesel generators of an autonomous power supply system of a drilling rig bush]. *DIAL Group of Companies*. Available at: <http://compensation.ru/articles/optimizatsiya-zagruzki-dizel-generatorov-avtonomnoy-sistemy-elektrosnabzheniya-kusta-burovykh-ustano> (accessed 29 November 2018).
10. Xiaonan Wang, Ahmet Palazoglu, Nael H. El-Farra. Operation of Residential Hybrid Renewable Energy Systems: Integrating Forecasting, Optimization and Demand Response. *American Control Conference (ACC)*, Portland, Oregon, USA, June 4–6, 2014. pp. 5043–5048.
11. Marchenko O.V., Solomin S.V. Analysis of the sharing of solar and wind energy in the systems of autonomous power supply. *Industrial Energy*, 2016, no. 9, pp. 39–43. In Rus.
12. Minna Ranjeva, Anil K. Kulkarni/ Design Optimization of a Hybrid, Small, Decentralized Power Plant for Remote/Rural Areas. *Energy Procedia*, 2012, vol. 20, pp. 258–270.
13. Suslov K.V. Development of power supply systems in isolated areas of Russia using renewable energy sources. *Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2017, vol. 21, no. 5 (124), pp. 131–142. In Rus.
14. Atiqur Rahman M.M., Al Awami A.T., Rahim A.H.M.A. Hydro-PV-wind-battery-diesel based stand-alone hybrid power system. *International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology (ICEEICT)*. Dhaka, 2014. pp. 1–6.
15. Yamegueu D., Azoumah Y., Py X., Kottin H. Experimental analysis of a solar PV/diesel hybrid system without storage: Focus on its dynamic behavior. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2013, vol. 44, pp. 267–274.
16. Kovalev V.Z., Arkhipova O.V. Structural optimization technology for fleet of wind-diesel power plants. *Petroleum Engineering: scientific and technical journal*, 2014, vol. 12, no. 4, pp. 119–124.
17. Sosnina E.N., Shaluxo A.V., Lipuzhin I.A., Aleksandrova T.A. Technical and economic analysis of the use of wind-diesel power plants for power supply of energy-remote settlements. *Proceedings of the NSTU. R.E. Alekseeva*, 2016, no. 1, pp. 65–72. In Rus.
18. Dufo-López R., Bernal-Agustín J.L. Multi-objective optimization minimizing cost and life cycle emissions of stand-alone PV-wind-diesel systems with batteries storage. *Applied Energy*, 2011, vol. 88, pp. 4033–4041.
19. Dekker J., Nthontho M., Chowdhury S. Economic analysis of PV/diesel hybrid power systems in different climatic zones of South Africa. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2012, vol. 40, no. 1, pp. 104–112.
20. Lahimer A.A., Alghoul M.A., Yousif Fadhil. Research and development aspects on decentralized electrification options for rural household. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, vol. 24, pp. 314–324.
21. Arkhipova O.V. Principles of optimization of power supply of settlements of the far north on the basis of wind-diesel complexes. *Bulletin of Yugra State University*, 2015, no. S2 (37), pp. 204–206. In Rus.
22. Postanovlenie pravitelstva RF, 23.01.2015 № 47 «O vnesenii izmeneniy v nekotorye akty Pravitelstva Rossiyskoy Federatsii po voprosam stimulirovaniya ispolzovaniya vozobnovlyаемых istochnikov energii na roznichnykh ryunkakh elektricheskoy energii [On Amendments to Certain Acts of the Government of the Russian Federation on the Promotion of the Use of Renewable Energy Sources in Retail Electricity Markets: Resolution of the Government of the Russian Federation of January 23, 2015 no 47]. *Collection of legislation of the Russian Federation*, 2005, no. 5, art. 827.
23. Hopulele E., Gavrilas M., Atanasoae P. Optimal design of a hybrid distributed generation system. *Power Engineering Conference (UPEC)*. Cluj-Napoca, 2014. pp. 1–6.
24. Akinyele D.O., Rayudu R.K., Nair N.K.C., Chakrabarti B. Decentralized energy generation for end-use applications: Economic, social and environmental benefits assessment. *Innovative Smart Grid Technologies – Asia (ISGT Asia)*, IEEE, Kuala Lumpur, 2014. pp. 84–89.
25. Chernyakhovskaya Yu.V. The evolution of methodological approaches to the assessment of the cost of electricity. Analysis of foreign experience. *Bulletin of the Ivanovo State Energy University*, 2016, no. 4, pp. 56–68. In Rus.
26. Kovalev V.Z., Malgin G.V., Arkhipova O.V. *Matematicheskoe modelirovanie elektrotekhnicheskikh kompleksov neftegazodobychi v zadachakh energosberezheniya: monografiya* [Mathematical modeling of electrical engineering complexes of oil and gas production in energy saving problems]. Khanty-Mansiysk, Department of Education and Science of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Ugra, Ugra State University, 2008. 222 p.
27. Bolovin E.V., Glazyrin A.S. Method of identification of parameters of submersible asynchronous electric motors of installations of electric drive centrifugal pumps for oil production. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 1, pp. 123–131. In Rus.
28. Kovalev V.Z., Shcherbakov A.G. Information system for identification of parameters of mathematical models of electrical systems. *Control systems and information technology*, 2009, vol. 35, no. 1, pp. 57–59. In Rus.
29. Hairer E., Wanner G. Solving Ordinary Differential Equations II: Stiff and Differential-Algebraic Problems. *Springer Series in Computational Mathematics*, 1996, vol. 14, p. 614.
30. Gridin V.N., Ryzhov N.G., Anisimov V.I., Abukhazim M.M. Methods to Boost Performance Modeling of Dynamic Modes of Nonlinear Systems. *Information Technologies*, 2017, vol. 23, no. 11, pp. 796–802. In Rus.
31. Hall G. *Modern Numerical Methods for Ordinary Differential Equations*. Eds. G. Hall, J.M. Watt. Oxford, UK, Clarendon Press, 1976. 312 p.
32. Tremblay O., Dessaint L. Experimental validation of a battery dynamic model for EV application. *World Electric Vehicle Journal*, 2009, no. 3, pp. 1–10.
33. Thomachan A. Kattakayam, Srinivasan K. Lead acid batteries in solar refrigeration systems. *Renewable Energy*, 2004, vol. 29, pp. 1243–1250.
34. Musgrove P. *Wind Energy*. Cambridge, Cambridge university press, 2010. 323 p.
35. Salas V., Olias E. Overview of the state of technique for PV inverters used in low voltage gridconnected PV systems: Inverters above 10kW. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, vol. 15, pp. 1250–1257.
36. Hassaine L., Olias E., Quintero J. Overview of power inverter topologies and control structures for grid connected photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 30, pp. 796–807.
37. Kost C., Shammugam S., Jülch V., Nguyen H.-T., Schlegl T. *Levelized cost of electricity renewable energy technologies*. Freiburg, Fraunhofer institute for solar energy systems ISE, 2018. 34 p.
38. Gear C.W. The Algorithm 407: DIFSUB for solution of ordinary differential equations. *Communications of the ACM*, 1971, vol. 14, no. 3, pp. 185–190.

Received: 17 December 2018.

Information about the authors

Olga V. Arkhipova, senior lecturer Yugra State University.

Vladimir Z. Kovalev, Dr. Sc., professor, Yugra State University.

Rustam N. Khamitov, Dr. Sc., professor, Omsk State Technical University.

УДК 539.186:537; 539.196:537; 332.34:711.144

ТРЕХМЕРНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЙ ДЛЯ КОРРЕКТИРОВКИ КАДАСТРОВОЙ СТОИМОСТИ ЗЕМЕЛЬ

Аврунев Евгений Ильич¹,

avrynev_ei@ngs.ru

Гатина Наталия Владимировна²,

www.tusia.0122@mail.ru

Козина Мария Викторовна²,

marijamkozina@gmail.com

Попов Виктор Константинович²

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
Россия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10.

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

Актуальность работы обусловлена тем, что достоверность и качество результатов кадастровой оценки земель имеет важное значение как в теоретическом плане, так и в практической деятельности. Современные процессы реформирования системы кадастровой оценки земель должны быть направлены на обеспечение интеграции пространственных данных, получаемых из различных источников, для определения факторов кадастровой стоимости, характеризующих внешнюю среду земельного участка для кадастровой оценки земель населенных пунктов.

Цель: предложить учет инженерно-геологических факторов при кадастровой оценке земель с помощью геоинформационного анализа и трехмерного-картографического моделирования процессов подтопления в границах урбанизированных территорий.

Методы: теоретический анализ изучения и обобщения, а также иные общепринятые аналитические методы, геоинформационный анализ, методы картографической визуализации данных, 3D моделирование геопространственных данных.

Результаты. На примере территории Левобережья г. Томска проведен геоинформационный анализ по данным инженерно-геологических изысканий и результатам мониторинга весеннего половодья. Результатом анализа стала электронная карта районирования территории Левобережья по категории сложности инженерно-геологических условий. В результате обоснования необходимости комплексного подхода к определению факторов стоимости для кадастровой оценки земель с учетом влияния неблагоприятных инженерно-геологических и геологических процессов и явлений была построена трехмерная цифровая модель рельефа и геологического строения территории Левобережья. С использованием предложенной модели можно решать научно-практические задачи, связанные с учетом инженерно-геологических факторов для кадастровой оценки земель, ведения единого государственного реестра недвижимости, обеспечения градостроительной деятельности и управления территориальным образованием. Таким образом, предложен подход к оценке неблагоприятных инженерно-геологических и геологических процессов и явлений для корректировки кадастровой стоимости на урбанизированных территориях.

Ключевые слова:

Кадастровая оценка, урбанизированные территории, геоинформационный анализ, трехмерное моделирование, инженерно-геологические факторы.

Введение

Мировые информационные технологии начали активно развиваться еще в начале 90-х гг. XX в. В тот период были сформированы все необходимые условия для перехода к новому этапу развития и организации механизмов управления пространственными данными. Такому переходу способствовал накопленный почти за 30-летний период опыт освоения, внедрения и широкого использования геоинформационных технологий. Так были получены первые экспериментальные инфраструктуры пространственных данных. [1]. Таким образом, национальная инфраструктура пространственных данных была создана в Америке, Австралии и в большинстве европейских стран.

В 2006 г. Правительством РФ была разработана и одобрена концепция по созданию и развитию инфраструктуры пространственных данных стра-

ны, которая позволила законодательно развивать аналогичные отечественные работы. Главной целью разработки и совершенствования инфраструктуры пространственных данных страны стало повышение качества и эффективности системы государственного управления по средствам использования достоверных оперативных и актуальных пространственных данных на всех уровнях власти для принятия управленческих решений. В 2017 г. Правительством Российской Федерации была разработана и утверждена программа [2] по созданию условий для перехода страны к цифровой экономике, где важную роль играют пространственные данные. Хотелось бы коснуться отдельных задач, стоящих в развитии цифровой экономики, касающихся пространственных данных. В настоящее время в России многие органы исполнительной власти создают и используют пространственные

данные. Таким примером служат федеральные информационные системы, такие как Единый государственный реестр недвижимости, который публикует пространственные данные об объектах недвижимости по средствам Публичной кадастровой карты. А примером муниципальных информационных систем является информационная система обеспечения градостроительной деятельности (ИСОГД). ИСОГД Муниципального образования «Город Томск» обеспечивает свободный доступ к базовым пространственным данным через сервисы в сети Интернет в режиме on-line.

Подобная информация крайне востребована и создает условия для формирования благоприятного инвестиционного климата в муниципальных образованиях. В области учета земель и развития современного института оценки земель РФ также важны механизмы интеграции и совместное использование пространственных данных.

Современная методика кадастровой оценки земель населенных пунктов, теория и практика которой до сих пор является проблемной задачей [3, 4], не учитывает целый ряд природных условий, в которых функционируют объекты недвижимости, в том числе неблагоприятные инженерно-геологические и геологические процессы и явления. Современные процессы реформирования системы кадастровой оценки земель должны быть направлены на обеспечение интеграции пространственных данных, получаемых из различных источников, для определения факторов кадастровой стоимости, характеризующих внешнюю среду земельного участка для кадастровой оценки земель населенных пунктов. В современных условиях используемые данные об объектах оценки, о состоянии рынка недвижимости и о факторах, оказывающих влияние на формирование кадастровой стоимости объекта недвижимости, несопоставимы и не скоординированы между собой в едином геопространстве, что исключает их совместное и комплексное использование.

Результатом чего стало отсутствие единого информационного пространства обо всех элементах городского пространства и природных условиях, которые оказывают существенное влияние на условия землепользования, а следовательно, на стоимость земельных участков.

Неблагоприятные природные условия

Современные процессы по «цифровизации» России определяют первоочередное развитие геоинформационных технологий и использование пространственных данных, поскольку без актуальных и точных знаний о территории, ее природных особенностях и рельефе невозможно устойчивое экономическое и социальное развитие.

Согласно принципам государственной политики, в отношении рассматриваемого аспекта развитие такой инфраструктуры способствует созданию условий для повышения конкурентоспособности регионов, в том числе и решению вопросов социального развития.

Так, в Стратегии социально-экономического развития РФ, Томской области [5] и других регионов большое внимание уделяется повышению уровня и качества жизни населения, в том числе сбалансированному территориальному развитию. Уровень жизни населения является материальной основой качества жизни, который определяется совокупностью условий человеческого существования. К таким условиям в первую очередь необходимо отнести уровень развития социальной и транспортной инфраструктуры, включающий жилой фонд, объекты социально-бытового обслуживания, степень обеспеченности современными удобствами, уровень благоустройства территории, наличие объектов инженерной инфраструктуры, образования, здравоохранения, культуры, отдыха и др.

Таким образом, можно сделать вывод, что показатели уровня и качества жизни населения призваны раскрывать и определять степень развития социально-экономических отношений. Благоприятные условия для жизнедеятельности населения обеспечивают социально-экономическое развитие образований, тем самым способствуют развитию человеческого капитала и повышению конкурентоспособности регионов и муниципальных образований.

В последнее время в связи с возрастающей инженерно-хозяйственной деятельностью человека возникают в геологической среде неблагоприятные процессы и явления, такие как оползни, землетрясения, карст, сели и др.

Количество таких негативных природных процессов и явлений на территории РФ возрастает. К примеру, оползнеопасные районы занимают около 40 % площади России и развиваются на территории 725 городов. А эрозионные процессы в настоящее время развиваются на 56 % площади сельхозугодий РФ.

По данным Росгидромета в России происходит 40–70 крупных наводнений ежегодно [6]. В результате неблагоприятным природным процессам и явлениям подвержены сотни городов, десятки тысяч населенных пунктов, а также более 7 млн га сельскохозяйственных угодий.

Последствия от наводнений экспертами оцениваются в 40 млрд р. (в том числе в бассейнах рек Амур, Обь, Терек, Дон, Кубань, Лена, Волга, и прочих).

Ежегодно в России на крупных реках возникают паводки. В результате проведенного исследования Всероссийским научно-исследовательским институтом гидрометеорологической информации – Мировым центром данных (ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»), было установлено, что общее число опасных гидрологических явлений (наводнений, паводков и селей) в России за первое десятилетие XXI в. с 1990 г. выросло в 1,5 раза.

Таким образом, комфортность проживания определяется совокупностью различных факторов, ключевыми из которых являются инженерно-геологические. Следовательно, кадастровая стои-

мость объектов недвижимости также должна зависеть от уровня комфортности [7–10], в том числе от наличия неблагоприятных инженерно-геологических и геологических процессов и явлений, так как землепользователи и землевладельцы несут затраты, связанные с предупреждением и ликвидацией их последствий.

Такая взаимосвязанность должна быть учтена при определении кадастровой стоимости и расчете налога на недвижимое имущество. В интересах эффективности проведения кадастровой оценки земель и создания эффективной кадастровой системы для определения инженерно-геологических факторов кадастровой стоимости предлагается создание электронных карт населенных пунктов, в которых проводилось бы районирование территории по категориям сложности инженерно-геологических условий на основании определенных границ распространения неблагоприятных инженерно-геологических и геологических процессов и явлений.

В настоящее время разработано достаточно много классификаций неблагоприятных инженерно-геологических и геологических процессов и явлений. Для решения задач научно-обоснованного подхода определения кадастровой стоимости земель населенных пунктов предлагается использовать классификацию В.Д. Ломтадзе, представленную на рис. 1.

Создание электронной карты населенного пункта и его районирование по категориям сложности инженерно-геологических условий и их оценки представляется возможным и более эффективным с использованием геоинформационного анализа и трехмерных геопространственных данных [11–14]. Такой подход позволит получать актуальные сведения об инженерно-геологических факторах для их учета при кадастровой оценке земель населенных пунктов.

Кадастровая оценка земель населенных пунктов должна рассматриваться как система, обеспечивающая комплексное исследование влияния социальных, экологических и экономических факторов, способствующая оптимизации и формированию адаптационной информационной модели земельных ресурсов города в условиях интенсивного антропогенного воздействия. Важность научно-обоснованного определения кадастровой стоимости обусловлена тем, что размер платежей за земельные участки в соответствии с действующим законодательством определяется исходя из их кадастровой стоимости.

Геоинформационный анализ урбанизированной территории

В течении последних десятилетий на территории г. Томска были проведены многочисленные исследования геологических, инженерно-геологи-

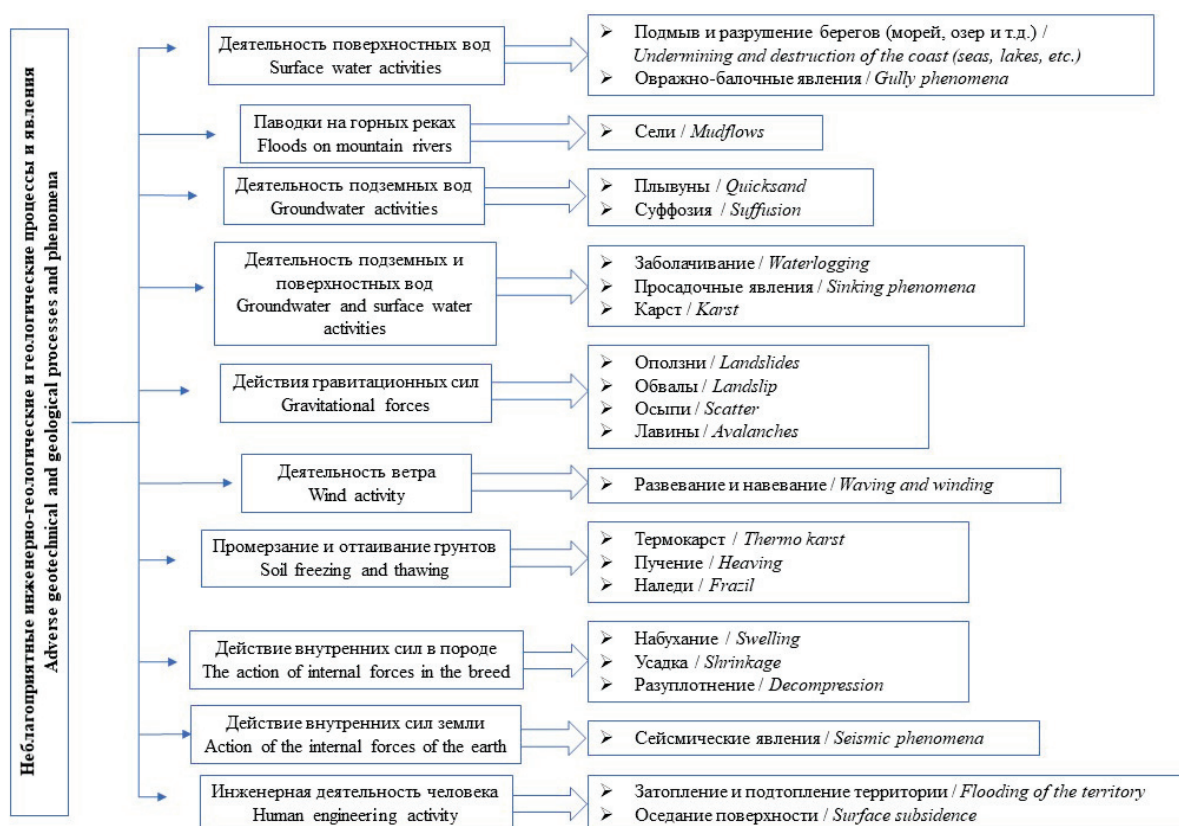


Рис. 1. Классификация неблагоприятных инженерно-геологических и геологических процессов и явлений по В.Д. Ломтадзе

Fig. 1. Classification of adverse geotechnical and geological processes and phenomena according to V.D. Lomtadze

ческих физико-географических, гидрологических и гидрогеологических условий (В.Е. Ольховатенко, М.Г. Рутман, В.М. Лазарев, Л.А. Строкова, В.К. Попов, О.Д. Лукашевич, В.А. Коробкин, О.Г. Савичев, Е.М. Дутова, А.В. Леонова, В.Д. Покровский и др. [15–21]). В результате был накоплен большой объем данных, характеризующих развитие различных негативных физико-геологических процессов и явлений изучаемой территории. Таким образом определено, что на территории города достаточно активно проявляются неблагоприятные инженерно-геологические и геологические процессы и явления.

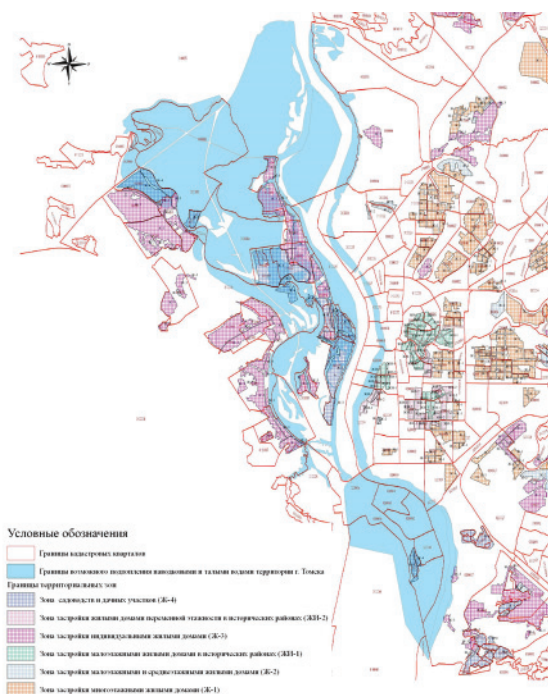
Одной из таких территорий города является территория Левобережья. В период весеннего половодья, обильных дождей в осенне-летний период пониженные части рельефа подвергаются подтоплению. Сельские поселения Тимирязево, Дзержинское, Эушта, Нижний склад, Заречный, расположенные на рассматриваемой территории в 2004 г. получили статус городского округа и были включены в границы города Томска. Территория Левобережья обладает достаточно высоким потенциалом для планировочного развития и является перспективным направлением развития города. В геоморфологическом отношении Левобережье расположено в долине р. Томи, приурочено к левобережной пойме, а также является частью ландшафта Обь-Томского междуречья, в границах которого эксплуатируется Томский подземный водозабор. Большая часть поймы реки Томи, в том чи-

сле и территория Левобережья, подвержена затоплению в период весеннего половодья. Часть территории занята садоводческими товариществами. Сегодня рассматриваемая территория начинает активно застраиваться.

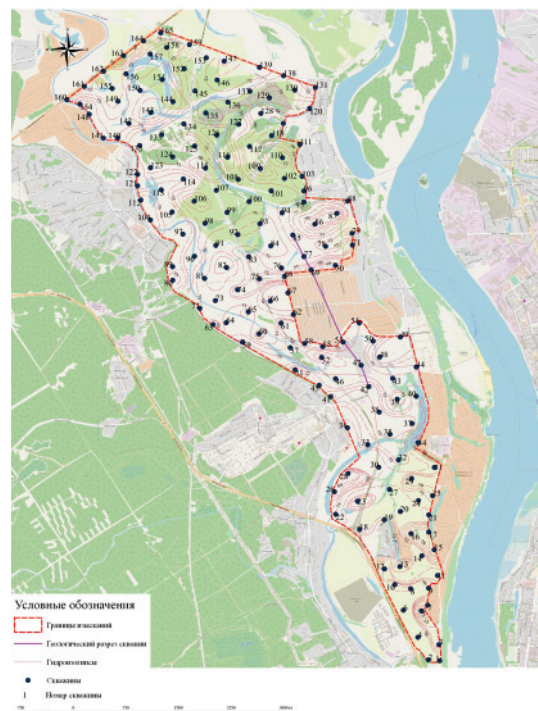
В связи с этим возникает необходимость определения объективных инженерно-геологических факторов, оказывающих влияние на эффективность землепользования и на кадастровую стоимость земельных участков [22].

Для проведения геоинформационного анализа [23–27] рассматриваемой территории были использованы результаты дистанционного зондирования и моделирования прохождения паводка в г. Томске [28] и возможные границы затопляемых территорий (рис. 2, а), для разных отметок уровня паводковых вод выполненные ИТЦ «СКАНЭКС» (г. Москва) совместно с МЧС и Администрацией г. Томска. А также результаты инженерно-геологических изысканий (рис. 2, б), выполненных отделом изысканий ООО «Проектно-изыскательский институт транспортной инфраструктуры «Индор-Проект» и отделом изысканий Филиала ОАО «НИКИМТ-Атомстрой» ТПИИ ВНИПИЭТ.

Для объединения и совместной обработки таких данных и выполнения работ по районированию территории Левобережья по категории сложности инженерно-геологических условий нами был разработан геоинформационный проект в среде QGIS.



а/а



б/б

Рис. 2. а) Кадастровый план территории г. Томска с отображением границ зон возможного затопления паводковыми и талыми водами; б) карта гидрозооцены

Fig. 2. а) Cadastral plan of Tomsk territory imaging the boundaries of possible floodwater and meltwater flooding zones; б) depth to water map

Таблица. Характеристика природных условий территорий по категории сложности инженерно-геологических условий
Table. Specification of environmental and planning circumstances according to the category of complexity of engineering and geological conditions

| Инженерно-геологические факторы Geotechnical factors | Категория сложности инженерно-геологических условий Category of complexity of engineering geological conditions | | |
|---|--|---|---|
| | I (простая)/(simple) | II (средняя)/(average) | III (сложная)/(complex) |
| Глубина залегания безнапорных водоносных горизонтов, м Depth of unconfined aquifers, m | >4 | 2-4 | <2 |
| Затопляемость (обеспеченность, %) Flooding (security, %) | один раз в 100 лет (1 %) once in 100 years (1 %) | между линиями затопления, повторяющимися один раз в 100 лет (1 %) и один раз в 25 лет (4 %) с наивысшим горизонтом высоких вод не более 0,6 м between the lines of flooding, repeating once every 100 years (1 %) and once every 25 years (4 %) with the highest horizon of high waters not more than 0,6 m above ground level | один раз в 25 лет и чаще (≥4 %) once in 25 years and more often (≥4 %) |

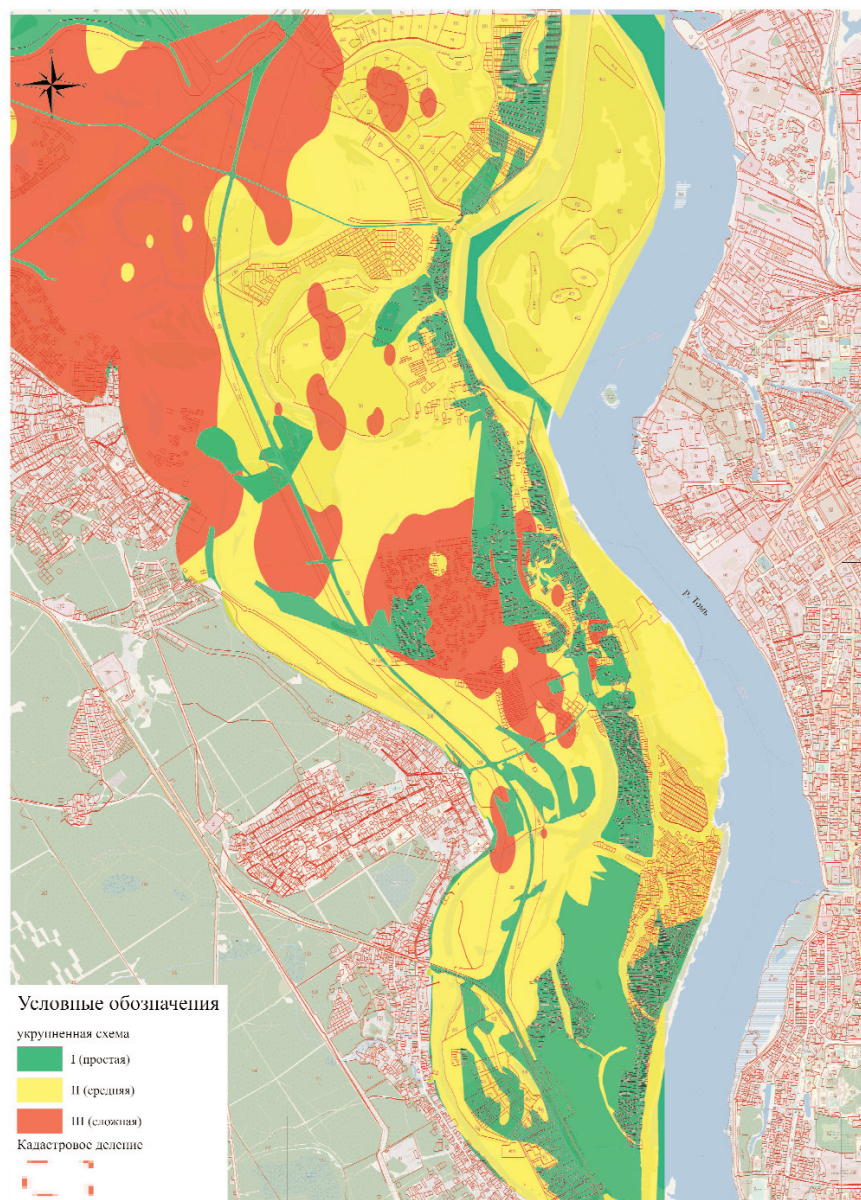


Рис. 3. Электронная карта районирования территории Левобережья по степени сложности инженерно-геологических условий

Fig. 3. Electronic map of zoning Levoberezhnye according to the degree of complexity of engineering and geological conditions

Геологические условия рассматриваемой территории характеризуются наличием грунтовых вод. На данную территорию была составлена карта гидроизогипс, которая показала, что на некоторых участках (в низинах, вблизи поверхностных водоемов и водотоков и др.) положение уровня подземных вод выше критического (в соответствии с СП 11–105–97) (рис. 2, б). Грунтовые воды встречаются на глубине от 1,7 до 7,5 м. Водовмещающими грунтами служат песчаные и гравийно-галечниковые отложения.

Полученная карта положения грунтовых вод была сопоставлена и скоординирована в едином геопространстве с границами зон возможного затопления паводковыми и тальми водами. В результате чего было проведено районирование территории исследования, результатом которого стало выделение трех районов. Характеристика районов по категории сложности инженерно-геологических условий представлена в таблице.

С помощью применения инструментария «интерполяция» с использованием известных значений глубины залегания грунтовых вод и границ возможного затопления территории для разных отметок уровня паводковых вод (определенных по средствам мониторинга паводковой ситуации [28]) нами была получена электронная карта (рис. 3) с определенными районами, характеризующими неблагоприятные инженерно-геологические и геологические процессы (подтопление, затопление) территории по категории сложности инженерно-геологических условий.

Для анализа условий землепользования территории Левобережья полученное районирование было совмещено с картой кадастрового деления территории и границами территориальных зон, которые имеют определяющее значение.

В результате было определено, что 32 % площади территории зоны Ж-4, в границах которой осуществляется использование земель для садо-

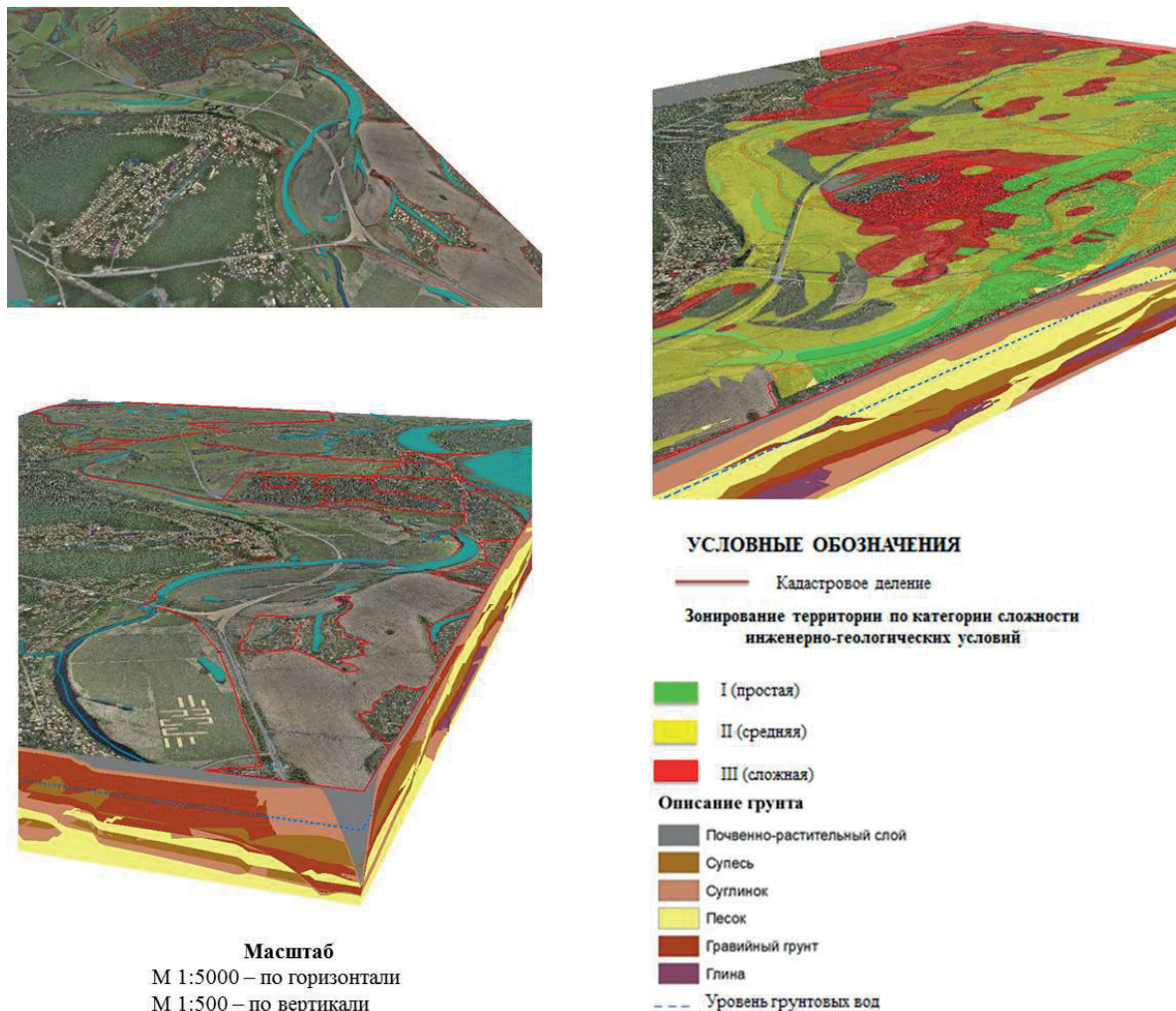


Рис. 4. Трехмерная цифровая модель рельефа и геологического строения территории Левобережья: а) с нанесенным на поверхность кадастровым делением территории; б) с нанесенным на поверхность зонированием территории Левобережья по степени сложности инженерно-геологических условий

Fig. 4. 3D digital model of relief and geological constitution of Levoberezhye: a) with marked cadastral area division; b) with marked zoning of Levoberezhye area according to the degree of complexity of engineering and geological conditions

водства и огородничества, находится в сложных инженерно-геологических условиях, где уровень грунтовых вод находится на глубине менее 2 м и территория подвержена ежегодному подтоплению. А площадь территориальной зоны Ж-3, которая в основном представлена застройкой индивидуальными жилыми домами, в той же категории сложности составляет 2,6 %. Вся подтапливаемая территория расположена в границах 28 кадастровых кварталов г. Томска. Полученные результаты означают, что исследуемая территория подвержена распространению неблагоприятных инженерно-геологических и геологических процессов и явлений, которые оказывают значительное влияние на условия землепользования.

3D визуализация природных условий территории Левобережья г. Томска

В результате обоснования необходимости комплексного подхода к проведению факторного анализа для государственной кадастровой оценки земель урбанизированной территории с учетом инженерно-геологических факторов была построена трехмерная модель территории Левобережья. Модель реализована в среде ArcGIS и наглядно отображает реальные геологические условия территории и объединяет большое число различных слоев (рис. 4). Поверхность территории представлена ортофотоснимками, выполненными при аэро съемке г. Томска в период 2014–2015 гг. администрацией г. Томска.

Функции 3D-моделирования была реализована в среде ArcGIS с использованием модуля ArcScene. Для создания пространственной модели были построены интерполированные поверхности всех слоев грунта, определенных в результате инженерных изысканий, представленных в виде Grid или TIN поверхностей с разрешением «1yr».

С помощью инструмента «интерполяция» (кригинг) были созданы все имеющиеся поверхности в геологическом разрезе. Далее был использован модуль ArcScene, позволяющий совмещать множество слоев данных в 3D среде. ArcScene полностью интегрирован в среду геообработки, что дает возможность использовать многочисленные аналитические инструменты и функции.

Заключение

Полученная трехмерная модель позволяет создать максимально точную модель территории и ее геологического строения, которая обладает следующим рядом существенных преимуществ по срав-

нению с моделями, которые используются в настоящее время:

1. Является метрической, построенной в единой системе координат, которая может задаваться пользователем исходя из класса решаемых научно-практических задач (для ведения единого государственного реестра недвижимости, для обеспечения градостроительной деятельности, для управления территориальным образованием). Следовательно, она позволяет определять метрические характеристики объектов недвижимости и их геопропространственное положение в территориальном образовании.
2. Позволяет представить результаты инженерно-геологических изысканий в более полном и информативном виде и наглядно сопоставить их с условиями землепользования территории, а также с границами земельных участков и кадастрового квартала.
3. С позиций системного подхода позволяет корректировать кадастровую стоимость объектов недвижимости с учетом инженерно-геологических факторов, что необходимо и актуально для создания социально-справедливой и научно-обоснованной налогооблагаемой базы в Российской Федерации.

Выводы

Такой подход позволяет интегрировать полученные сведения о границах районов различной категории сложности инженерно-геологических условий (неблагоприятных инженерно-геологических и геологических процессов и явлений) в базу данных Единого государственного реестра недвижимости. Эта информация может быть представлена в качестве семантических и графических сведений в раздел дополнительных характеристик о земельных участках для их использования при определении и корректировке кадастровой стоимости земельных участков. Таким образом, предложенная методика визуализации результатов инженерно-геологических изысканий с использованием специализированных программ позволит развить национальную инфраструктуру пространственных данных и даст возможность осуществить интеграцию полученных пространственных данных с данными, содержащимися в государственных информационных ресурсах, что позволит устанавливать научно-обоснованную кадастровую стоимость с учетом инженерно-геологических факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кошкарёв А.В., Ряховский В.М., Серебряков В.А. Инфраструктура распределенной среды хранения, поиска и преобразования пространственных данных // Открытое образование. – 2010. – № 5. – С. 61–73.
2. Указ Президента Российской Федерации № 203 от 09.05.2017 г. «О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы» // Собрание законодательства РФ. – 2006. – № 35. – Ст. 3775.
3. Ecologization of water-land property matters on the territory of the Tom lower course / V.K. Popov et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – V. 33: Contemporary Issues of Hydrogeology, Engineering Geology and Hydrogeoeology in Eurasia. – 2016. – 012057. – 5 p.
4. Попов В.К., Козина М.В. Экологизация кадастровой оценки земель для устойчивого развития урбанизированных территорий // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 11. – С. 98–105.

5. Стратегия социально-экономического развития Томской области до 2030 года. Приложение к постановлению Законодательной Думы Томской области от 26.03.2015 № 2580. URL: <http://old.duma.tomsk.ru/page/29000/> (дата обращения 15.11.2018).
6. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). URL: <http://www.meteo.ru> (дата обращения 15.11.2018).
7. Козочкина Е.А. Совершенствование методического обеспечения кадастровой оценки объектов недвижимости: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2018. – 24 с.
8. Попп Е.А. Разработка методики оценки влияния экологической составляющей на кадастровую стоимость земельных участков (на примере города Бийска): автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2015. – 24 с.
9. Подрядчикова Е.Д. Разработка методики земельно-оценочных работ на основе геоинформационного анализа социально-территориальных взаимосвязей элементов городской инфраструктуры: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2015. – 24 с.
10. Кочетова В.А. Кадастровая оценка городских земель на основе учета экологических факторов // Science Time. – 2015. – № 12 (24). – С. 422–425.
11. Аврунев Е.И. Технологические аспекты построения 3D-модели инженерных сооружений в городах Арктического региона РФ // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 7. – С. 131–137.
12. Karpik A.P., Avrunev E.I., Truhanov A.E. To the question of geodetic and cartographic provision of cadastral register // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – № 10 (18). – P. 39601–39602.
13. Application of laser scanning for developing a 3D digital model of an open-pit side surface / V.N. Oparin, V.A. Seredovich, V.F. Yushkin, A.V. Ivanov, S.A. Prokopenko // Journal of Mining Science. – 2007. – № 43 (58). – P. 545–554.
14. Ying S., Guo R., Li L. Implementation of 3D cadastre with 3DGIS: Practices and challenges // Journal of Geomatics. – 2018. – № 43 (2). – P. 1–6.
15. Ольховатенко В.Е., Рутман М.Г., Лазарев В.М. Опасные природные и техноприродные процессы на территории г. Томска и их влияние на устойчивость природно-технических систем. – Томск: Печатная мануфактура, 2005. – 151 с.
16. Строкова Л.А. Инженерно-геологическое районирование территории Томского Приобья по степени устойчивости геологической среды к техногенной нагрузке: автореф. дис. ... канд. наук. – Томск, 1997. – 20 с.
17. Попов В.К., Лукашевич О.Д., Коробкин В.А. Эколого-экономические аспекты эксплуатации подземных вод Обь-Томского междуречья. – Томск: Изд-во Томского государственного архитектурно-строительного университета, 2003. – 174 с.
18. Spatial patterns of the evolution of the chemical composition and discharge of river water in the Ob River basin / O.G. Savichev et al. // Doklady Earth Sciences. – 2016. – V. 466. – Iss. 1. – P. 59–63.
19. Hydrogenous mineral neof ormations in Tomsk water intake facility from underground sources / E.M. Dutova et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – V. 33: Contemporary Issues of Hydrogeology, Engineering Geology and Hydrogeocology in Eurasia. – 2016. – 012017. – 6 p.
20. Geotechnical properties of gullying in Tomsk Oblast / A.V. Leonova et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – V. 43: Problems of Geology and Subsurface Development. – 2016. – 012037. – 4 p.
21. Информационно-поисковая система оценки степени подтопленности территории города Томска / В.Д. Покровский и др. // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. – № 1 (48). – С. 172–181.
22. Аврунев Е.И., Козина М.В., Попов В.К. Исследование факторов стоимости земель урбанизированных территорий // Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий. – 2018. – № 2 (23). – С. 130–143.
23. Карпик А.П., Хорошилов В.С. Сущность геоинформационного пространства территорий как единой основы развития государственного кадастра недвижимости // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 2/1. – С. 134–136.
24. Попп Е.А. Геоинформационный анализ влияния экологической составляющей на кадастровую стоимость объектов недвижимости // Инновации и ГИС-технологии для развития территорий: материалы междунар. конф. – Усть-Каменогорск: Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева, 2014. – С. 67–74.
25. Karpik A.P., Musikhin I.A. Research and practical trends in geospatial sciences // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information. – 2016. – № 41. – P. 177–184.
26. Ledoux H., Meijers M. Topologically consistent 3D city models obtained by extrusion // International Journal of Geographical Information Science. – 2011. – № 25 (4). – P. 557–574.
27. Ying S., Li L., Guo R. Building 3D cadastral system based on 2D survey plans with SketchUp // Geo-Spatial Information Science. – 2011. – № 14 (2). – P. 129–136.
28. Сидоренко С.В., Романцов А.Д. Спутниковый мониторинг паводка на реке Томь // Земля из космоса: наиболее эффективные решения. – 2010. – № 6. – С. 70–77.

Поступила 23.11.2018 г.

Информация об авторах

Аврунев Е.И., кандидат технических наук, доцент кафедры кадастра и территориального планирования Сибирского государственного университета геосистем и технологий.

Гатина Н.В., аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Козина М.В., старший преподаватель отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Попов В.К., доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 539.186:537; 539.196:537, 332.34:711.144

3D VISUALIZATION OF ADVERSE NATURAL CONDITIONS FOR ADJUSTMENT OF LAND CADASTRAL VALUE

Evgeny I. Avrunev¹,

avrynevei@ngs.ru

Nataliya V. Gatina²,

www.tusia.0122@mail.ru

Mariya V. Kozina²,

marijamkozina@gmail.com

Viktor K. Popov²

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies,
10, Plakhotny street, Novosibirsk, 630108, Russia.

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

The research is relevant due to the fact that cadastral valuation of land is concerned to be an important part of land plots management. Thus, accuracy and quantity of its results are of great importance for scientific methodological fundamentals of valuation as well as for practice. Being reformed, the system of cadastral valuation of land is not able to provide integration and sharing data from various sources.

The aim of the research is to suggest accounting for adverse geotechnical conditions at cadastral valuation of land with the help of geoinformational analysis and 3D cartographic modeling of flooding within the boundaries of urban land.

The applied methods: theoretical analysis, methods of research, generalization and other established analytical methods, geoinformational analysis, methods of cartographic data visualization, 3D modeling of geospatial data.

Results. On the example of Levoberezhnye area in Tomsk the authors have carried out the geoinformational analysis on the basis of geotechnical research and spring flood monitoring. The analysis results in outline sketch map of zoning Levoberezhnye according to the most favorable hydrological conditions. Specifying the need for the integrated approach to determine the factors of cadastral value, which include the influence of hydrological conditions, resulted in 3D digital modeling of relief and geological constitution of Levoberezhnye area. This modeling is able to meet the scientific and practical challenge of accounting for adverse geotechnical conditions of cadastral valuation, keeping the unified state register of immovable property, urban planning and managing territorial entity. Thus the authors proposed the approach to evaluation of negative geotechnical processes and phenomena progressing in urban areas for adjustment of cadastral value.

Key words:

Cadastral valuation, urban areas, geoinformational analysis, 3D modeling, geotechnical conditions.

REFERENCES

1. Koshkarev A.V., Ryakhovskiy V.M., Serebryakov V.A. Infrastruktura raspredelennoy sredy khraneniya, poiska i preobrazovaniya prostranstvennykh dannykh [Infrastructure of Distributed Environment of Spatial Data Storage, Search and Processing]. *Otkrytoe obrazovanie*, 2010, no. 5, pp. 61–73.
2. Ukaz Prezidenta Rossiyskoy Federatsii № 203 ot 09.05.2017 g. «O Strategii razvitiya informatsionnogo obshchestva v Rossiyskoy Federatsii na 2017–2030 gody» [On the Strategy for the Development of the Information Society in the Russian Federation for 2017–2030]. *Sobranie zakonodatelstva RF*, 2006, no. 35, articles 3775.
3. Popov V.K., Kozina M.V., Levak Yu.Yu., Shvagrugova E.V. Ecologization of water-land property matters on the territory of the Tom lower course. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 33, 012057, 5 p.
4. Popov V.K., Kozina M.V. Ecologization of cadastral valuation of lands for sustainable development of urbanized lands. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 11, pp. 98–105.
5. *Strategiya sotsialno-ekonomicheskogo razvitiya Tomskoy oblasti do 2030 goda. Prilozhenie k postanovleniyu Zakonodatelnoy Dumy Tomskoy oblasti ot 26.03.2015 № 2580* [Strategy of social and economic development of Tomsk region till 2030. Application to the order of Legislation Duma of Tomsk region, 26.03.2015 no. 2580]. Available at: <http://old.duma.tomsk.ru/page/29000/> (accessed 15 November 2018).
6. *Federalnaya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchey sredy (Rosgidromet)* [Federal service on hydrometeorology and monitoring of environment (Rosgidromet)]. Available at: <http://www.meteorf.ru> (accessed 15 November 2018).
7. Kozochkina E.A. *Sovershenstvovanie metodicheskogo obespecheniya kadastrvoy otsenki obektov nedvizhimosti*. Avtoreferat Kand. nauk [Perfection of methodical support of cadastral valuation of real estate objects. Cand. Diss. Abstract]. Novosibirsk, 2018. 24 p.
8. Popp E.A. *Razrabotka metodiki otsenki vliyaniya ekologicheskoy sostavlyayushchey na kadastrvuyu stoimost zemelnykh uchastkov (na primere goroda Biyska)*. Avtoreferat Kand. nauk [Development of a methodology for assessing the impact of the environmental component on the cadastral value of land plots (on the example of Biysk). Cand. Diss. Abstract]. Novosibirsk, 2015. 24 p.
9. Podryadchikova E.D. *Razrabotka metodiki zemelno otsenochnykh rabot na osnove geoinformatsionnogo analiza sotsialno territorialnykh vzaimosvyazey elementov gorodskoy infrastruktury*. Avtoreferat Kand. nauk [Development of the methodology of land-valuation work on the basis of geoinformation analysis of socio-ter-

- ritorial interrelations of the elements of urban infrastructure. Cand. Diss. Abstract]. Novosibirsk, 2015. 24 p.
10. Kochetova V.A. Kadastravaya otsenka gorodskikh zemel na osnove ucheta ekologicheskikh faktorov [Cadastral valuation of urban land based on environmental factors]. *Science Time*, 2015, no. 12 (24), pp. 422–425.
 11. Avrunev E.I., Chernov A.V., Dubrovsky A.V., Komissarov A.V., Pasechnik E.Yu. Technological aspects of constructing 3d model of engineering structures in the cities of the RF arctic region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 7, pp. 131–137. In Rus.
 12. Karpik A.P., Avrunev E.I., Truhanov A.E. To the question of geodetic and cartographic provision of cadastral register. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2015, no. 10 (18), pp. 39601–39602.
 13. Oparin V.N., Seredovich V.A., Yushkin V.F., Ivanov A.V., Prokopenko S.A. Application of laser scanning for developing a 3D digital model of an open-pit side surface. *Journal of Mining Science*, 2007, no. 43 (58), pp. 545–554.
 14. Ying S., Guo R., Li L. Implementation of 3D cadastre with 3D GIS: Practices and challenges. *Journal of Geomatics*, 2018, no. 43 (2), pp. 1–6.
 15. Olkhovatenko V.E., Rutman M.G., Lazarev V.M. *Opasnye prirodnye i tekhnoprirodnye protsessy na territorii g. Tomsk i ikh vliyaniye na ustoychivost prirodno-tekhnicheskikh sistem* [Natural and technonatural hazardous processes in the city of Tomsk and their influence on the strength of natural and technical systems]. Tomsk, Pechatnaya Manufaktura Publ., 2005. 151 p.
 16. Strokova L.A. *Inzhenerno-geologicheskoe rayonirovanie territorii Tomskogo Priobya po stepeni ustoychivosti geologicheskoy sredy k tekhnogennoy nagruzke*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Engineering-geological zoning of the Tomsk Ob area in terms of the degree of stability of the geological environment to the technogenic load. Cand. Diss.]. Tomsk, 1997. 20 p.
 17. Popov V.K., Lukashevich O.D., Korobkin V.A. *Ekologo-ekonomicheskie aspekty ekspluatatsii podzemnykh vod Ob-Tomskogo mezhdurechya* [Ecological and economic aspects of exploring groundwaters of Ob-Tom interfluv]. Tomsk, TGASU Publ., 2003. 174 p.
 18. Savichev O.G. Spatial patterns of the evolution of the chemical composition and discharge of river water in the Ob River basin. *Doklady Earth Sciences*, 2016, vol. 466, pp. 59–63.
 19. Dutova E.M. Hydrogenous mineral neoformations in Tomsk water intake facility from underground sources. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 33 Contemporary Issues of Hydrogeology, Engineering Geology and Hydrogeology in Eurasia, 012017, 6 p.
 20. Leonova A.V. Geotechnical properties of gullying in Tomsk Oblast. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43 Problems of Geology and Subsurface Development, 012037, 4 p.
 21. Pokrovskiy V.D. Information retrieval system of underflooding estimation in Tomsk. *Vestnik TSUAB*, 2015, no. 1 (48), pp. 172–181. In Rus.
 22. Avrunev E.I., Kozina M.V., Popov V.K. Investigation of the cost factors of land in urbanized areas. *Vestnik Siberian State University of Geosystems and Technologies*, 2018, no. 2 (23), pp. 130–143. In Rus.
 23. Karpik A.P., Khoroshilov V.S. Sushchnost geoinformatsionnogo prostranstva territorii kak edinoj osnovy razvitiya gosudarstvennogo kadastra nedvizhimosti [The essence of the geoinformation space of the territories as a unified basis for the development of the state real estate cadastre]. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotosemka*, 2012, no 2/1. pp. 134–136.
 24. Popp E.A. The possibilities of GIS and mapping methods for analysis of ecological state of territorial entities [Proceedings of the International Conference: Innovations and GIS-technologies for the Development of Territories]. *Sbornik materialov mezhdunarodnoy konferencii. Innovatsii i GIS tekhnologii dlya razvitiya territoriy* [Proc. of the conference. Innovations and GIS for territory development]. Ust-Kamenogorsk, VKGTU Publ., 2014. pp. 67–74.
 25. Karpik A.P., Musikhin I.A. Research and practical trends in geospatial sciences. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information*, 2016, no. 41, pp. 177–184.
 26. Ledoux H., Meijers M. Topologically consistent 3D city models obtained by extrusion. *International Journal of Geographical Information Science*, 2011, no. 25 (4), pp. 557–574.
 27. Ying S., Li L., Guo R. Building 3D cadastral system based on 2D survey plans with SketchUp. *Geo-Spatial Information Science*, 2011, no. 14 (2), pp. 129–136.
 28. Sidorenko S.V., Romancov A.D. Satellite monitoring of floods on the Tom River. *Earth from space: the most effective solutions*, 2010, no. 6, pp. 70–77. In Rus.

Received: 23 November 2018.

Information about the authors

Evgeny I. Avrunev, Cand. Sc., associate professor, Siberian State University of Geosystems and Technologies.

Nataliya V. Gatina, postgraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

Mariya V. Kozina, senior lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Viktor K. Popov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 662.7; 662.641

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК И МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА ТОРФА ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ

Ибраева Канипа Талгатовна¹,
kti1@tpu.ru

Манаев Юрий Олегович¹,
Okia53007@yandex.ru

Табакаев Роман Борисович¹,
TabakaevRB@tpu.ru

Языков Николай Алексеевич²,
yazykov@catalysis.ru

Заворин Александр Сергеевич¹,
zavorin@tpu.ru

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

² Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 5.

Актуальность исследования обуславливается перспективностью вовлечения возобновляемой биомассы (в частности, торфа) в использование для выработки тепловой и электрической энергии. Это позволит частично решить проблему ресурсодефицитных регионов, зависящих от поставок топлива с разрабатываемых угольных месторождений.

Цель: исследование теплотехнических характеристик и минеральной части торфа ряда крупных месторождений Томской области для оценки возможности их энергетического использования.

Объект. Рассмотрены пробы низинного торфа с месторождений Суховское и Аркадьевское, а также с одного из месторождений Томского района.

Методы. Теплотехнические характеристики исследуемых проб были определены согласно ГОСТ Р 55661–2013, 33503–2015, 55660–2013. Значения теплоты сгорания установлены при помощи калориметра АБК-1 (РЭТ, Россия), элементный состав – на анализаторе Vario Micro Cube (Elementar, Германия). Исследование состава минеральной части торфа проводили методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием спектрометра EDX-720-P (Shimadzu, Япония), а также методом рентгеновской дифрактометрии с использованием дифрактометра Shimadzu XRD7000 (CuK_α-излучения) со счетчиком монохроматора Shimadzu SM-3121. Характерные температуры плавкости золы определяли согласно ГОСТ 2057–94. Структуру рассматриваемых проб исследовали методом сканирующей микроскопии на электронном микроскопе TM 3000 (Hitachi, Япония).

Результаты. На основе полученных результатов можно заключить, что использование околоторфяного торфа для сжигания камерным способом нецелесообразно из-за высокого выхода золы. Однако этот ресурс может быть рассмотрен как минеральное удобрение в сельском хозяйстве благодаря наличию таких элементов, как фосфор, калий. Высокое содержание карбонатов указывает на возможность использования околоторфяного торфа в качестве добавки к высокосернистым углям для снижения выбросов оксида серы SO_x. Характеристики суховского и аркадьевского торфа позволяют рассматривать их в качестве альтернативы привозному топливу. Преимуществами для энергетического использования является малое содержание серы, следствием которого будут минимальные вредные выбросы при сжигании. Более того, наличие большого количества карбонатов может способствовать полному связыванию SO_x при сжигании торфа. Предпочтительным способом энергетического использования торфа с месторождений Томской области является его сжигание в кипящем слое.

Ключевые слова:

Топливо, торф, минеральная часть, сжигание, энергетическое использование.

Введение

Постепенное истощение ресурсов традиционных органических топлив и необходимость снижения вредных выбросов от энергетических объектов заставляют задуматься об использовании биомассы, к которой относят отходы сельскохозяйственной деятельности, животноводства, лесной промышленности, торф и др. Биомасса является возобновляемым источником энергии, при сжигании которого не происходит усиление глобального парникового эффекта [1, 2]. В связи с этим в последние годы в мире прослеживается тенденция увеличе-

ния доли использования биомассы для выработки тепловой и электрической энергии [3–7].

Для Российской Федерации особый интерес представляет вовлечение торфяных ресурсов в топливно-энергетический баланс. Это обусловлено тем, что Россия располагает обширными залежами торфа – более 185 млрд т [8, 9], что делает нашу страну лидером по количеству запасов этого сырья. Основная часть торфяных месторождений сосредоточена в Западно-Сибирском регионе: в Тюменской области расположено свыше 50 % его ресурсов, в Томской – около 26 % [9]. При этом торф

относится к возобновляемым природным ресурсам, темпы прироста которого опережают объемы его промышленного использования [10]. В свою очередь, наличие столь колоссальных запасов при отсутствии их промышленной разработки приводит к периодическому возникновению природных пожаров [11–13], что также указывает на необходимость вовлечения торфа в энергетику. Однако, несмотря на перечисленные преимущества, в нашей стране торф всё еще остается малоиспользуемым топливным ресурсом.

Опыт других стран показывает, что торф может играть заметную роль для тепло- и энергоснабжения. Например, в Ирландии на основе торфа вырабатывается 5,30 % от общего количества производства энергии, в Финляндии – 4,54 %, в Белоруссии – 1,85 % [14].

Согласно энергетической стратегии России до 2030 года [15], доля использования торфа в топливно-энергетическом балансе торфодобывающих регионов должна составлять не менее 8–10 %. Это позволит частично решить проблему ресурсодефицитных регионов, зависящих от поставок топлива с разрабатываемых угольных месторождений.

Однако сдерживающим фактором достижения заявленных показателей до сих пор остаются высокие эксплуатационные издержки энергетического использования торфа в качестве топлива. Торф характеризуется высокой влажностью, что в свою очередь ведет за собой большие затраты на сушку перед его сжиганием. Кроме того, наличие влаги затрудняет перевозку и разгрузку топлива: в зимний период торф смерзается, а в летний период слеживается [16]. Из-за неоднородного гранулометрического состава торфа наблюдается высокая доля провала через колосниковую решетку при слоевом сжигании [17]. Вдобавок к этому возникает проблема образования шлакозольных отложений (шлакование поверхностей нагрева), обусловленных особенностями минералогического состава топлива [18].

В качестве альтернативы традиционному сжиганию могут быть рассмотрены технологии предварительной переработки торфа в энергетически более ценные продукты, такие как газообразное, жидкое или твердое композитное топливо [19–22]. Однако в некоторых случаях [23] высокая зольность торфа требует технико-экономического обоснования необходимости его переработки, так как не происходит существенного увеличения теплотехнических характеристик.

Повышение эффективности сжигания и переработки торфа требует изучения широкого спектра его характеристик. В настоящее время изученность торфяных ресурсов Томской области невысока [24], что не позволяет в полной мере оценить перспективы их использования в качестве энергетического сырья.

Это приводит к необходимости подробного изучения как теплотехнических характеристик конкретных месторождений Томской области, так и

их минеральной части, от которой, как известно [25], зависят практически все показатели топлива, в том числе и склонность к шлакованию.

Целью настоящей работы является исследование теплотехнических характеристик и минеральной части торфа ряда крупных месторождений Томской области для оценки возможности их энергетического использования.

Методика исследования

Объект исследования. В качестве объектов исследования были рассмотрены пробы низинного торфа с месторождений Суховское и Аркадьевское, а также с одного из месторождений Томского района. Месторождения находятся вблизи города Томска, что позволяет рассматривать их в качестве стратегического топлива для замены привозного каменного и бурого углей.

Теплотехнические характеристики. Теплотехнические характеристики исследуемых проб были определены согласно ГОСТ Р 33503–2015, ГОСТ 11306–2013, ГОСТ Р 55660–2013. Значения теплоты сгорания и элементный состав торфа установлены при помощи калориметра АБК-1 (РЭТ, Россия) и анализатора Vario Micro Cube (Elementar, Германия) соответственно.

Результаты определения характеристик пересчитывали с учетом содержания диоксида углерода карбонатов, установленного ускоренным объемным методом согласно ГОСТ 13455–91.

Анализ элементов минеральной части. Исследование состава минеральной части торфа проводили методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием спектрометра EDX-720-P (Shimadzu, Япония). Предварительно пробы торфа измельчали до размера фракций 0,2–1,0 мм, после чего спрессовывали в брикеты цилиндрической формы размерами 50×10 мм по способу [26].

Перед началом анализа спектрометр предварительно калибровался по стандартному образцу (ЛГ58) и чистым химическим веществам, спрессованным в виде таблеток: CaCO₃, KNO₃, NaNO₃, Mg. После калибровки спектрометр поверялся по стандартному образцу 1303. Состав перечисленных стандартных образцов приведен в табл. 1.

Таблица 1. Паспортные значения стандартных образцов (массовая доля элементов в процентах)

Table 1. Passport values of standard samples (mass fraction of elements in percent)

| Индекс СО* Index SS | Si | Mn | P | Ni | Cu | Cr | Al | Fe |
|------------------------|-------|------|--------|------|-------|------|------|-------|
| 1303 | 0,21 | 3,04 | 0,077 | 1,19 | 58,3 | – | 0,92 | – |
| ЛГ58 | 0,292 | 0,99 | 0,0135 | 4,26 | 0,388 | 23,4 | – | 67,01 |

* – индекс стандартного образца.

* – standard sample index.

Исследование минеральной части проб торфа также проведено методом рентгеновской дифрактометрии с использованием дифрактометра Shimadzu XRD7000 (CuK α -излучения) со счетчиком монохроматора Shi-

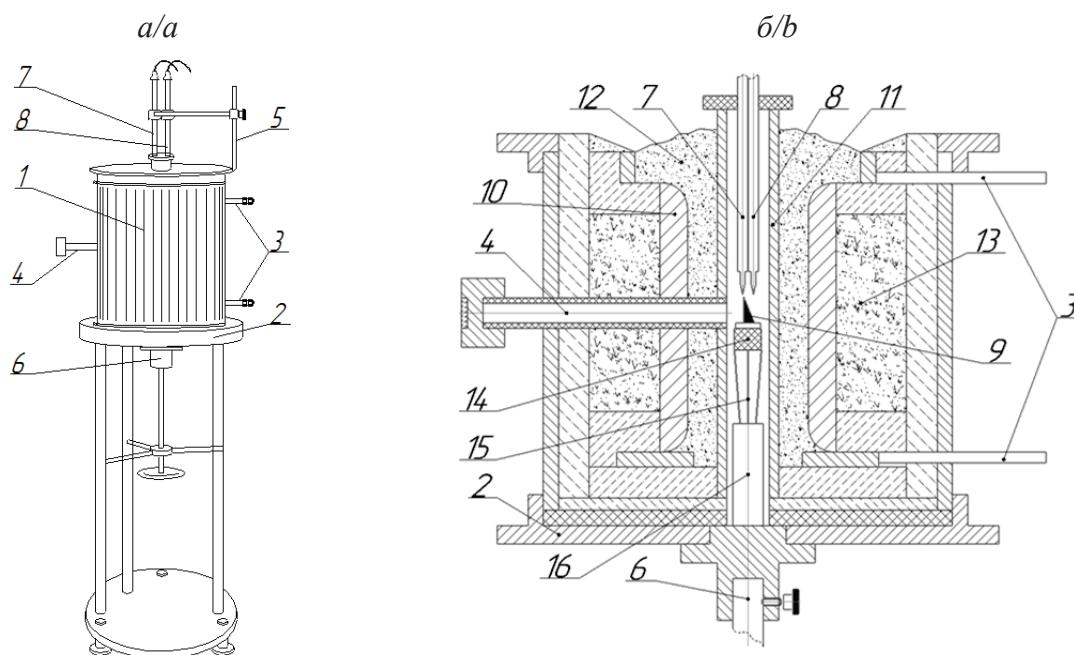


Рис. 1. Экспериментальная установка: а) общий вид установки; б) продольный разрез печи: 1 – криптоловая печь; 2 – основание печи с подставкой; 3 – тоководы; 4 – визирная трубка; 5 – кронштейн для термопары; 6 – шток с винтом; 7 – термопара, введенная в печь; 8 – контрольная термопара; 9 – пирамидальный образец; 10 – жаровой цилиндр; 11 – жаровая труба; 12 – криптоловая засылка; 13 – шамотная крошка; 14 – керамический столик; 15 – керамические стержни; 16 – угольная подставка

Fig. 1. Experimental setup: a) general view of the setup; b) longitudinal section of the furnace: 1 is the kryptol furnace; 2 is the furnace base stand; 3 are the current conductors; 4 is the aiming tube; 5 is the conduit support bracket; 6 is the rod with screw; 7 is the thermocouple introduced into the furnace; 8 is the control thermocouple; 9 is the pyramidal sample; 10 is the fire cylinder; 11 is the fire tube; 12 are the kryptol chips; 13 are the fireclay chips; 14 is the ceramic table; 15 are the ceramic rods; 16 is the coal stand

madzu SM-3121. Качественный рентгеновский анализ осуществлен при помощи базы данных PDF2+.

Определение характерных температур плавкости золы. Характерные температуры плавкости золы определяли согласно ГОСТ 2057–94. Предварительно из золного остатка изготавливали образец в форме трехгранной пирамиды. Золу измельчали, смешивали с 10 %-ым раствором декстрина в дистиллированной воде до состояния однородной массы. Полученную смесь выкладывали в специально изготовленную форму для затвердевания. Затем застывшую пирамиду извлекали из формы и размещали на платиновой пластине. При определении характерных температур плавкости золы пластину с пирамидой помещали в печь (рис. 1).

Печь – 1 с расположенными внутри пирамидой – 9 нагревали до температуры 1500 °С со скоростью 10–15 °С в минуту. Максимальная температура нагрева печи ограничена диапазоном работы контрольной термопары ПП-1 (рис. 1, поз. 8). Измерение температуры в зоне расположения пирамид осуществляли при помощи термопары – 7 градуировки ВР-1 в комплекте с высокоточным ампервольтметром РС500а (Япония) и контрольной термопары – 8 ПП-1 в комплекте с мультиметром Щ 4313 (Россия). Температуру холодных концов перечисленных термопар измеряли при помощи термометра 902 С (Китай) с термопарой ХА для снижения погрешности их измерения.

При нагреве пирамиды – 9 происходит постепенное изменение её формы, описываемое тремя стадиями деформации: начало деформации (t_A), размягчение (t_B) и переход в жидкоплавкое состояние (t_C). В процессе эксперимента регистрируются температуры, при которых наблюдаются изменения, характерные для каждой из стадий.

Изучение структуры образцов торфа. Структуру рассматриваемых проб исследовали методом сканирующей микроскопии на электронном микроскопе ТМ 3000 (Hitachi, Япония).

Результаты исследования

Значения теплотехнических характеристик исследуемых образцов, доведенных до воздушно-сухого состояния, приведены в табл. 2. Видно, что исследуемые образцы имеют высокую зольность, значения которой находятся в интервале $A^d=22,8–32,6\%$. Эти значения превышают среднюю величину зольности (12 %) для торфа, находящегося на территории России [27]. Похожие характеристики по параметру зольности имеют торфяные месторождения Светлогорское ($A^d=24,4$) и Витебское ($A^d=25,0$), расположенные в Республике Беларусь [28]. Высокое значение зольности обуславливает низкое значение теплоты сгорания изучаемых образцов торфа, равное $Q_i^t=7,6–11,8$ МДж/кг. Выход летучих веществ находится в пределах $V^{daf}=62,9–70,7\%$, что свидетельствует о высокой

реакционной способности при сжигании и термической нестабильности торфа. Нелетучий остаток, полученный после определения выхода летучих, имеет порошкообразный вид.

Таблица 2. Теплотехнические характеристики исходного торфа
Table 2. Thermotechnical characteristics of the initial peat

| Торф Peat | Влажность /Moisture, W ⁿ , % | Зольность на сухую массу Ash on dry basis A ^s , % | Выход летучих веществ Yield of volatile sub stances V ^{vol} , % | Низшая теплота сгорания Q _l , МДж/кг Low heating value Q _l , MJ/kg | Элементный состав на сухую беззольную массу*, % Elemental composition per combustible mass*, % | | | | |
|-----------------------------|---|---|---|---|---|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | | | | | C ^{daf} | H ^{daf} | N ^{daf} | S ^{daf} | O ^{daf} |
| Околотомский Okolotomsky | 7,1 | 32,6 | 62,9 | 7,6 | 56,39 | 5,02 | 3,10 | 0,08 | 35,41 |
| Суховской Sukhovskoy | 9,9 | 22,8 | 74,8 | 11,8 | 52,06 | 6,31 | 3,58 | 0,20 | 37,85 |
| Аркадьевский Arkadyevsky | 9,9 | 25,4 | 70,7 | 11,4 | 53,11 | 5,90 | 3,60 | 0,14 | 37,25 |

Примечание: * – результаты элементного состава топлива приведены с учетом содержащегося в топливе диоксида углерода карбонатов (CO₂)^d и гидратной воды, значение которой согласно ГОСТ 27313–2015 принято равным 0,1A^d. Ввиду малого содержания серы поправка на образование сульфатов при разложении карбонатов не учитывалась.

Note: * – the results of fuel elemental composition are given taking into account carbon dioxide carbonates (CO₂)^d contained in the fuel, and hydrated water, the value of which according to SS 27313–2015 is taken to be 0,1A^d. Due to the low sulphur content, the correction for sulphate formation was not taken into account in decomposition of carbonates.

Элементный состав минеральной части торфа

В ходе анализа определены химические элементы в неорганической части торфа. Основные золообразующие макроэлементы – Si, Ca, Fe, Mg, K, Al, P. Как можно заметить из табл. 3, наибольшее содержание среди макроэлементов наблюдается у кальция (Ca=6,7–15,82 %), а содержание калия и фосфора относительно мало (не превышает 0,4 %). Основываясь на данных, приведенных в работе [29], в составе минеральной части твердого топлива наиболее распространены такие минералы, как силикаты (Al₄[Si₄O₁₀](OH)₈), кварц (SiO₂), карбонаты (CaCO₃, MgCO₃, FeCO₃), сульфиды (FeS₂) и др. В связи с этим можно предположить, что кальций и магний представлены минеральной формой карбонатов CaCO₃ и MgCO₃, а кремний – в виде оксида.

Таблица 3. Содержание элемента в минеральной части в исследуемых образцах
Table 3. Element content in mineral part in the samples

| Исследуемые образцы торфа Peat samples | Содержание элемента/Element content | | | | | | |
|--|-------------------------------------|-------|------|------|------|------|------|
| | K, ppm | Ca | Mg | P | Si | Fe | Al |
| Околотомский/Okolotomsky | 242,13 | 15,82 | 1,58 | 0,29 | 0,58 | 0,28 | 0,39 |
| Суховской/Sukhovskoy | 263,57 | 7,99 | 1,88 | 0,40 | 0,57 | 0,84 | 0,32 |
| Аркадьевский/Arkadyevsky | 413,54 | 6,7 | 1,38 | 0,20 | 1,95 | 0,44 | 0,55 |

Для определения основных групп минералов, присутствующих в торфе, использовали метод рентгенофазового анализа [30]. На дифрактограмме (рис. 2) видны пики, характерные для карбоната кальция (CaCO₃) и оксида кремния (SiO₂), что подтверждает некоторые ранее сделанные предположения по составу минеральной части.

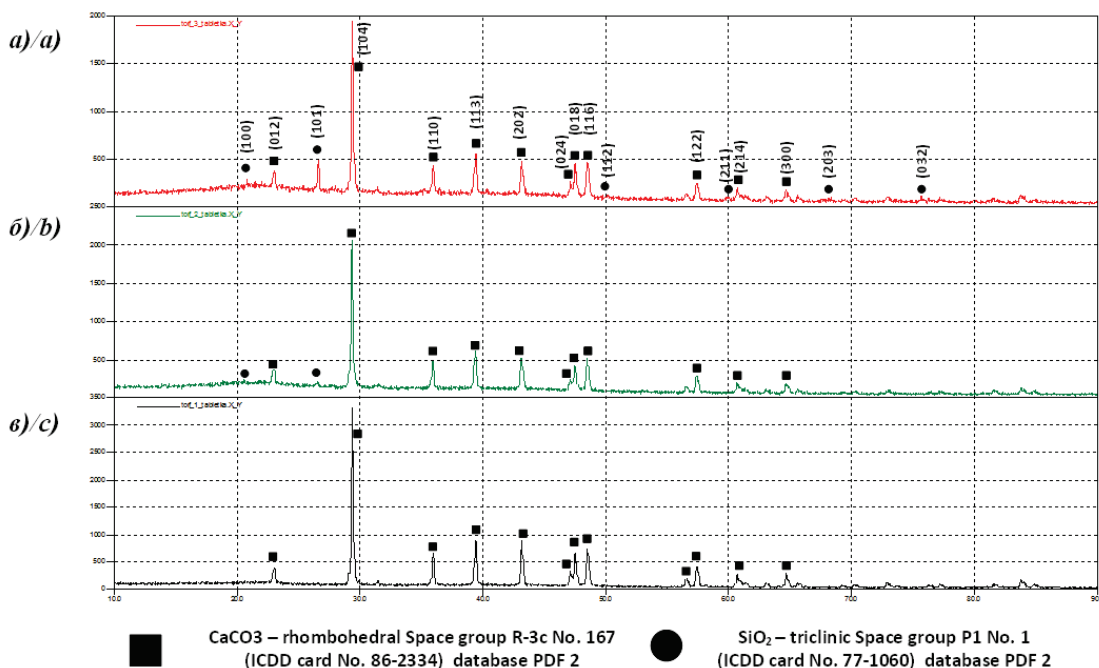


Рис. 2. Результаты рентгенофазового анализа исследуемых образцов: а) аркадьевский торф; б) суховской торф; в) околотомский торф
Fig. 2. Results of x-ray phase analysis of the samples: a) arkadyevsky peat; b) sukhovskoy peat; c) okolotomsky peat

Установленные ускоренным методом величины содержания диоксида углерода карбонатов (CO_2)^d составили для околотомского торфа 20,69 %, суховского торфа – 9,82 %, аркадьева – 9,11 % (в пересчете на сухую массу исходного сырья). Учитывая, что карбонаты присутствуют в основном в виде карбоната кальция (рис. 2), на основе полученных значений выхода диоксида углерода массовую долю карбоната кальция в сухой массе пробы можно вычислить по формуле, %:

$$\text{CaCO}_3^d = (\text{CO}_2)^d \frac{M_{\text{CaCO}_3}}{M_{\text{CO}_2}}, \quad (1)$$

где M_{CaCO_3} – молекулярная масса карбоната кальция, г/моль; M_{CO_2} – молекулярная масса диоксида углерода, г/моль.

Согласно проведенному расчету по формуле (1), получены следующие содержания карбоната кальция: околотомский торф – 47,1 %; суховской торф – 22,3 %; аркадьева – 20,7 %. Столь высокие значения содержания карбоната кальция говорят о возможности связывания оксидов серы при сжигании. Как известно [31], наиболее распространенные методы сероочистки проводятся с применением известняковой технологии. Это связано с тем, что известняк (CaCO_3) является наиболее дешевым сорбентом. Например, в работе [32] показано, что в мировой практике из эксплуатируемых очистных установок 80 % составляют «мокрые» скрубберы, 72 % из которых используют в качестве сорбента известняк.

Общую величину минеральной части торфа согласно ГОСТ 27313–2015 можно оценить по формуле:

$$MM^d = A^d + (\text{CO}_2)^d + W_{MM}^d + 0,625 S_p^d - 2,5(S_A^d - S_{\text{SO}_4}^d), \quad (2)$$

где W_{MM}^d – гидратная влага, %; S_p^d – пиритная сера, %; S_A^d – сера, связанная в зольном остатке, %; $S_{\text{SO}_4}^d$ – сульфатная сера, %.

Согласно ГОСТ 27313–2015, содержание гидратной влаги можно оценить как

$0,1 \cdot A^d$. Поскольку значение серы при пересчете на сухое состояние очень мало, то при расчете доли минеральной части рассматриваемых проб составляющие S_p^d , S_A^d , $S_{\text{SO}_4}^d$ не учитывались.

Рассчитанная по формуле (2) массовая доля минеральной массы для околотомского торфа составляет 56,55 %, суховского торфа – 34,9 %, аркадьева – 37,05 %. Наиболее высокая эффективность сжигания столь высокозольных топлив (минеральная масса более 34 %) может быть получена при использовании технологий кипящего слоя [33]. Это достигается за счет активной циркуляции частиц топлива, обеспечивая такие преимущества как экологичность, высокая эффективность сжигания и теплообмена.

Характеристики плавкости золы

Для оценки поведения неорганической части топлива при сжигании, как правило, применяют

метод определения температурных характеристик золы.

Состав и характеристики плавкости золы торфа представлены в табл. 4. Видно, что зола суховского торфа достигает только стадии начала деформации (t_A), а зола околотомского и аркадьева не претерпевает изменений при температуре до 1480 °С. Это связано с особенностью состава минеральной массы торфа: основная часть золы состоит из соединений SiO_2 и CaO , которые, как известно [34, 35], имеют температуру плавления 1713 и 2580 °С, соответственно.

Высокое содержание CaO (30,3 и 48,4 %) и SiO_2 (21,4 и 22,2 %) у аркадьева и околотомского торфа может являться причиной повышенного износа поверхностей нагрева при сжигании. Наличие окислов железа (до 12,1 %), магния, алюминия и титана может привести к повышенной шлакующей способности торфа [36]. Однако, оценивая результаты определения характеристик плавкости, можно отметить, что изучаемая зола имеет тугоплавкий характер, не слипается при высоких температурах. В процессе сжигания торфа её удаление не составит затруднений [37].

Таблица 4. Состав и характеристики плавкости золы торфа
Table 4. Composition and ash fusion characteristics of peat

| Пробы торфа Peat samples | Температура начала деформации золы, °С Ash melting point, °C | | | Состав золы, % Ash composition, % | | | | | |
|-----------------------------|---|------------------------------|-------|--------------------------------------|--|--------------|---------------|--------------|--------------|
| | t_A | t_B | t_C | SiO_2 | $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ | FeO | SO_3 | CaO | MgO |
| Околотомский Okolotomsky | >1480 | Не достигнута Not reached | | 22,2 | 0,3 | 4,4 | 3,7 | 48,4 | 4,2 |
| Суховской Sukhovskoy | 1448,3 | | | 4,1 | 7,7 | 12,1 | 1,3 | 32,4 | 1,2 |
| Аркадьева Arkadyevsky | >1480 | | | 21,4 | 7,2 | 7,3 | 1,6 | 30,3 | 2,4 |

Структура образцов торфа

Торф является полидисперсной системой, в которую входят макро- и микроструктуры (рис. 3). Видно, что макроструктура представлена компонентами неразложившихся остатков растений-торфообразователей. Минеральная часть имеет как приносной, так и сросшийся с органическим веществом характер. Последнее, скорее всего, вызвано процессами метаморфического преобразования торфа.

По своей природе микроструктура в торфе коагуляционная, эти структуры эластичны и подвижны, взаимодействие осуществляется через молекулы и прослойки воды.

Заключение

В данной работе изучено несколько проб торфа с месторождений, находящихся в географической близости от города Томска. Изученные пробы име-

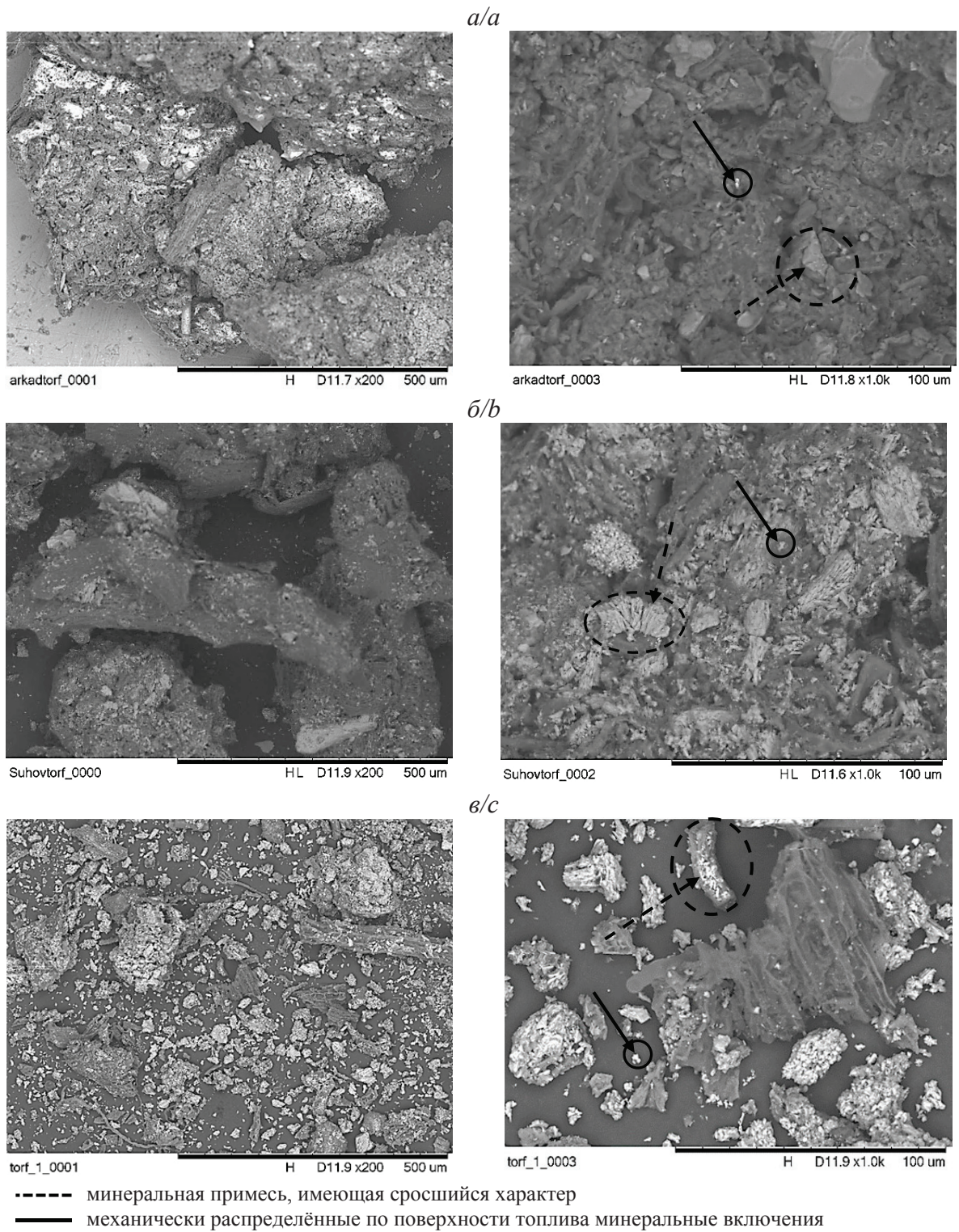


Рис. 3. Результаты структурного анализа исследуемых проб торфа при увеличении 200[×] и 1000[×]: а) аркадьеvский торф; б) суховской торф; в) околотомский торф

Fig. 3. Results of structural analysis of the studied peat samples: а) arkadyevsky peat; б) sukhovskoy peat; в) okolotomsky peat

ют высокое значение зольности (более 22 %), не характерное для большинства торфяных месторождений России. Столь высокая доля балласта обуславливает низкое значение теплоты сгорания рассматриваемых образцов торфа (менее 11,8 МДж/кг) даже в доведенном до воздушно-сухого состояния.

Установлено, что минеральная часть рассматриваемых проб в основном представлена карбонатом кальция (CaCO_3) и оксидом кремния (SiO_2), которые являются основными золообразующими компонентами. Доля карбоната кальция в минеральной части для околотомского торфа составила – 47,1 %, суховского торфа – 22,3 %, аркадьева торфа – 20,7 %.

По результатам определения состава и характеристик плавкости золы можно заключить, что зола торфа состоит в основном из соединений CaO и SiO_2 . Тугоплавкий характер золы свидетельствует о том, что в процессе сжигания торфа её удаление не составит затруднений. Вместе с тем высокое содержание такого прочного минерала как кварц говорит о возможности абразивного износа конвективных поверхностей нагрева.

На основе полученных результатов можно заключить, что использование околотомского торфа для сжигания нецелесообразно из-за высокого содержания золы. Однако этот ресурс может быть рассмотрен в виде минерального удобрения в сельском хозяйстве благодаря наличию таких элементов, как фосфор и калий. Высокое содержание карбоната кальция указывает на возможность использования околотомского торфа в качестве добавки к

высокосернистым углям для снижения выбросов оксида серы SO_x .

Характеристики суховского и аркадьева торфа позволяют рассматривать их в качестве альтернативы привозному топливу. В этом случае преимуществом для энергетического использования является малое содержание серы, следствием которого будут минимальные вредные выбросы при сжигании. Более того, наличие большого количества карбоната кальция может способствовать практически полному связыванию SO_x при сжигании торфа этих месторождений.

Низкая теплота сгорания образцов торфа с месторождений Томской области, обусловленная высоким значением зольности, и состав минеральной части указывают на то, что сжигание в топочных устройствах камерного типа будет сопровождаться такими сложностями, как механический недожог и эрозионный износ. Опыт эффективного сжигания высокзолного топлива показывает, что предпочтительным способом энергетического использования такого торфа является сжигание в кипящем слое.

Исследование профинансировано Российским фондом фундаментальных исследований (РФФИ) в рамках проекта № 18–38–00648. Экспериментальные исследования проведены в Томском политехническом университете при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (ГЗ «Наука» № 13.13269.2018/8.9 и ВИУ-НОЦ И.Н. Бутакова-296/2018). Аналитические измерения выполнены в рамках государственного задания Института катализа СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase-mineral and chemical composition and classification / S.V. Vassilev, D. Baxter, L.K. Andersen, C.G. Vassileva // Fuel. – 2013. – № 105. – P. 40–76.
2. Abbasi T., Abbasi S.A. Biomass energy and the environmental impacts associated with its production and utilization // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2010. – V. 14. – № 3. – P. 919–937.
3. O'Rourke F., Boyle F., Reynolds A. Renewable energy resources and technologies applicable to Ireland // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2009. – V. 13. – P. 1975–1984.
4. Ермоленко Г.В. и др. Справочник по возобновляемой энергетике европейского союза. – М.: Институт энергетики НИУ ВШЭ, 2016. – 96 с.
5. Kleinedam P., Dörr J. Renewable power generation 2015: the latest World-Market Status // Renewable Energy Focus. – 2015. – V. 16. – № 5–6. – P. 160–163.
6. A historical review of promotion strategies for electricity from renewable energy sources in EU countries / R. Haas, C. Panzer, G. Resch, M. Ragwitz, G. Reece, A. Held // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2011. – V. 15. – № 2. – P. 1003–1034.
7. Fortov V.E., Popel' O.S. The current status of the development of renewable energy sources worldwide and in Russia // Thermal engineering. – 2014. – V. 61. – P. 389–398.
8. Торфяные ресурсы Томской области и пути их использования в строительстве / Л.В. Касицкая, Ю.С. Саркисов, Н.П. Горленко, Н.О. Копаница, А.И. Кудяков. – Томск: Изд-во STT, 2007. – 292 с.
9. Торфяные ресурсы Томской области и их использование / Л.И. Инишева, В.С. Архипов, С.Г. Маслов, Л.С. Михантьева. – Новосибирск: б. и., 1995. – 85 с.
10. Колотушкин В.И. Справочная книжка торфяника. – М.: Недра, 1973. – 208 с.
11. Effects of peat fires on the characteristics of humic acid extracted from peat soil in Central Kalimantan, Indonesia / Yustiauwati, Y. Kihara, K. Sazawa et al. // Environmental Science and Pollution Research. – 2015. – V. 22. – № 4. – P. 2384–2395.
12. Григорьев А. Лесные и торфяные пожары 2002 года // Лесн. бюллетень. – 2003. – № 21–22. – С. 11.
13. Zaidel'man F.R. The problem of fire control on drained peatlands and its solution // Eurasian Soil Science. – 2011. – V. 44. – № 8. – P. 919–926.
14. Боярко Г.Ю., Бернатонис П.В., Бернатонис В.К. Торфяная промышленность России и мира. Анализ состояния и перспективы развития // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2014. – № 6. – С. 56–61.
15. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. Утв. распоряжением Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. № 1715 п. – 144 с.
16. Transportation of coal concentrates at negative ambient temperatures / A.D. Uchitel', M.V. Kormer, V.P. Lyalyuk, I.A. Lyakhova, E.O. Shmel'tser, Yu.I. Vititnev // Coke and Chemistry. – 2013. – V. 56. – № 5. – P. 167–172.
17. Contamination and Corrosion of the Boiler Steam Superheaters at Thermal Power Stations Incinerating Solid Domestic Wastes and Biomass / E.N. Zelikov, G.A. Ryabov, E.P. Dik, A.N. Tugov // Thermal Engineering. – 2008. – V. 55. – № 11. – P. 978–983.

18. Чернецкий М.Ю., Дектерев А.А., Бурдуков А.П. Расчетное исследование факельного горения мелкодисперсного лигноцеллюлозного сырья // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: техника и технологии. – 2013. – № 6. – С. 625–636.
19. TG-FTIR-MS study of pyrolysis products evolving from peat / J. Yang, H. Chen, W. Zhao, J. Zhou // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 2016. – № 117. – P. 296–309.
20. Tsvetkov P., Strizhenok A. Ecological and economic efficiency of peat fast pyrolysis projects as an alternative source of raw energy resources // Journal of Ecological Engineering. – 2016. – V. 17. – № 1. – P. 56–62. DOI: 10.12911/22998993/61190
21. Biomass Pyrolysis and Gasification Comprehensive Modeling for Effective Power Generation at Combined Cycle Power Plant / A. Fedyukhin, I. Sultanguzin, A. Gyul'maliev, V. Sergeev // Eurasian Chemico-Technological Journal. – 2017. – V. 19. – P. 245–253.
22. Thermal processing of biomass into high-calorific solid composite fuel / R. Tabakaev, I. Shanenkov, A. Kazakov, A. Zavorin // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 2017. DOI: 10.1016/j.jaap.2017.02.016
23. Табакаев Р.Б., Казаков А.В., Заворин А.С. Перспективность низкосортных топлив Томской области для теплотехнологического использования // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 4. – С. 41–46.
24. Бернатонис П.В., Боярко Г.Ю., Бернатонис В.К. Эффективность разработки торфяных месторождений Томской области в современных условиях // Вестник Томского государственного университета. – 2011. – № 334. – С. 195–199.
25. Алехнович А.Н. Влияние минеральной части на показатели и характеристики энергетических углей // Энергетик. – 2008. – № 3. – С. 8–13.
26. Possible directions for using bran in heat-power engineering / M. Gaydabrus, I. Razov, R. Tabakaev, V. Lebedev // MATEC Web of Conferences. – 2017. – V. 110. – № 01030. DOI: 10.1051/mateconf/201711001030
27. Энергетическое топливо СССР. Ископаемые угли, горючие сланцы, торф, мазут и горючий природный газ: справочник / В.С. Вдовченко, М.И. Мартынова, Н.В. Новицкий, Г.Д. Юшина. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 183 с.
28. Лис Л.С. и др. Торфяные месторождения Республики Беларусь, пригодные для комплексного освоения на ближайшую и отдаленную перспективу. – Минск: Беларуская навука, 2013. – 115 с.
29. Залкинд И.Я., Вдовченко В.С., Дик Э.П. Зола и шлаки в котельных топках. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 80 с.
30. Magnetite hollow microspheres with a broad absorption bandwidth of 11.9 GHz: Toward promising lightweight electromagnetic microwave absorption / I. Shanenkov, A. Sivkov, A. Ivashutenko, V. Zhuravlev, Q. Guo, L. Li, G. Li, G. Wei, W. Han // Physical Chemistry Chemical Physics. – 2017. – V. 19. – № 30. – P. 19975–19983.
31. Жабо В.В. Охрана окружающей среды на ТЭС и АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 240 с.
32. Применение методики термодинамической оценки воздействия известняковой технологии мокрой сероочистки газов на объекты окружающей среды / А.М. Касимов, Т.В. Козуля, Д.И. Емельянова, М.М. Козуля // Экология и промышленность. – 2016. – № 1. – С. 94–98.
33. Исследования сжигания твердого топлива в низкотемпературном кипящем слое с определением выбросов токсических веществ / Ю.А. Безносик, В.А. Логвин, К.А. Коринчук, Д.А. Киржнер // Химическая промышленность. – 2014. – Т. 9. – № 1. – С. 15–19.
34. Рахманкулов М.М., Паращенко В.М. Технология литья жаропрочных сплавов. – М.: Интернет Инжиниринг, 2000. – 464 с.
35. Рабинович В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник. – Л.: Химия, 1977. – 72 с.
36. Алехнович А.Н. Шлакование пылеугольных энергетических котлов. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2013. – 116 с.
37. Хзмалян Д.М. Теория горения и топочные устройства. – М.: Энергия, 1976. – 484 с.

Поступила 09.11.2018 г.

Информация об авторах

Ибраева К.Т., аспирант научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Томского политехнического университета.

Манаев Ю.О., студент научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Томского политехнического университета.

Табакаев Р.Б., кандидат технических наук, научный сотрудник И.Н. Бутакова Томского политехнического университета.

Языков Н.А., кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории каталитических процессов переработки возобновляемого сырья Института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН.

Заворин А.С., доктор технических наук, профессор научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Томского политехнического университета.

UDC 662.7; 662.641

RESEARCH OF CHARACTERISTICS AND MINERAL COMPOSITION OF PEAT OF THE TOMSK REGION RELATING TO ENERGY USE

Kanipa T. Ibraeva¹,
kti1@tpu.ru

Yuri O. Manaev¹,
Okia53007@yandex.ru

Roman B. Tabakaev¹,
TabakaevRB@tpu.ru

Nikolay A. Yazykov²,
yazykov@catalysis.ru

Alexander S. Zavorin¹,
zavorin@tpu.ru

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

² Boreskov Institute of Catalysis SB RAS,
5, Acad. Lavrentiev avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to involve renewable biomass (in particular, peat) to generate heat and electrical energy. This will partially solve the problem of resource-deficient regions, depending on the supply of fuel from developed coal deposits.

The main aim of the research is the investigation of thermal characteristics and the mineral matter of the peat of a number of large deposits of the Tomsk region to assess the possibility of their energy use.

Objects of researches are the samples of low-moor peat from Sukhovskoye and Arkadyevskoye deposits and one of the Tomsk region deposits.

Methods. Thermal characteristics of the studied samples were determined according to GOST 33503–2015 (ISO 11722:2013), 55661–2013 (ISO 1171:2010), 55660–2013 (ISO 562:2010). Net calorific values of the peats were determined in the ABK-1 calorimeter (Russia), the elemental composition of the organic matter was determined using the analyzer Vario Micro Cube (Elementar, Germany). Peat mineral matter composition was studied by X-ray fluorescence analysis using an EDX-720-P spectrometer (Shimadzu, Japan) as well as by X-ray diffractometry using a Shimadzu XRD7000 diffractometer (CuK_α-radiation) with a Shimadzu CM-3121 monochromator counter. Typical ash melting points were determined according to GOST 2057–94 (ISO 540–81). The structure of the samples under study was examined by scanning electron microscopy using a TM 3000 electron microscope (Hitachi, Japan).

Results. On the basis of the obtained results, it can be concluded that, due to the high ash content, the use of okolotomsky peat for chamber-type combustion is impractical. However, this resource can be considered as a mineral fertilizer in agriculture due to the presence of such elements as phosphorus, potassium. The high content of carbonates indicates the possibility of its using as an additive to high-sulfur coal to reduce emissions of sulfur oxide SO_x. The characteristics of sukhovskoy and arkadyevsky peat make it possible to consider them as an alternative to imported fuel. The preferred method of energy use of peat from Tomsk region fields is its combustion in a fluidized bed.

Key words:

Fuel, peat, mineral matter, combustion, energy use.

The research was funded by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) in the framework of project No. 18–38–00648. The experiments were carried out at Tomsk Polytechnic University with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State assignment «Science» No. 13.13269.2018 / 8.9 and the VIU-SEC of I.N. Butakova-296/2018). Analytical measurements were carried out within the framework of the budget project for Boreskov Institute of Catalysis.

REFERENCES

1. Vassilev S.V., Baxter D., Andersen L.K., Vassileva C.G. An overview of the composition and application of biomass ash. P. 1. Phase-mineral and chemical composition and classification. *Fuel*, 2013, no. 105, pp. 40–76.
2. Abbasi T., Abbasi S.A. Biomass energy and the environmental impacts associated with its production and utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, vol. 14, no. 3, pp. 919–937.
3. O'Rourke F., Boyle F., Reynolds A. Renewable energy resources and technologies applicable to Ireland. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, vol. 13, pp. 1975–1984.
4. Ermolenko G.V. *Spravochnik po vozobnovlyаемой energetike evropeyskogo soyuza* [Handbook of renewable energy of the European Union]. Moscow, Institut energetiki NIU VSHE Publ., 2016. 96 p.
5. Kleineidam P., Dörr J. Renewable power generation 2015: the latest World-Market Status. *Renewable Energy Focus*, 2015, vol. 16, no. 5–6, pp. 160–163.
6. Haas R., Panzer C., Resch G., Ragwitz M., Reece G., Held A. A historical review of promotion strategies for electricity from renewable energy sources in EU countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, vol. 15, no. 2, pp. 1003–1034.

7. Fortov V.E., Popel' O.S. The current status of the development of renewable energy sources worldwide and in Russia. *Thermal engineering*, 2014, vol. 61, pp. 389–398.
8. Kasitskaya L.V., Sarkisov Yu.S., Gorlenko N.P., Kopanitsa N.O., Kudyakov A.I. *Torfyanye resursy Tomskoy oblasti i puti ikh ispolzovaniya v stroitelstve* [Peat resources of Tomsk region and ways of their use in construction]. Tomsk, STT Publ., 2007. 292 p.
9. Inisheva L.I., Arkhipov V.C., Maslov S.G., Mikhanteva L.S. *Torfyanye resursy Tomskoy oblasti i ikh ispolzovanie* [Peat resources of Tomsk region and their use]. Novosibirsk, 1995. 85 p.
10. Kolotushkin V.I. *Spravochnaya knizhka torfyanika* [Peatland reference book]. Moscow, Nedra Publ., 1973. 208 p.
11. Yustiawati, Kihara Y., Sazawa K. Effects of peat fires on the characteristics of humic acid extracted from peat soil in Central Kalimantan, Indonesia. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, vol. 22, no. 4, pp. 2384–2395.
12. Grigorev A. Forest and peat fires in 2002. *Forest Bulletin*, 2004, no. 21–22, pp. 11. In Rus.
13. Zaidel'man F.R. The problem of fire control on drained peatlands and its solution. *Eurasian Soil Science*, 2011, vol. 44, no. 8, pp. 919–926.
14. Boyarko G.Yu., Bernatonis P.V., Bernatonis V.K. Peat industry of Russia and the world. Analysis of the state and development prospects. Mineral resources of Russia. *Economics and Management*, 2014, no. 6, pp. 65–75. In Rus.
15. *Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2030 goda* [Russia's energy strategy for the period up to 2030. Approved Decree of the Government of the Russian Federation of November 13, 2009 No. 1715 p.] 144 p.
16. Uchitel' A.D., Kormer M.V., Lyalyuk V.P., Lyakhova I.A., Shmel'tser E.O., Vititnev Yu.I. Transportation of coal concentrates at negative ambient temperatures. *Coke and Chemistry*, 2013, vol. 56, no. 5, pp. 167–172.
17. Zelikov E.N., Ryabov G.A., Dik E.P., Tugov A.N. Contamination and Corrosion of the Boiler Steam Superheaters at Thermal Power Stations Incinerating Solid Domestic Wastes and Biomass. *Thermal Engineering*, 2008, vol. 55, no. 11, pp. 978–983.
18. Chernetsky M.Y., Dekterev A.A., Burdukov A.P. Numerical research of pulverized combustion of micro-grinded lignocellulose raw materials. *Journal of Siberian Federal University*, 2013, no. 6, pp. 625–636. In Rus.
19. Yang J., Chen H., Zhao W., Zhou J. TG–FTIR–MS study of pyrolysis products evolving from peat. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2016, no. 117, pp. 296–309.
20. Tcvetkov P., Strizhenok A., Ecological and economic efficiency of peat fast pyrolysis projects as an alternative source of raw energy resources. *Journal of Ecological Engineering Volume*, 2016, vol. 17, no. 1, pp. 56–62.
21. Feduykhin A., Sultanguzin I., Gyul'maliev A., Sergeev V. Biomass pyrolysis and gasification comprehensive modeling for effective power generation at combined cycle power plant. *Eurasian Chemico-Technological Journal*, 2017, vol. 19, pp. 245–253.
22. Tabakaev R., Shanenkov I., Kazakov A., Zavorin A. Thermal processing of biomass into high-calorific solid composite fuel. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2017. DOI: 10.1016/j.jap.2017.02.016
23. Tabakaev R.B., Kazakov A.V., Zavorin A.S. The prospects of low-grade fuels of Tomsk region for thermal technology use. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 4, pp. 41–46. In Rus.
24. Bernatonis P.V., Boyarko G.Yu., Bernatonis V.K. The effectiveness of the development of peat deposits of Tomsk region in modern conditions. *Bulletin of Tomsk State University*, 2011, no. 334, pp. 195–199. In Rus.
25. Alekhovich A.N. The influence of the mineral part on the performance and characteristics of power coals. *Energetic*, 2008, no. 3, pp. 8–13. In Rus.
26. Gaydabrus M., Razov I., Tabakaev R., Lebedev V. Possible directions for using bran in heat-power engineering. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 110, no. 01030. DOI: 10.1051/mateconf/201711001030
27. Vdovchenko V.S., Martynova M.I., Novitskiy N.V., Yushina G.D. *Energeticheskoe toplivo SSSR. Iskopaemye ugli, goryuchie slantsy, torf, mazut i goryuchiy prirodny gaz: spravochnik* [Power fuel of the USSR. Fossil coals, oil shale, peat, fuel oil and combustible natural gas: a guide]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 183 p.
28. Lis L.S. *Torfyanye mestorozhdeniya Respubliki Belarus, prigodnye dlya kompleksnogo osvoeniya na blizhaysheyu i otdalennuyu perspektivu* [Peat deposits of the Republic of Belarus, suitable for complex development in the near and long term]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2013. 115 p.
29. Zalkind I.Ya., Vdovchenko V.S., Dik E.P. *Zola i shlaki v kotelnnykh topkakh* [Ash and slag in boiler furnaces]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1998. 80 p.
30. Shanenkov I., Sivkov A., Ivashutenko A., Zhuravlev V., Guo Q., Li L., Li G., Wei G., Han W. Magnetite hollow microspheres with a broad absorption bandwidth of 11.9 GHz: Toward promising lightweight electromagnetic microwave absorption. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2017, vol. 19, no. 30, pp. 19975–19983.
31. Zhabo V.V. *Okhrana okruzhayushchey sredy na TES i AES* [Environmental protection in the TPP and NPP]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1992. 240 p.
32. Kasimov A.M., Kozulya T.V., Emelyanova D.I., Kozulya M.M. Application of methods of thermodynamic estimation of influence of technology of wet desulfurization of limestone by gases on objects of environment. *Ecology and industry*, 2016, no. 1, pp. 94–98. In Rus.
33. Beznosik Yu.A., Logvin V.A., Korinchuk K.A., Kirzhner D.A. Research of solid fuel combustion in low-temperature fluidized bed with determination of toxic substances emissions. *Chemical industry*, 2014, vol. 9, no. 1, pp. 15–19. In Rus.
34. Rakhmankulov M.M., Parashchenko V.M. *Tekhnologiya litya zharoprochnykh splavov* [Technology of casting superalloys]. Moscow, Internet Engineering Publ., 2000. 464 p.
35. Rabinovich V.A., Khavin Z.Ya. *Kratkiy khimicheskiy spravochnik* [Brief Chemical Reference]. Saint Petersburg, Khimiya Publ., 1977. 72 p.
36. Alekhovich A.N. *Shlakovanie pyleugolnykh energeticheskikh kotlov* [Slagging of pulverized coal energy boilers]. Moscow, NTF Energoprogress Publ., 2013. 116 p.
37. Khzmalyan D.M. *Teoriya gorennya i topochnye ustroystva* [Theory of combustion and combustion devices]. Moscow, Energiya Publ., 1976. 484 p.

Received: 09 November 2018.

Information about the authors

Kanipa T. Ibraeva, graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Yuri O. Manaev, student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Roman B. Tabakaev, researcher, Cand. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University.

Nikolay A. Yazykov, researcher, Cand. Sc., Boreskov Institute of Catalysis SB RAS.

Alexander S. Zavorin, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 621.313.282.2: 621.316.79

РЕЗОНАНСНЫЕ КОЛЕБАНИЯ С ПРЕДЕЛЬНОЙ АМПЛИТУДОЙ В ВИБРАЦИОННОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ АКТИВАТОРЕ

Гаврилин Алексей Николаевич¹,
tom-gawral@list.ru

Боловин Евгений Владимирович¹,
boloinev@mail.ru

Глазырин Александр Савельевич¹,
asglazyrin@tpu.ru

Кладиев Сергей Николаевич¹,
kladiev@tpu.ru

Полищук Владимир Иосифович²,
polischuk_vi@mail.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 635050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
Россия, 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46.

Актуальность исследования обусловлена тем, что вибрационные электромагнитные активаторы являются перспективными для применения в различных технологиях, связанных с добычей и транспортировкой георесурсов, в том числе при приготовлении буровых растворов и разжижении вязких нефтепродуктов. Вибрационный электромагнитный активатор представляет собой электрическую машину возвратно-поступательного движения с якорем-активатором, образующим в жидкой обрабатываемой среде турбулентные затопленные струи. В первом полупериоде якорь-активатор притягивается к стенке за счет импульса тока в катушках, при этом в упругой пружине накапливается потенциальная энергия. Этот режим является режимом вынужденных колебаний в механической системе вибрационного электромагнитного активатора. Во втором полупериоде ток в катушках отсутствует, а якорь-активатор отталкивается от стенок за счет энергии пружины – это режим свободных колебаний в механической системе. С точки зрения улучшения энергоэффективности следует настраивать вибрационный электромагнитный активатор на резонансную частоту. Резонансная частота не является постоянной и зависит от свойств обрабатываемой жидкости. Форма вынуждающей колебания силы должна быть такой, чтобы обеспечивать колебания в механической системе на резонансной частоте с предельной амплитудой, что обеспечит повышение энергоэффективности и производительности вибрационного электромагнитного активатора.

Цель: провести аналитические исследования, позволяющие обеспечивать резонансные колебания с предельной амплитудой в вибрационном электромагнитном активаторе.

Методы исследования основаны на использовании обыкновенных дифференциальных уравнений, преобразования Лапласа, амплитудно-частотных характеристик, систем нелинейных алгебраических уравнений, спектрального анализа, сопоставления аналитических и экспериментальных характеристик.

Результаты. На основе линеаризованной математической модели механической системы вибрационного электромагнитного активатора рассмотрен режим свободных колебаний якоря-активатора с предельной амплитудой. Режим вынужденных колебаний предлагается рассматривать как естественное дополнение к режиму свободных колебаний с вынуждающей силой, действующей половину периода и имеющей специальную форму. Показано, что режимы свободных и вынужденных колебаний существенно зависят от параметров механической системы, которые определяются свойствами обрабатываемой жидкой среды. Проведен спектральный анализ вынуждающей силы, обеспечивающей резонансные колебания с предельной амплитудой в механической системе вибрационного электромагнитного активатора. Предложено техническое решение, обеспечивающее управление вибрационным электромагнитным активатором с автоматической настройкой на резонансную частоту и предельную амплитуду колебаний якоря-активатора. Такой режим обеспечивает максимизацию энергоэффективности и производительности процессов перемешивания жидких обрабатываемых сред. На основе сопоставления аналитических и экспериментальных частотных характеристик подтверждена гипотеза о допустимости линеаризации математической модели механической системы вибрационного электромагнитного активатора при аналитическом исследовании вынуждающей силы оптимальной формы.

Ключевые слова:

Буровой раствор, высоковязкий нефтепродукт, вибрационный электромагнитный активатор, резонанс, вынуждающая колебания сила, свободные колебания, вынужденные колебания, спектральный анализ, настройка на резонансную частоту, оценка погрешности.

Введение

В качестве источников возбуждения колебаний механических систем применяются вибровозбудители различных типов: гидравлические, пневматиче-

ские и электромагнитные. При этом решаются задачи концентрации энергии колебаний в узкой частотной области и активного демпфирования колебаний в заданных областях частотного спектра [1, 2].

Электромагнитные вибраторы (ЭМВ) как электрические машины возвратно-поступательного движения находят применение в технологиях, связанных с поиском, добычей и переработкой георесурсов.

В ряде конструкций ЭМВ способны эффективно генерировать низкочастотные колебания, являющиеся зондирующими воздействиями на грунт при сейсморазведке [3–8].

При перемешивании и разжижении высоковязких нефтепродуктов наряду с винтовыми устройствами, размывающими донные отложения с помощью турбулентных струй [9–15], эффективно используются вибрационные электромагнитные активаторы (ВЭМА), которые представляют из себя ЭМВ, создающие затопленные импульсные турбулентные струи за счёт специальной конструкции якоря-активатора [16–18].

Одним из существенных результатов применения ВЭМА на этапе подготовки работ по бурению скважин [19] стало то, что время приготовления и коррекции бурового раствора при использовании оборудования виброструйной магнитной активации в несколько раз меньше по сравнению с традиционными механическими центробежными мешалками [20].

Прогнозирование работоспособности и расчёт показателей качества ЭМВ, ВЭМА, линейных электрических машин возвратно-поступательного движения традиционно проводится на основе исследования динамики механических систем, работающих в колебательном режиме, при этом обоснованно применяются как линейные, так и нелинейные математические модели и схемы замещения [21–23].

Резонансные колебания с предельной амплитудой в механической системе ВЭМА

Рассмотрим на основе линейной математической модели процесс формирования резонансных колебаний с предельной амплитудой в механической системе ВЭМА при вынуждающей силе, действующей строго на половине периода резонансных колебаний. Погрешность применения именно линейной математической модели будет оценена в последнем разделе данной статьи.

Механический контур ВЭМА работает на резонансной частоте, и колебание якоря-активатора имеет полупериод свободных колебаний и полупериод вынужденных колебаний. Полупериод свободных колебаний начинается, когда притянутый к стенке якорь-активатор отталкивается под действием запасённой в пружине потенциальной энергии, при этом скорость сначала возрастает до максимума, затем падает до нуля – якорь достигает максимального расстояния от стенки, а зазор в магнитной цепи также достигает максимума. С этого момента наступает режим вынужденных колебаний. В этом режиме якорь-активатор по гармоническому закону под действием вынуждающей

стягивающей зазор электромагнитной силы притягивается точно к стенке, причём за то же время, за которое он от неё оттолкнулся. На этом основывается утверждение, что механический контур работает на резонансной частоте. Вынуждающая сила в режиме вынужденных колебаний имеет такую величину и форму, что якорь-активатор двигается по гармоническому закону.

Анализ свободно-вынужденных колебаний показывает принципиальную возможность построения нагруженных колебательных механических систем с максимальным КПД и производительностью и даёт рекомендации по их построению.

Можно предположить, что результаты анализа механических систем с максимальным КПД и производительностью применимы и для других подобных колебательных систем, например электрических и гидравлических.

Анализ свободно-вынужденных колебаний в механической системе ВЭМА показывает, что потребляемая механическая мощность на резонансной частоте имеет предельный минимум, прямо пропорционально зависящий только от величины механического сопротивления. Работа ВЭМА в режиме свободно-вынужденных колебаний позволяет получить *предельную* экономию потребляемой электрической энергии, что очень важно с практической точки зрения.

Для получения максимальной производительности ВЭМА зазор в магнитной цепи при колебаниях якоря-активатора должен выбираться полностью. Для получения максимального КПД колебания якоря-активатора ВЭМА должны происходить по гармоническому закону с частотой, равной резонансной частоте.

Уравнение динамического равновесия механического контура, в соответствии с принципом Д'Аламбера, имеет вид:

$$F_{эм}(t) = m_{\Sigma} \frac{d^2}{dt^2} x(t) + R_{мех} \frac{d}{dt} x(t) + x(t)k_{пр}, \quad (1)$$

где $F_{эм}(t)$ – сила, стягивающая магнитный зазор, являющаяся вынуждающей; $m_{\Sigma}=1,157$ кг – колеблющаяся масса; $R_{мех}=100$ Н·с/м – коэффициент вязкого трения (механическое сопротивление); $k_{пр}=1,85 \cdot 10^5$ Н/м – жёсткость пружины; $x(t)$ – отклонение активатора от положения статического равновесия.

Применив преобразование Лапласа, получим:

$$F_{эм}(p) = m_{\Sigma} x(p) \left(p^2 + \frac{R_{мех}}{m_{\Sigma}} p + \frac{k_{пр}}{m_{\Sigma}} \right). \quad (2)$$

Выразим из (2) характеристическое уравнение $p^2 + \frac{R_{мех}}{m_{\Sigma}} p + \frac{k_{пр}}{m_{\Sigma}} = 0$ при выполнении условия $\left(\frac{R_{мех}}{m_{\Sigma}} \right)^2 < \frac{k_{пр}}{m_{\Sigma}}$ имеет два комплексно-сопряжённых корня

$$p_1 = -\left(\frac{R_{\text{мех}}}{2m_{\Sigma}}\right) + \sqrt{\frac{k_{\text{пр}}}{m_{\Sigma}} - \left(\frac{R_{\text{мех}}}{2m_{\Sigma}}\right)^2} = -\lambda + j\omega_0,$$

$$p_2 = -\left(\frac{R_{\text{мех}}}{2m_{\Sigma}}\right) - \sqrt{\frac{k_{\text{пр}}}{m_{\Sigma}} - \left(\frac{R_{\text{мех}}}{2m_{\Sigma}}\right)^2} = -\lambda - j\omega_0.$$

Решив уравнение $\left(\frac{R_{\text{мех}}}{m_{\Sigma}}\right) - \frac{k_{\text{пр}}}{m_{\Sigma}} = 0$, получим величину граничного коэффициента вязкого трения $R_{\text{мех,гр}} = 2\sqrt{k_{\text{пр}}m_{\Sigma}} = 925,3 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}$.

Круговая и линейная частота свободных колебаний

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k_{\text{пр}}}{m_{\Sigma}} - \left(\frac{R_{\text{мех}}}{2m_{\Sigma}}\right)^2} = 2\pi \cdot 63,2 = 397 \text{ рад}/\text{с}$$

или $f_0 = 63,2 \text{ Гц}$.

Исследуем, как зависит ω_0 от $R_{\text{мех}}$ и m_{Σ} (рис. 1).

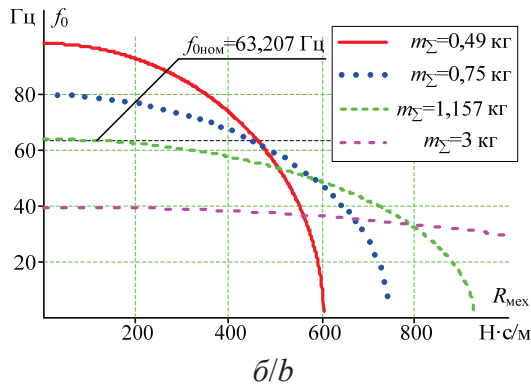
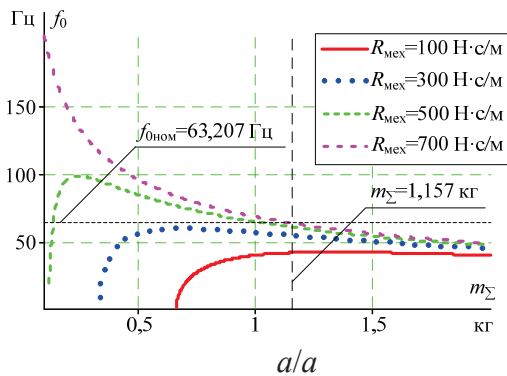


Рис. 1. Характеристики частоты свободных колебаний механической системы от: а) суммарной массы якоря-активатора; б) коэффициента демпфирования

Fig. 1. Dependence of the frequency of mechanical system free oscillations on: a) total mass of the armature-activator; b) damping coefficient

Величина приращения резонансной частоты (табл. 1) при постоянной жёсткости пружины и при изменении вязкого трения определяется как

$$\Delta f_{\text{рез}} \% = \Delta \omega_{\text{Rм}} \% = \frac{\omega_{\text{Rм1}} - \omega_{\text{Rм}}}{\omega_{\text{Rм1}}} \cdot 100 \%,$$

где $R_{\text{м1}} = 100 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}$ – начальное значение коэффициента вязкого трения.

Таблица 1. Приращение резонансной частоты при $k_{\text{пр}} = 1,85 \cdot 10^5 \text{ Н}/\text{м}$ и $R_{\text{мех}} = \text{var}$

Table 1. Increment of the resonant frequency at $k_{\text{пр}} = 1,85 \cdot 10^5 \text{ N}/\text{m}$ and $R_{\text{мех}} = \text{var}$

| $R_{\text{мех}}$, Н·с/м/Н·с/м | 100 | 300 | 500 | 700 |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| $f_{\text{рез}}$, Гц/Hz | 63,27 | 60,20 | 53,55 | 34,22 |
| $\Delta f_{\text{рез}}$, % | 0 | 4,84 | 15,36 | 41,62 |

Согласно табл. 1, при увеличении $R_{\text{мех}}$ в 7 раз $\Delta f_{\text{рез}} \% = 41,62 \%$, т. е. изменяется незначительно.

Логарифмический декремент затухания

$$\lambda = \frac{R_{\text{мех}}}{2m_{\Sigma}} = 43,215 \text{ с}^{-1}.$$

Показатель колебательности механического контура

$$\chi = \frac{\omega_0}{\lambda} = \sqrt{\frac{4k_{\text{пр}}m_{\Sigma}}{R_{\text{мех}}^2} - 1} = 9,199.$$

Добротность механического контура

$$Q = \frac{\sqrt{m_{\Sigma}k_{\text{пр}}}}{R_{\text{мех}}} = 4,626.$$

Так как $Q = 4,626 < 10$, следовательно, механический контур является нагруженным.

Механический контур ВЭМА на резонансной частоте может работать в режимах вынужденных и свободных колебаний. В режиме вынужденных колебаний якорь-активатор притягивается к стенке корпуса под действием электромагнитной вынуждающей силы, а в режиме свободных колебаний якорь отталкивается. Притянем якорь-активатор к стенке корпуса, потом отпустим. В этом случае активатор будет совершать затухающие колебания, которые описываются зависимостью

$$\delta_{\text{св}}(t) = \delta_0 - (\delta_0 - \delta_{\text{ст}}) \cos(\omega_0 t) e^{-\lambda t}. \quad (3)$$

При $R_{\text{мех}} = 100 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}$ за половину периода свободные колебания затухают в 1,414 раза, за один период в 2 раза, а за 6 периодов в 60 раз (рис. 2).

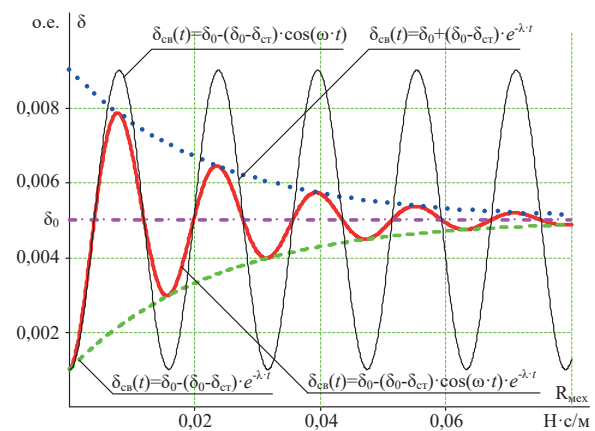


Рис. 2. Переходный процесс свободных колебаний якоря-активатора

Fig. 2. Free oscillations response of armature-activator

Процесс затухающих колебаний при разных коэффициентах вязкого трения ($R_{\text{мех}}$) представлен на рис. 3.

За половину периода якорь-активатор оттолкнётся от стенки на расстояние

$$\delta_{\text{м}} = \delta_0 - (\delta_0 - \delta_{\text{ст}}) \cos(\pi) e^{-\lambda \frac{\pi}{\omega_0}}$$

– максимальный зазор в магнитной цепи в колебательном процессе. Это расстояние можно для удобства выразить в процентах $\delta_{\text{м}} \% = \frac{\delta_{\text{м}}}{(2\delta_0 - \delta_{\text{ст}})} \cdot 100 \%$,

и оно тем меньше, чем больше коэффициент вязкого трения.

При стремлении коэффициента вязкого трения к граничному значению $R_{\text{мех гр}} = 2\sqrt{k_{\text{пр}} m_{\Sigma}} = 925,3 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}$ якорь-активатор отталкивается от стенки и стремится принять положение статического равновесия $\delta_{\text{м}} = \delta_0 = 0,005 \text{ м}$, характер же переходного процесса при этом становится неколебательным.

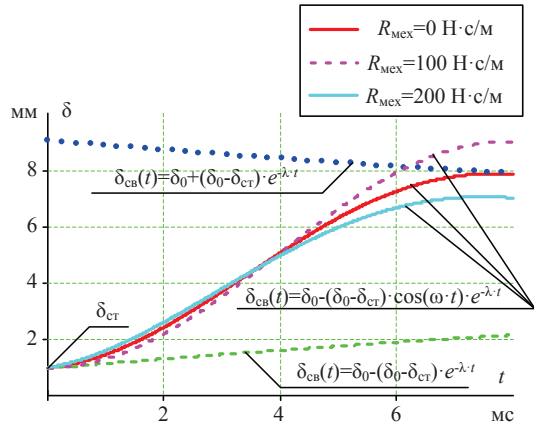


Рис. 3. Переходный процесс отскока от стенки корпуса ВЭМА притянутого якоря-активатора на полупериоде свободных колебаний при варьировании коэффициента демпфирования

Fig. 3. Transitional characteristic of the attracted anchor-activator rebounding from the housing side of the vibration electromagnetic activators on the half-period of free oscillations by varying the damping coefficient

Проанализировав зависимости (рис. 3), можно видеть, что рабочая точка хорошо сбалансирована, т. е. ω_0 , Q , $\delta_{\text{м}}$, $\delta_{\text{м}} \%$ находятся в области незначительного приращения $\Delta\omega_0$, ΔQ , $\Delta\delta_{\text{м}}$, $\Delta\delta_{\text{м}} \%$ при варьировании параметров механического контура $R_{\text{мех}}$, m_{Σ} . В первом полупериоде якорь-активатор под действием силы пружины отталкивается от стенки и совершает свободные колебания на собственной частоте ω_0 , зазор магнитной цепи при этом достигает максимального значения $\delta_{\text{м}}$. Во втором полупериоде колебания происходят под действием электромагнитной вынуждающей силы, в результате чего якорь снова притянется к стенке.

Пропорционально отклонению активатора от положения равновесия в режиме свободных колебаний

$$x(t) = \delta_0 - \delta_{\text{ст}}(t) = (\delta_0 - \delta_{\text{ст}}) \cos(\omega_0 t) e^{-\lambda t}$$

изменяется сила пружины

$$F_{\text{пр-св}}(t) = k_{\text{пр}}(\delta_0 - \delta_{\text{ст}}(t)) = k_{\text{пр}}(\delta_0 - \delta_{\text{ст}}) \cos(\omega_0 t) e^{-\lambda t}.$$

Возьмём производную с учётом выражения (3) и определим скорость в режиме свободных колебаний

$$v_{\text{св}}(t) = \frac{d(\delta_0 - \delta_{\text{ст}}(t))}{dt} = \frac{d((\delta_0 - \delta_{\text{ст}}) \cos(\omega_0 t) e^{-\lambda t})}{dt},$$

$$v_{\text{св}}(t) = \frac{-1}{2}(\delta_0 - \delta_{\text{ст}}) \sin \left[\frac{1}{2} \left(4 \frac{k_{\text{пр}}}{m_{\Sigma}} - \frac{R_{\text{мех}}^2}{m_{\Sigma}^2} \right)^{\frac{1}{2}} t \right] \times$$

$$\times \left(4 \frac{k_{\text{пр}}}{m_{\Sigma}} - \frac{R_{\text{мех}}^2}{m_{\Sigma}^2} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left(-\frac{1}{2} \frac{R_{\text{мех}}}{m_{\Sigma}} t \right) - \frac{1}{2}(\delta_0 - \delta_{\text{ст}}) \times$$

$$\times \cos \left[\frac{1}{2} \left(4 \frac{k_{\text{пр}}}{m_{\Sigma}} - \frac{R_{\text{мех}}^2}{m_{\Sigma}^2} \right)^{\frac{1}{2}} t \right] \frac{R_{\text{мех}}}{m_{\Sigma}} \exp \left(-\frac{1}{2} \frac{R_{\text{мех}}}{m_{\Sigma}} t \right),$$

пропорционально которой изменяется диссипативная сила $F_{\text{дисс-св}}(t) = R_{\text{мех}} v_{\text{св}}(t)$.

Возьмём вторую производную, с учётом выражения (3) определим ускорение в режиме свободных колебаний

$$a_{\text{св}}(t) = \frac{d^2(\delta_0 - \delta_{\text{ст}}(t))}{dt^2} = \frac{d^2((\delta_0 - \delta_{\text{ст}}) \cos(\omega_0 t) e^{-\lambda t})}{dt^2},$$

$$a_{\text{св}}(t) = \frac{1}{4}(-\delta_0 - \delta_{\text{ст}}) \cos \left[\frac{1}{2} \left(4 \frac{k_{\text{пр}}}{m_{\Sigma}} - \frac{R_{\text{мех}}^2}{m_{\Sigma}^2} \right)^{\frac{1}{2}} t \right] \times$$

$$\times \left(4 \frac{k_{\text{пр}}}{m_{\Sigma}} - \frac{R_{\text{мех}}^2}{m_{\Sigma}^2} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left(-\frac{1}{2} \frac{R_{\text{мех}}}{m_{\Sigma}} t \right) - \frac{1}{4}(\delta_0 - \delta_{\text{ст}}) \times$$

$$\times \sin \left[\frac{1}{2} \left(4 \frac{k_{\text{пр}}}{m_{\Sigma}} - \frac{R_{\text{мех}}^2}{m_{\Sigma}^2} \right)^{\frac{1}{2}} t \right] \left(4 \frac{k_{\text{пр}}}{m_{\Sigma}} - \frac{R_{\text{мех}}^2}{m_{\Sigma}^2} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{R_{\text{мех}}}{m_{\Sigma}} \times$$

$$\times \exp \left(-\frac{1}{2} \frac{R_{\text{мех}}}{m_{\Sigma}} t \right) + \frac{1}{4}(\delta_0 - \delta_{\text{ст}}) \times$$

$$\times \sin \left[\frac{1}{2} \left(4 \frac{k_{\text{пр}}}{m_{\Sigma}} - \frac{R_{\text{мех}}^2}{m_{\Sigma}^2} \right)^{\frac{1}{2}} t \right] \left(4 \frac{k_{\text{пр}}}{m_{\Sigma}} - \frac{R_{\text{мех}}^2}{m_{\Sigma}^2} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{R_{\text{мех}}}{m_{\Sigma}} \times$$

$$\times \exp \left(-\frac{1}{2} \frac{R_{\text{мех}}}{m_{\Sigma}} t \right) + \frac{1}{4}(\delta_0 - \delta_{\text{ст}}) \times$$

$$\times \cos \left[\frac{1}{2} \left(4 \frac{k_{\text{пр}}}{m_{\Sigma}} - \frac{R_{\text{мех}}^2}{m_{\Sigma}^2} \right)^{\frac{1}{2}} t \right] \frac{R_{\text{мех}}^2}{m_{\Sigma}^2} \exp \left(-\frac{1}{2} \frac{R_{\text{мех}}}{m_{\Sigma}} t \right). \quad (4)$$

После упрощения выражение (4) примет вид

$$\begin{aligned}
 a_{\text{св}}(t) = & \\
 = \frac{1}{4} \cos & \left[\frac{1}{2} \left(4 \frac{k_{\text{пр}}}{m_{\Sigma}} - \frac{R_{\text{мех}}^2}{m_{\Sigma}^2} \right)^{\frac{1}{2}} t \right] \exp \left(-\frac{1}{2} \frac{R_{\text{мех}}}{m_{\Sigma}} t \right) \times \\
 & \times \frac{-4\delta_0 k_{\text{пр}} m_{\Sigma} + \delta_0 R_{\text{мех}}^2 + 4\delta_{\text{ст}} k_{\text{пр}} m_{\Sigma} - \delta_{\text{ст}} R_{\text{мех}}^2}{m_{\Sigma}^2} - \\
 & - \frac{1}{2} (-\delta_0 + \delta_{\text{ст}}) \sin \left[\frac{1}{2} \left(4 \frac{k_{\text{пр}}}{m_{\Sigma}} - \frac{R_{\text{мех}}^2}{m_{\Sigma}^2} \right)^{\frac{1}{2}} t \right] \times \\
 & \times \left(\frac{4k_{\text{пр}} m_{\Sigma} - R_{\text{мех}}^2}{m_{\Sigma}^2} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{R_{\text{мех}}}{m_{\Sigma}} \exp \left(-\frac{1}{2} \frac{R_{\text{мех}}}{m_{\Sigma}} t \right) - \\
 & - \frac{1}{4} (-\delta_0 + \delta_{\text{ст}}) \cos \left[\frac{1}{2} \left(\frac{4k_{\text{пр}} m_{\Sigma} - R_{\text{мех}}^2}{m_{\Sigma}^2} \right)^{\frac{1}{2}} t \right] \times \\
 & \times \frac{R_{\text{мех}}^2}{m_{\Sigma}^2} \exp \left(-\frac{1}{2} \frac{R_{\text{мех}}}{m_{\Sigma}} t \right). \quad (5)
 \end{aligned}$$

Используя выражение (5), запишем выражение для силы инерции якоря-активатора в режиме свободных колебаний

$$F_{\text{ин,св}}(t) = m_{\Sigma} a_{\text{св}}(t).$$

Предельная диссипативная мощность механического контура ВЭМА, работающего на резонансной частоте, прямо пропорциональна величине коэффициента вязкого трения и обратно пропорциональна толщине стенки корпуса. При номинальных параметрах механического контура ВЭМА в гидравлический контур может быть передано не более 345,18 Вт, подразумевается также, что ВЭМА работает в безударном режиме.

При стремлении коэффициента вязкого трения к бесконечно большой величине δ_m стремится к значению, равному величине зазора в положении статического равновесия. За половину периода якорь-активатор оттолкнётся от стенки на расстояние δ_m . Чтобы колебания были незатухающие во втором полупериоде нужно к якорю приложить силу такой формы и величины, чтобы он снова полностью притянулся к стенке, при этом колебание якоря можно записать как:

$$\begin{aligned}
 \delta_{\text{вын}}(t) = & \\
 = \frac{\delta_m - \delta_{\text{ст}}}{2} & \left(1 + \cos \left(\sqrt{\frac{k_{\text{пр}}}{m_{\Sigma}} - \left(\frac{R_{\text{мех}}}{m_{\Sigma}} \right)^2} t \right) \right) + \delta_{\text{ст}}. \quad (6)
 \end{aligned}$$

Установившиеся колебания в механической системе ВЭМА, работающей на резонансной частоте, являются свободно-вынужденными и описываются согласно (3) в режиме свободных колебаний, а согласно (6) в режиме вынужденных колебаний с

частотой вынуждающей силы, равной резонансной частоте механического контура.

Представляется важным в режиме вынужденных колебаний в механической системе получить и проанализировать *аналитическое выражение для электромагнитной вынуждающей колебания силы*, которая якорь-активатор, оттолкнувшись от стенки на максимальное расстояние, вновь притянет к стенке. Для получения наибольшего КПД и производительности якорь-активатор должен колебаться с частотой, равной частоте собственных колебаний $\omega_0 = 2\pi f_0$, и с амплитудой, равной наибольшей величине зазора магнитной цепи $\delta_0 - \delta_{\text{ст}}$. Большую производительность, чем предельная, можно получить только при увеличении зазора магнитной цепи в положении статического равновесия. Если же зазор в положении равновесия оставить прежним, то максимальный КПД и производительность можно получить, заставив якорь колебаться согласно выражениям (3) и (6). Электромагнитная вынуждающая сила должна быть отлична от нуля только во втором полупериоде колебаний, когда якорь притягивается к стенке. Когда же якорь отталкивается от стенки под действием силы пружины и внешней вынуждающей силы нет, то колебание происходит в свободном режиме с собственной частотой. В режиме вынужденных колебаний механический контур ВЭМА получает энергию, которую он израсходовал в течение предыдущего полупериода свободных колебаний (рис. 4). Используя первую и вторую производные виброперемещения (3), а также уравнение динамического равновесия для механического контура (1), можно получить искомое аналитическое выражение для электромагнитной вынуждающей колебания силы.

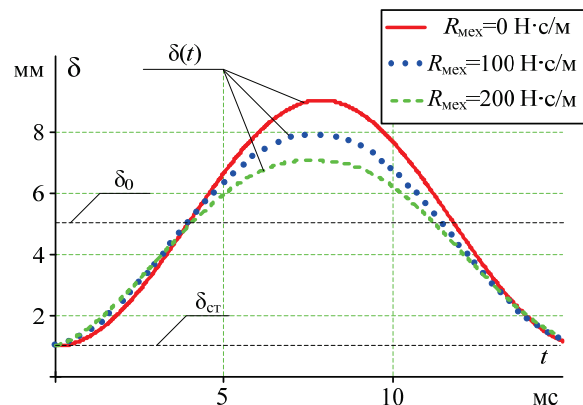


Рис. 4. Свободно-вынужденные колебания якоря-активатора ВЭМА при варьировании коэффициента вязкого трения

Fig. 4. Free-forced oscillations of the armature-activator vibration electromagnetic activators with varying viscous friction

Выражение для отклонения якоря-активатора от положения статического равновесия с учётом (8)

$$x_{\text{вын}}(t) = -1 \left(\frac{\delta_m - \delta_{\text{ст}}}{2} (1 + \cos(\omega t)) + \delta_{\text{ст}} - \delta_0 \right),$$

$$x_{\text{вын}}(t) = \delta_0 - \delta_{\text{ст}} - \left(1 + \cos \left(\sqrt{\frac{k_{\text{пр}}}{m_{\Sigma}} - \left(\frac{R_{\text{мех}}}{2m_{\Sigma}} \right)^2} t \right) \right) \times$$

$$\times \frac{1}{2} \left(\delta_0 - (\delta_0 - \delta_{\text{ст}}) \exp \left(-\frac{R_{\text{мех}}}{2m_{\Sigma}} \frac{\pi}{\sqrt{\frac{k_{\text{пр}}}{m_{\Sigma}} - \left(\frac{R_{\text{мех}}}{2m_{\Sigma}} \right)^2}} \right) \right) \times \sqrt{4 \frac{k_{\text{пр}}}{m_{\Sigma}} - \frac{R_{\text{мех}}^2}{m_{\Sigma}^2}} +$$

$$\left(\frac{1}{2} \delta_0 + \frac{1}{2} (-\delta_0 + \delta_{\text{ст}}) \times \right.$$

$$\left. + k_{\text{пр}} \left(\exp \left(-\frac{R_{\text{мех}}}{m_{\Sigma}} \frac{\pi}{\sqrt{4 \frac{k_{\text{пр}}}{m_{\Sigma}} - \frac{R_{\text{мех}}^2}{m_{\Sigma}^2}}} \right) - \frac{1}{2} \delta_{\text{ст}} \right) \right).$$

Первая производная – скорость в режиме вынужденных колебаний

$$v_{\text{вын}}(t) = \frac{1}{2} \left(-\frac{1}{2} \delta_0 - \frac{1}{2} (\delta_{\text{ст}} - \delta_0) \times \right.$$

$$\left. \times \exp \left(-\frac{R_{\text{мех}}}{2m_{\Sigma}} \frac{\pi}{\sqrt{\frac{k_{\text{пр}}}{m_{\Sigma}} - \left(\frac{R_{\text{мех}}}{2m_{\Sigma}} \right)^2}} \right) - \frac{1}{2} \delta_{\text{ст}} \right) \times$$

$$\times \sin \left[\frac{1}{2} \left(4 \frac{k_{\text{пр}}}{m_{\Sigma}} - \frac{R_{\text{мех}}^2}{m_{\Sigma}^2} \right)^{\frac{1}{2}} t \right] \sqrt{4 \frac{k_{\text{пр}}}{m_{\Sigma}} - \frac{R_{\text{мех}}^2}{m_{\Sigma}^2}}.$$

Вторая производная – ускорение в режиме вынужденных колебаний

$$a_{\text{вын}}(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{4} \delta_0 - \frac{1}{4} (\delta_{\text{ст}} - \delta_0) \times \right.$$

$$\left. \times \exp \left(-\frac{R_{\text{мех}}}{m_{\Sigma}} \frac{\pi}{\sqrt{4 \frac{k_{\text{пр}}}{m_{\Sigma}} - \frac{R_{\text{мех}}^2}{m_{\Sigma}^2}}} \right) - \frac{1}{4} \delta_{\text{ст}} \right) \times$$

$$\times \cos \left[\frac{1}{2} \left(4 \frac{k_{\text{пр}}}{m_{\Sigma}} - \frac{R_{\text{мех}}^2}{m_{\Sigma}^2} \right)^{\frac{1}{2}} t \right] \sqrt{4 \frac{k_{\text{пр}}}{m_{\Sigma}} - \frac{R_{\text{мех}}^2}{m_{\Sigma}^2}}.$$

Желаемая электромагнитная вынуждающая колебания сила в режиме вынужденных колебаний

$$F_{\text{жел}}(t) = m_{\Sigma} \frac{d^2}{dt^2} x_{\text{вын}}(t) + R_{\text{мех}} \frac{d}{dt} x_{\text{вын}}(t) + x_{\text{вын}}(t) k_{\text{пр}}.$$

Необходимая величина амплитуды желаемой электромагнитной вынуждающей силы в режиме вынужденных колебаний зависит от m_{Σ} , $R_{\text{мех}}$ и $\delta_{\text{ст}}$

$$F_{\text{жел_макс}}(R_{\text{мех}}, m_{\Sigma}, \delta_{\text{ст}}) =$$

$$R_{\text{мех}} \left(\frac{1}{4} \delta_0 - \frac{1}{4} (-\delta_0 + \delta_{\text{ст}}) \times \right.$$

$$\left. \times \exp \left(-\frac{R_{\text{мех}}}{m_{\Sigma}} \frac{\pi}{\sqrt{4 \frac{k_{\text{пр}}}{m_{\Sigma}} - \frac{R_{\text{мех}}^2}{m_{\Sigma}^2}}} \right) - \frac{1}{4} \delta_{\text{ст}} \right) \times$$

Необходимая величина амплитуды электромагнитной вынуждающей силы в режиме вынужденных колебаний обратно пропорциональна добротности контура Q и прямо пропорциональна толщине стенки $\delta_{\text{ст}}$.

Выражение для электромагнитной вынуждающей колебания силы оптимальной формы в течение половины периода вынужденных колебаний имеет вид

$$F_{\text{вын}}(t) = \begin{cases} F_{\text{жел}}(t) & \text{если } \sin(\omega_0 t) \geq 0; \\ 0 & \text{иначе,} \end{cases}$$

а в течение полупериода свободных колебаний вынуждающая сила равна нулю (рис. 5).

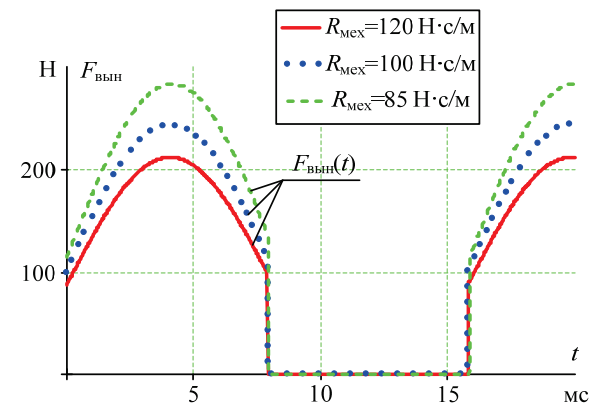


Рис. 5. Вид вынуждающей силы в течение периода, обеспечивающей резонансные колебания с предельной амплитудой в механической системе ВЭМА при варьировании коэффициента вязкого трения

Fig. 5. Type of driving force during the period providing resonant oscillations with a limiting amplitude in the vibration electromagnetic activator's mechanical system with varying viscous friction coefficient

Следующей задачей является спектральный анализ этой силы. Разложим электромагнитную вынуждающую колебания силу оптимальной формы до десятой гармоники и получим её ортогональный (синусно-косинусный – табл. 2) и амплитудно-фазовый спектры (табл. 3).

Постоянная составляющая:

$$F_0(t) = \frac{\omega_0}{\pi} \int_{\frac{\pi}{2\omega_0}}^{\frac{5\pi}{2\omega_0}} F_{\text{вын}}(t) dt.$$

Восстановленный с точностью до десятой гармоники сигнал силы имеет вид:

$$FF(t) = F_0 + \sum_{k=1}^{k=10} (F_k \cos(k\omega t) + F_{k1} \sin(k\omega t)),$$

$$AF_k = \sqrt{F_k^2 + F_{k1}^2}, \quad \alpha F_k = \arctg\left(\frac{F_{k1}}{F_k}\right).$$

Таблица 2. Результаты ортогонального спектрального анализа
Table 2. Results of orthogonal spectral analysis

| $R_{\text{мех}}=100 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м} (\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}), m_{\Sigma}=1,157 \text{ кг} (\text{kg}), k_{\text{пр}}=1,85\cdot 10^5 \text{ Н}/\text{м} (\text{N}/\text{m}),$ $\delta_0=5\cdot 10^{-3} \text{ м} (\text{m}), \delta_{\text{ср}}=1\cdot 10^{-3} \text{ м} (\text{m})$ | | | | | | |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| F_0 | F_1 | F_{11} | F_2 | F_{21} | F_3 | F_{31} |
| 98,816 | -3,7 | 136,152 | -28,9 | -3,14 | 0 | 22,716 |
| F_4 | F_{41} | F_5 | F_{51} | F_6 | F_{61} | F_7 |
| -1,71 | -1,26 | 0 | 13,629 | -2,474 | -0,807 | 0 |
| F_{71} | F_8 | F_{81} | F_9 | F_{91} | F_{10} | F_{101} |
| 9,735 | -1,374 | -0,598 | 0 | 7,572 | -0,875 | -0,475 |

Таблица 3. Результаты амплитудно-фазового анализа
Table 3. Results of magnitude-phase analysis

| $R_{\text{мех}}=100 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м} (\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}), m_{\Sigma}=1,157 \text{ кг} (\text{kg}), k_{\text{пр}}=1,85\cdot 10^5 \text{ Н}/\text{м} (\text{N}/\text{m}),$ $\delta_0=5\cdot 10^{-3} \text{ м} (\text{m}), \delta_{\text{ср}}=1\cdot 10^{-3} \text{ м} (\text{m})$ | | | | | | |
|--|--------|---------|--------|--------|--------|--------|
| k | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| AF_k | 96,816 | 136,202 | 32,937 | 22,716 | 5,907 | 13,629 |
| $\alpha F_k(360/2\pi)$ | - | -1,555 | 83,796 | 0 | 77,734 | 0 |
| k | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | |
| AF_k | 2,602 | 9,735 | 1,499 | 8,553 | 0,995 | |
| $\alpha F_k(360/2\pi)$ | 71,937 | -22,1 | 66,499 | 0 | 61,474 | |

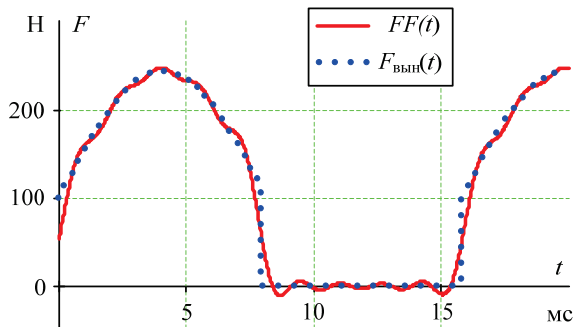


Рис. 6. Сравнение исходной и восстановленной после спектрального анализа по десяти гармоникам вынуждающей силы

Fig. 6. Comparison of the original and reconstructed driving force after spectral analysis by ten harmonics

Оценим содержание первой гармоники с частотой, равной резонансной частоте механического контура, нулевой гармоники и высших гармоник (табл. 4).

В результате получено аналитическое описание идеальной электромагнитной вынуждающей колебания силы на резонансной частоте.

Теперь оценим степень подавления неосновных гармоник найденной оптимальной вынуждающей силы в резонансном режиме при заданной величине коэффициента вязкого трения. Для этого к уравнению (1) нужно применить преобразование Лапласа – получим операторное уравнение

$$F_{\text{эм}}(p) = m_{\Sigma} p^2 x(p) + R_{\text{мех}} p x(p) + x(p) k_{\text{пр}},$$

$$F_{\text{эм}}(p) = x(p)(m_{\Sigma} p^2 + R_{\text{мех}} p + k_{\text{пр}}).$$

Таблица 4. Распределение гармонического состава вынуждающей колебания силы оптимальной формы

Table 4. Distribution of harmonic composition of optimal form driving force

| Коэффициент основной гармоники силы оптимальной формы Coefficient of the main harmonic of the optimal form force | Коэффициент нулевой гармоники силы оптимальной формы Coefficient of the zero harmonic of the optimal form force | Коэффициент высших гармоник силы оптимальной формы Coefficient of the high-harmonics of the optimal form force |
|---|--|---|
| $kF_{1\%} = \frac{AF_1}{\sum_{k=0}^{k=10} AF_k}$ | $kF_{0\%} = \frac{AF_0}{\sum_{k=0}^{k=10} AF_k}$ | $kF_{\text{выс}\%} = \frac{\sum_{k=2}^{k=10} AF_k}{\sum_{k=0}^{k=10} AF_k}$ |
| $kF_{1\%} = 41,689 \%$ | $kF_{0\%} = 29,634 \%$ | $kF_{\text{выс}\%} = 28,677 \%$ |

Зная, что $x(p) = \frac{v(p)}{p}$, получим передаточную

функцию механического контура по скорости

$$W_v(p) = \frac{v(p)}{F_{\text{эм}}(p)}, \quad W_v(p) = \frac{p}{(m_{\Sigma} p^2 + R_{\text{мех}} p + k_{\text{пр}})}.$$

Заменив p на $j\omega$, получим комплексно-частотную характеристику механического контура по виброскорости

$$W_v(p) = P(\omega) + jQ(\omega) = A(\omega)e^{j\phi(\omega)},$$

$$W_v(p) = \frac{j\omega}{(m_{\Sigma} j^2 \omega^2 + R_{\text{мех}} j\omega + k_{\text{пр}})} = \frac{R_{\text{мех}} \omega^2 + j\omega(k_{\text{пр}} - m_{\Sigma} \omega^2)}{(k_{\text{пр}} - m_{\Sigma} \omega^2)^2 + R_{\text{мех}}^2 \omega^2},$$

где

$$A(\omega) = \frac{\omega \sqrt{R_{\text{мех}}^2 + (k_{\text{пр}} - m_{\Sigma} \omega^2)^2}}{(k_{\text{пр}} - m_{\Sigma} \omega^2)^2 + R_{\text{мех}}^2 \omega^2}$$

– амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) механического контура по виброскорости;

$$\phi(\omega) = \arctg\left(\frac{k_{\text{пр}} - m_{\Sigma} \omega^2}{R_{\text{мех}} \omega}\right)$$

– фазо-частотная характеристика (ФЧХ) механического контура по виброскорости.

Используя данные табл. 4, можно оценить степень подавления механическим контуром неосновных гармоник виброскорости для электромагнитной вынуждающей колебания силы оптимальной формы и для вынуждающей силы прямоугольной формы (табл. 5, 6).

Приращение суммарной колеблющейся массы вызывает уменьшение резонансной частоты, увеличивает добротность механического колебательного контура, а также уменьшает граничную величину коэффициентов вязкого трения и затухания, увеличивает показатель колебательности механического контура и максимальный размах колебаний на резонансной частоте. Кроме того, увеличение суммарных колеблющихся масс (за счёт присоединённых масс обрабатываемой жидкости) при-

водит к снижению предельного виброускорения в режиме свободно-вынужденных колебаний. К сожалению, из-за насыщения магнитной цепи нет возможности получить вынуждающую электромагнитную силу большую, чем это позволяет магнитный поток насыщения, который обусловлен магнитными свойствами стали магнитопровода, следовательно, для получения предельного виброускорения при максимальной стягивающей магнитный зазор силе нужно либо снижать суммарную колеблющуюся массу, либо увеличивать жёсткость пружины.

Таблица 5. Оценка подавления механическим контуром ВЭМА неосновных гармоник виброскорости при разных величинах коэффициента вязкого трения ($R_{\text{мех_гр}}=2\sqrt{k_{\text{пр}}m_{\Sigma}}=925,3 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}$)

Table 5. Estimation of suppression of minor harmonics by the vibration electromagnetic activator mechanical contour of vibration velocity with varying values of mechanical resistance ($R_{\text{мех_гр}}=2\sqrt{k_{\text{пр}}m_{\Sigma}}=925,3 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}$)

| $m_{\Sigma}=1,157 \text{ кг (kg)}, k_{\text{пр}}=1,85\cdot 10^3 \text{ Н/м (N/m)}, \delta_0=5\cdot 10^{-3} \text{ м (m)}, \delta_{\text{ст}}=1\cdot 10^{-3} \text{ м (m)}$ | | | | | | |
|--|--|-----------------------|---|-----------------------|---|-----------------------|
| k | $R_{\text{мех}}=10 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}$ (N·s/m) | | $R_{\text{мех}}=100 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}$ (N·s/m) | | $R_{\text{мех}}=462,5 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}$ (N·s/m) | |
| | $kV, \%$ | $kV, \text{ дБ (dB)}$ | $kV, \%$ | $kV, \text{ дБ (dB)}$ | $kV, \%$ | $kV, \text{ дБ (dB)}$ |
| 0 | 0 | −∞ | 0 | −∞ | 0 | −∞ |
| 1 | 100 | 0 | 100 | 0 | 100 | 0 |
| 2 | 1,44 | −36,83 | 14,44 | −16,82 | 68,12 | −3,33 |
| 3 | 0,81 | −41,82 | 8,15 | −21,77 | 42,84 | −7,36 |
| 4 | 0,57 | −44,78 | 5,8 | −24,73 | 31,25 | −10,1 |
| 5 | 0,45 | −46,93 | 4,53 | −26,87 | 24,66 | −12,16 |
| 6 | 0,37 | −48,62 | 3,73 | −28,56 | 20,39 | −13,81 |
| 7 | 0,32 | −50,03 | 3,17 | −29,97 | 17,39 | −15,19 |
| 8 | 0,27 | −51,23 | 2,76 | −31,17 | 15,17 | −16,39 |
| 9 | 0,24 | −52,28 | 2,45 | −32,22 | 13,46 | −17,42 |
| 10 | 0,22 | −53,22 | 2,20 | −33,15 | 12,09 | −18,35 |

Таблица 6. Амплитудный спектр неосновных гармоник виброскорости ВЭМА от воздействия на механический контур вынуждающей силы прямоугольной формы при разных величинах коэффициента вязкого трения ($R_{\text{мех_гр}}=2\sqrt{k_{\text{пр}}m_{\Sigma}}=925,3 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}$)

Table 6. Amplitude spectrum of minor harmonics of vibration electromagnetic activator vibration velocity from the impact of rectangular driving force on mechanical circuit with varying values of mechanical resistance ($R_{\text{мех_гр}}=2\sqrt{k_{\text{пр}}m_{\Sigma}}=925,3 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}$)

| $m_{\Sigma}=1,157 \text{ кг (kg)}, k_{\text{пр}}=1,85\cdot 10^3 \text{ Н/м (N/m)}, \delta_0=5\cdot 10^{-3} \text{ м (m)}, \delta_{\text{ст}}=1\cdot 10^{-3} \text{ м (m)}$ | | | | | | |
|--|--|-----------------------|---|-----------------------|---|-----------------------|
| k | $R_{\text{мех}}=10 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}$ (N·s/m) | | $R_{\text{мех}}=100 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}$ (N·s/m) | | $R_{\text{мех}}=462,5 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}$ (N·s/m) | |
| | $AV, \%$ | $AV, \text{ дБ (dB)}$ | $AV, \%$ | $AV, \text{ дБ (dB)}$ | $AV, \%$ | $AV, \text{ дБ (dB)}$ |
| 0 | 0 | −∞ | 0 | −∞ | 0 | −∞ |
| 1 | 100 | 0 | 100 | 0 | 100 | 0 |
| 2 | 0 | −∞ | 0 | −∞ | 0 | −∞ |
| 3 | 0,27 | −51,37 | 2,72 | −31,32 | 14,28 | −16,91 |
| 4 | 0 | −∞ | 0 | −∞ | 0 | −∞ |
| 5 | 0,09 | −60,91 | 0,91 | −40,85 | 4,93 | −26,14 |
| 6 | 0 | −∞ | 0 | −∞ | 0 | −∞ |
| 7 | 0,045 | −66,93 | 0,454 | −46,86 | 2,48 | −32,09 |
| 8 | 0 | −∞ | 0 | −∞ | 0 | −∞ |
| 9 | 0,027 | −71,37 | 0,272 | −51,30 | 1,49 | −36,51 |
| 10 | 0 | −∞ | 0 | −∞ | 0 | −∞ |

Для увеличения производительности ВЭМА необходим рост резонансной частоты. Этого можно добиться, применив пружину с большей жёсткостью. Увеличение жёсткости приведёт к повышению добротности, увеличению максимальной потенциальной энергии пружины. Поэтому при работе ВЭМА в режиме свободно-вынужденных колебаний произойдёт увеличение силы инерции и амплитуды виброускорения, что положительно скажется на процессах перемешивания и разжижения высоковязких жидкостей.

В ходе аналитических исследований идеальной вынуждающей силы было обнаружено, что она имеет отрицательную составляющую, которую невозможно сформировать в ВЭМА, так как сила является по своей природе только стягивающей и не может быть отталкивающей. Вследствие этого колебание якоря-активатора ВЭМА не может быть строго гармоническим, но можно добиться того, чтобы содержание неосновных гармоник виброскорости было минимальным. Это достигается повышением добротности механического колебательного контура или снижением коэффициента вязкого трения. ВЭМА-0,3 работает с коэффициентом вязкого трения практически на порядок (в 9,25 раза) меньшим граничного и в силу этого содержание неосновных гармоник виброскорости относительно невысоко (табл. 5, 6).

При разжижении высоковязких жидкостей с помощью ВЭМА, в первую очередь нефтепродуктов с высоким содержанием парафинов и асфальтенов, величина коэффициента вязкого трения не остаётся постоянной, а уменьшается по ходу работы ВЭМА. Снижение коэффициента вязкого трения колебательного контура приводит к увеличению добротности, максимального зазора магнитной цепи, резонансной частоты и показателя колебательности механического контура, а вследствие возрастания резонансной частоты увеличивается и амплитуда виброускорения, что, в конечном счёте, приводит к повышению эффективности разжижения рабочей высоковязкой жидкости.

Необходимо отметить, что в силу объективных причин механический контур ВЭМА рассматривался упрощенно, но такой анализ позволил обнаружить основные закономерности его работы. В дальнейшем представляется интересным исследовать варианты конструкции ВЭМА с двухполупериодным режимом работы, так как в этом случае представляется возможным получить идеальную вынуждающую колебания силу.

Настройка ВЭМА на режим резонансных колебаний с предельной амплитудой

Задачами устройства (рис. 7) является автоматическая подстройка частоты и управление амплитудой механических колебаний якоря-активатора ВЭМА [24, 25].

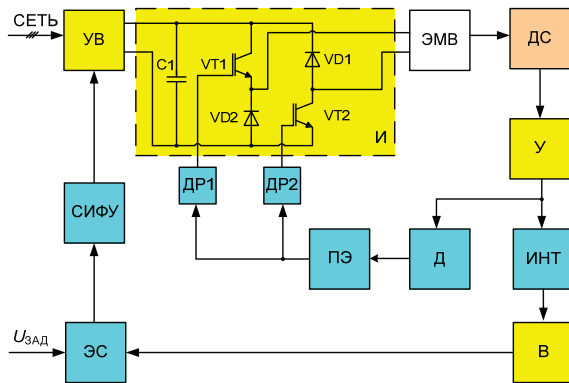


Рис. 7. Функциональная схема устройства, обеспечивающего настройку ВЭМА на режим резонансных колебаний с предельной амплитудой

Fig. 7. Functional scheme of a device, providing vibration electromagnetic activators regulation for a resonant oscillation mode with a limiting amplitude

Устройство, обеспечивающее настройку ВЭМА на режим резонансных колебаний с предельной амплитудой, работает следующим образом. После включения устройства рабочий орган электромагнитного вибратора (ЭМВ) совершает колебательные движения с частотой собственных колебаний. На выходных зажимах датчика скорости (ДС), усилителя (У) и блока дифференцирования (Д) появляются сигналы синусоидальной формы, частота которых равна частоте колебаний рабочего органа вибратора. Пороговый элемент (ПЭ) преобразует синусоидальный сигнал в прямоугольные управляющие импульсы, положительное значение на входе преобразуется в логическую единицу, отрицательное – в ноль. Далее импульсы управления через драйверы (ДР1, ДР2) поступают на транзисторы инвертора (И). В течение единичного уровня на выходе порогового элемента IGBT транзисторы VT1 и VT2 открыты, что приводит к протеканию тока через обмотку электромагнитного вибратора и притягиванию рабочего органа. В течение нулевого уровня IGBT транзисторы закрыты, а энергия, накопленная в обмотке электромагнитного вибратора, сбрасывается через диоды VD1 и VD2 на конденсатор C1 инвертора (И). Таким образом, реактивная мощность не рассеивается, а используется для формирования следующей полуволны колебаний. Чтобы спадающий в катушке ЭМВ ток не препятствовал движению рабочего органа в обратную сторону, опорный сигнал порогового элемента может быть установлен не нулевым, а небольшим положительным значением. Данная мера несколько уменьшит интервал открытого состояния транзисторов и предоставит дополнительное время для сброса реактивной мощности.

В то же время сигнал, пропорциональный скорости рабочего органа электромагнитного вибратора, снимаемый с датчика скорости, усиленный с помощью усилителя и проинтегрированный блоком интегрирования (ИНТ), пропорционален коле-

баниям рабочего органа, а сигнал на выходе выпрямителя (В) пропорционален амплитуде этих колебаний. Элемент сравнения (ЭС) сравнивает этот сигнал с сигналом задания $U_{зад}$, и их разность подается в систему импульсно-фазового управления (СИФУ). СИФУ преобразует постоянное во времени напряжение в импульсы прямоугольной формы, длительность которых зависит от величины входного напряжения. В зависимости от длительности выходных импульсов формирователя меняются углы отпирания тиристоры управляемого выпрямителя (УВ) и тем самым меняются величины напряжений управляемого выпрямителя и инвертора.

Таким образом, устройство управления осуществляет стабилизацию амплитуды колебаний электромагнитного вибратора в резонансном режиме работы.

Оценка погрешности линейной математической системы ВЭМА на основе АЧХ

Выше приведены результаты исследования процессов резонансных колебаний с предельной амплитудой в механической системе вибрационного электромагнитного активатора ВЭМА-0,3 с применением линеаризованной математической модели. Параметры этой модели были идентифицированы на основе решения системы нелинейных алгебраических уравнений, связывающих искомые параметры механической системы с граничными частотами полосы пропускания. Методика подробно изложена в ранее опубликованной работе [26]. На рис. 8 представлены экспериментальные и аналитические АЧХ в двух основных обрабатываемых средах – нефти и воде, при варьировании тока от 1,5 до 5 А.

Так как параметры $R_{мех}$ и m_{Σ} определялись на основе граничных частот полосы пропускания, как и ожидалось, экспериментальные и аналитические АЧХ строго совпадают в двух точках: при нижней $f_{a_гп_1}$ и верхней $f_{a_гп_2}$ граничных частотах полосы пропускания. Но в силу линеаризации математической модели механической системы, а также из-за особенностей конструкции якоря-активатора ВЭМА резонансные частоты на экспериментальной и аналитической АЧХ несколько различаются (рис. 8). Погрешность линеаризации математической модели механической системы ВЭМА оценим на основе рассогласования резонансных частот как:

$$\delta f = \frac{|f_{0.эксп} - f_{0.аналит}|}{f_{0.эксп}} \cdot 100 \%,$$

где $f_{0.эксп}$, Гц – резонансная частота АЧХ ВЭМА-0,3 на основе данных эксперимента; $f_{0.аналит}$, Гц – резонансная частота АЧХ ВЭМА-0,3 на основе аналитических расчетов.

Результаты расчета этой погрешности сведены в табл. 1.

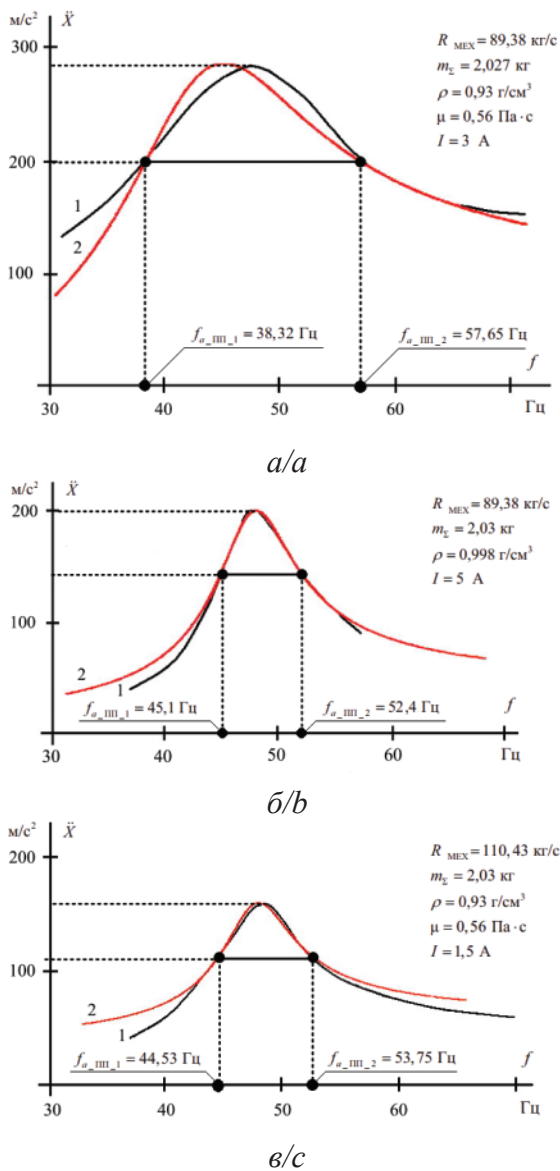


Рис. 8. АЧХ: 1 – аналитическая; 2 – экспериментальная; а) нефть; б) вода; в) нефть

Fig. 8. Frequency response; 1 – analytical; 2 – experimental; a) petroleum; b) water; c) petroleum

На основе данных табл. 7 можно отметить, что обобщенная погрешность лежит в пределах от 1,06 до 6,03 %. Эта погрешность относительно невысока, что косвенно подтверждает правомочность допущений, принятых выше в данной статье при рассмо-

трению режимов резонансных колебаний с предельной амплитудой в механической системе ВЭМА.

Таблица 7. Результаты расчета погрешности определения резонансной частоты ВЭМА-0.3

Table 7. Results of calculation of the error in determining the resonant frequency VEMA-0.3

| Параметры Parameters | Условия проведения и результаты эксперимента Conditions and results of the experiment | | |
|---------------------------------------|--|------------|-----------------|
| | Нефть/Petroleum | Вода Water | Нефть/Petroleum |
| $I, \text{ A}$ | 3,0 | 5,0 | 1,5 |
| $f_{a_шт_1}, \text{ Гц (Hz)}$ | 38,22 | 45,1 | 44,53 |
| $f_{a_шт_2}, \text{ Гц (Hz)}$ | 57,65 | 52,4 | 53,75 |
| $R_{\text{мех}}, \text{ кг/с (kg/s)}$ | 232,71 | 89,38 | 110,43 |
| $m_{\Sigma}, \text{ кг (kg)}$ | 2,447 | 2,027 | 2,026 |
| $f_{0_эксп}, \text{ Гц (Hz)}$ | 45,09 | 48,06 | 47,97 |
| $f_{0_аналит}, \text{ Гц (Hz)}$ | 47,81 | 47,55 | 48,59 |
| $\delta f, \%$ | 6,03 | 1,06 | 1,29 |

Выводы

1. На основании обзора источников показана эффективность и перспективность применения вибрационных электромагнитных активаторов для подготовки буровых растворов и разжижения высоковязких нефтепродуктов.
2. Предложен оригинальный подход для исследования резонансных колебаний с предельной амплитудой в механической системе вибрационных электромагнитных активаторов на основе линейной математической модели. Исследован режим свободных колебаний якоря-активатора с предельной амплитудой в первом полупериоде резонансных колебаний при вариации параметров механической системы, что обусловлено изменением физических свойств обрабатываемых жидких сред. Получено аналитическое выражение для вынуждающей силы, обеспечивающей режим вынужденных колебаний, который предлагается рассматривать как естественное дополнение режима свободных колебаний.
3. Исследовано разработанное техническое решение, обеспечивающее настройку вибрационных электромагнитных активаторов на режим резонансных колебаний с предельной амплитудой.
4. На основе сопоставительного анализа экспериментальных и модельных частотных характеристик продемонстрирован приемлемый уровень погрешности применения линейной математической модели механической системы 1,06...6,03 % при настройке ВЭМА на режим резонансных колебаний с предельной амплитудой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aver'yanov G.S., Khamitov R.N., Zubarev A.V. Dynamics of oscillatory systems with controllable shock absorbers // Russian Engineering Research. – 2008. – V. 28 (6). – P. 543–547.
2. Khamitov R.N., Aver'yanov G.S., Korchagin A.B. Pneumatic shock absorber with an active damping system // Russian Engineering Research. – 2009. – V. 29 (9). – P. 871–873.

3. Pevchev V.P. The superexcitation and efficiency relation in a short-stroke pulsed electromagnetic motor of a seismic source // Journal of Mining Science. – 2010. – V. 46. – № 6. – P. 656–665.
4. Кувшинов К.А., Мойзес Б.Б., Крауинш П.Я. Импульсно-вибрационный источник сейсмических сигналов // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 1. – С. 77–81.

5. Simonov B.F., Neiman V.Y., Shabanov A.S. Pulsed Linear Solenoid Actuator for Deep-Well Vibration Source // *Journal of Mining Science*. – 2017. – V. 53 (1). – P. 117–125.
6. Шнейерсон М.Б. Теория и практика наземной сейсмозведки. – М.: Недра, 1988. – 527 с.
7. Pevchev V.P. Science of mining machines the superexcitation and efficiency relation in a short-stroke pulsed electromagnetic motor of a seismic source // *Journal of Mining Science*. – 2010. – V. 46 (6). – P. 656–665.
8. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Моделирование динамических процессов в электромагнитных преобразователях энергии для систем генерирования силовых воздействий и низкочастотных вибраций // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2015. – Т. 326. – № 4. – С. 154–162.
9. Pevchev V.P. Principal dimensions of the short-stroke electromagnetic motor for a seismic wave generator // *Journal of Mining Science*. – 2009. – V. 45. – № 4. – P. 372–381.
10. Oil recovery from tank bottom sludge using rhamnolipids / Chuhan Liu, Yin Zhang, Shanshan Sun, Lixin Huang, Li Yu, Xiaonan Liu, Ruiqiu Lai, Yijing Luo, Zhiyong Zhang, Zhongzhi Zhang // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2018. – V. 170. – P. 14–20.
11. Analysis of oil content in drying petroleum sludge of tank bottom / Yuhua Wang, Xiaomin Zhang, Yuying Pan, Ying Chen // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2017. – V. 42. – № 29. – P. 18681–18684.
12. Da S.L., Alves F.C., De França F.P. A review of the technological solutions for the treatment of oily sludges from petroleum refineries // *Waste Management & Research*. – 2012. – V. 30 (10). – P. 1016–1030.
13. Исследование процесса струйного размыва донных отложений в нефтяных резервуарах / В.Г. Бутов, А.В. Никульчиков, В.К. Никульчиков, В.А. Солоненков, А.А. Ящук // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 9. – С. 93–100.
14. Nekrasov V.O. Modeling bottom sediment erosion process by swirling the flow by tangential supply of oil in the tank // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: Transport and Storage of Hydrocarbons*. – 2016. – V. 154. – 7 p. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/154/1/012003> (дата обращения 13.06.2018).
15. Burkov P.V., Burkova S.P., Samigullin V.D. Computer Simulation of Stress Strain State of Oil Gathering Pipeline Designed for Ugut Field // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – V. 125: *Materials Treatment: Current Problems and Solutions*. – 7 p.
16. Расчет гидравлических сопротивлений затопленного вибрирующего конфузора электромагнитного вибратора / А.В. Азин, Е.П. Богданов, С.В. Пономарев, С.В. Рикконен // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328. – № 2. – С. 67–75.
17. Расчет энергетических параметров затопленного вибрирующего конфузора электромагнитного вибратора / А.В. Азин, Е.П. Богданов, С.В. Пономарев, С.В. Рикконен // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328. – № 5. – С. 16–23.
18. Bogdanov E., Nomokonova Y., Rikkonen S. Oscillatory system of the jet electromagnetic vibrator // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2014. – V. 66 (1). – P. 012017.
19. Real time prediction of suspended solids in drilling fluids. Review Article / S.C. Magalhães, C.M. Scheid, L.A. CalHada, L.M.M. Lutterbach, R.S. Rezende, A.T.A. Waldmann // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – March 2016. – V. 30. – P. 164–175.
20. Данекер В.А., Рикконен С.В. Приготовление и коррекция показателей бурового раствора технологией и оборудованием ВСМА // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328. – № 7. – С. 86–92.
21. Neyman L.A., Neyman V.Y. Dynamic model of a vibratory electromechanical system with spring linkage // *Proceedings-2016 11th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2016*. – 2017. – № 7884234. – P. 23–27.
22. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Влияние механических потерь на выходные показатели электромеханической колебательной системы с электромагнитным возбуждением // *Актуальные проблемы в машиностроении*. – 2016. – № 3. – С. 234–240.
23. Neyman L.A., Neyman V.Y., Shabanov A.S. Vibration dynamics of an electromagnetic drive with a half-period rectifier // *International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM*. – 2017. – № 7981805. – P. 503–506.
24. Глазырин А.С. Системы питания и автоматического управления вибрационными электромагнитными активаторами: дисс.... канд. техн. наук. – Томск, 2004. – 193 с.
25. Устройство для управления электромагнитными вибраторами: пат. № 2348961 РФ. МПК G05D19/02 (2006.01). Заявка № 2008102340/28; опубл. 10.03.2008, Бюл. № 7. – 6 с.
26. Идентификация параметров механической системы на примере вибрационного электромеханического преобразователя энергии / А.С. Глазырин, В.В. Тимошкин, С.В. Цурпал, Т.А. Глазырина // *Известия Томского политехнического университета*. – 2010. – Т. 316. – № 4. – С. 174–177.

Поступила 10.10.2018 г.

Информация об авторах

Гаврилин А.Н., кандидат технических наук, доцент отделения материаловедения Инженерной школы новых производственных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Боловин Е.В., ассистент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Глазырин А.С., доктор технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Кладиев С.Н., кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Полищук В.И., доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

UDC 621.313.282.2: 621.316.79

RESONANT OSCILLATIONS WITH A LIMITING AMPLITUDE IN A VIBRATION ELECTROMAGNETIC ACTIVATOR

Alexey N. Gavrilin¹,

tom-gawral@list.ru

Evgeniy V. Bolovin¹,

boloinev@mail.ru

Alexander S. Glazyrin¹,

asglazyrin@tpu.ru

Sergey N. Kladiev¹,

kladiev@tpu.ru

Vladimir I. Polishchuk²,

polischuk_vi@mail.ru

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

² Polzunov Altai State Technical University,
46, Lenin Avenue, Barnaul, 656038, Russia.

The relevance of the research is caused by the fact that vibration electromagnetic activators are promising for use in various technologies. These technologies are associated with extraction and transportation of georesources, including preparation of drilling fluids and liquefaction of viscous oil products. Vibrating electromagnetic activator is an electric machine of reciprocating motion with an armature-activator, which forms turbulent submerged jets in a treated liquid medium. In the first half-period, the armature-activator is attracted to the wall due to a current pulse in the coils and potential energy is accumulated in the elastic spring. This is a mode of forced oscillations in mechanical system of a vibrating electromagnetic activator. In the second half-period there is no current in the coils and the armature-activator is repelled from the walls due to the spring energy. This is the mode of free oscillations in the mechanical system. Vibration electromagnetic activators should be tuned to the resonant frequency to maximize energy efficiency. The resonant frequency is not constant and depends on the properties of the treated fluid. The shape of the force-induced oscillation must provide oscillations in mechanical system at the resonant frequency with a limiting amplitude. This fact will increase the energy efficiency and performance of a vibration electromagnetic activator.

The main aim of the research is to conduct analytical research to provide resonant oscillations with a limiting amplitude in a vibration electromagnetic activator.

Methods of the research are based on using ordinary differential equations, Laplace transform, amplitude-frequency characteristics, systems of nonlinear algebraic equations, spectral analysis, comparison of analytical and experimental characteristics

Results. The authors have considered the mode of free oscillations of the armature-activator with the limiting amplitude based on linearized mathematical model of the mechanical vibration electromagnetic activator system. The mode of forced oscillations is proposed to be considered as a natural addition to the mode of free oscillations with a driving force that acts half the period and has a special form. It is shown that the modes of free and forced oscillations substantially depend on the parameters of the mechanical system. Such parameters depend on the properties of the treated liquid medium. The authors carried out the spectral analysis of the driving force, providing resonant oscillations with a limiting amplitude in the vibration electromagnetic activator mechanical system. The paper introduces the technical solution that ensures the control of the vibration electromagnetic activator with automatic tuning to the resonant frequency and the limiting amplitude of oscillations of the armature-activator. This mode maximizes the energy efficiency and productivity of the mixing liquid processed media. Based on a comparison of analytical and experimental frequency characteristics the authors confirmed the hypothesis of admissibility of linearizing the mathematical model of vibration electromagnetic activator mechanical system in an analytical study of the driving force of the optimal form.

Key words:

Drilling fluid, highly viscous oil product, vibratory electromagnetic activator, resonance, force-induced oscillations, free oscillations, forced oscillations, spectral analysis, tuning to the resonant frequency, error estimate.

REFERENCES

1. Aver'yanov G.S., Khamitov R.N., Zubarev A.V. Dynamics of oscillatory systems with controllable shock absorbers. *Russian Engineering Research*, 2008, vol. 28 (6), pp. 543–547.
2. Khamitov R.N., Aver'yanov G.S., Korchagin A.B. Pneumatic shock absorber with an active damping system. *Russian Engineering Research*, 2009, vol. 29 (9), pp. 871–873.
3. Pevchev V.P. The superexcitation and efficiency relation in a short-stroke pulsed electromagnetic motor of a seismic source. *Journal of Mining Science*, 2010, vol. 46, no. 6, pp. 656–665.
4. Kuvshinov K.A., Moizes B.B., Krauinsh P.Ya. Pulse-vibration source of seismic signals. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 317, no. 1, pp. 77–81. In Rus.

5. Simonov B.F., Neyman V.Y., Shabanov A.S. Pulsed Linear Solenoid Actuator for Deep-Well Vibration Source. *Journal of Mining Science*, 2017, vol. 53 (1), pp. 117–125.
6. Shneerson M.B. *Teoriya i praktika nazemnoy seymorazvedki* [Theory and practice of ground seismic exploration]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 527 p.
7. Pevchev V.P. Science of mining machines the superexcitation and efficiency relation in a short-stroke pulsed electromagnetic motor of a seismic source. *Journal of Mining Science*, 2010, vol. 46 (6), pp. 656–665.
8. Neyman L.A., Neyman V.U. Simulation of dynamic processes in electromagnetic energy converters for force effects and low-frequency vibrations generation systems. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 4, pp. 154–162. In Rus.
9. Pevchev V.P. Principal dimensions of the short-stroke electromagnetic motor for a seismic wave generator. *Journal of Mining Science*, 2009, vol. 45, no. 4, pp. 372–381.
10. Chuhan Liu, Yin Zhang, Shanshan Sun, Lixin Huang, Li Yu, Xiaonan Liu, Ruiqiu Lai, Yijing Luo, Zhiyong Zhang, Zhongzhi Zhang. Oil recovery from tank bottom sludge using rhamnolipids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 170, pp. 14–20.
11. Yuhua Wang, Xiaomin Zhang, Yuying Pan, Ying Chen. Analysis of oil content in drying petroleum sludge of tank bottom. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, vol. 42, no. 29, pp. 18681–18684.
12. Da S.L., Alves F.C., De França F.P. A review of the technological solutions for the treatment of oily sludges from petroleum refineries. *Waste Management & Research*, 2012, vol. 30 (10), pp. 1016–1030.
13. Butov V.G., Nikulchikov A.V., Nikulchikov V.K., Solonenko V.A., Yashchuk A.A. Simulation study of bottom sediments jet erosion in oil tank. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets engineering*, 2018, vol. 329, no. 9, pp. 93–100. In Rus.
14. Nekrasov V.O. Modeling bottom sediment erosion process by swirling the flow by tangential supply of oil in the tank. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: Transport and Storage of Hydrocarbons*, 2016, vol. 154, 7 p.
15. Burkov P.V., Burkova S.P., Samigullin V.D. Computer Simulation of Stress Strain State of Oil Gathering Pipeline Designed for Ugut Field. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 125, 7 p.
16. Azin A.V., Bogdanov E.P., Ponomarev S.V., Rikonen S.V. Calculation of hydraulic resistances of a submerged vibrating confuser of an electromagnetic vibrator. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017. vol. 328, no. 2, pp. 67–75. In Rus.
17. Azin A.V., Bogdanov E.P., Ponomarev S.V., Rikonen S.V. Calculation of energy parameters of submerged vibrating confuser of an electromagnetic vibrator. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 5, pp. 16–23.
18. Bogdanov E., Nomokonova Y., Rikonen S. Oscillatory system of the jet electromagnetic vibrator. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2014, vol. 66 (1), pp. 12–17.
19. Magalhães S.C., Scheid C.M., CalHada L.A., Lutterbach L.M.M., Rezende R.S., Waldmann A.T.A. Real time prediction of suspended solids in drilling fluids. Review Article. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, March 2016, vol. 30, pp. 164–175.
20. Daneker V.A., Rikonen S.V. Preparation and correction of drilling mud by technology and equipment of vibro-jet-magnetic activation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 7, pp. 86–92. In Rus.
21. Neyman L.A., Neyman V.Y. Dynamic model of a vibratory electromechanical system with spring linkage. *11th International Forum on Strategic Technology*, 2017, no. 7884234, pp. 23–27.
22. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Vliyaniye mekhanicheskikh poter na vykhodnye pokazateli elektromekhanicheskoy kolebatelnoy sistemy s elektromagnitnym vzbuzhdeniem [The effect of mechanical losses on the output indicators of an electromechanical oscillatory system with electromagnetic excitation]. *Aktualnye problemy v mashinostroenii*, 2016, no. 3, pp. 234–240.
23. Neyman L.A., Neyman V.Y., Shabanov A.S. Vibration dynamics of an electromagnetic drive with a half-period rectifier. *International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM*, 2017, no. 7981805, pp. 503–506.
24. Glazyrin A.S. *Sistemy pitaniya i avtomaticheskogo upravleniya vibratsionnymi elektromagnitnymi aktivatorami*. Diss. Kand. nauk [Power systems and automatic control of vibration electromagnetic activators. Cand. Sc. Diss.]. Tomsk, 2004. 193 p.
25. Tsurpal S.V., Glazyrin A.S. *Ustroystvo dlya upravleniya elektromagnitnymi vibratorami* [Device for controlling electromagnetic vibrators]. Patent RF, no. 2008102340/28, 2008.
26. Glazyrin A.S., Timoshkin V.V., Tsurpal S.V., Glazyrina T.A. Identification of a mechanical system parameters on the example of a vibratory electromechanical energy converter. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 316, no. 4, pp. 174–177. In Rus.

Received: 10 October 2018.

Information about the authors

Alexey N. Gavrilin, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Evgeniy V. Bolovin, assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexander S. Glazyrin, Dr. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Sergey N. Kladiev, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Vladimir I. Polishchuk, Dr. Sc., professor, Polzunov Altai State Technical University.

УДК 622.276

МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ВЫРАБОТКИ ЗАПАСОВ НЕФТИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ, ОСЛОЖНЕННЫХ ТЕКТОНИЧЕСКИМИ НАРУШЕНИЯМИ

Стенькин Андрей Вениаминович¹,
andrey.stenkin@lukoil.com

Котенев Юрий Алексеевич^{2,3},
geokot@inbox.ru

Султанов Шамиль Ханифович^{2,3},
ssultanov@mail.ru

Уметбаев Виль Гайсович²,
kafedragl@yandex.ru

¹ ТПП «Урайнефтегаз» ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь»,
Россия, 628285, ХМАО–Югра, Тюменская область, г. Урай, ул. Ленина, 116а.

² Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Россия, 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

³ Институт стратегических исследований республики Башкортостан,
Россия, 450008, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Кирова, 15.

Актуальность. Нефтегазовые залежи месторождений Шаимского района осложнены разнопорядковыми тектоническими нарушениями. В статье рассмотрено влияние тектонических нарушений на разработку залежей и выработку запасов нефти из них. Объектом исследования являются продуктивные пласты юрских отложений месторождения Шаимского нефтегазоносного района, характеризующиеся высокой степенью неоднородности и низкими значениями фильтрационно-емкостных свойств, осложненными тектоническими нарушениями. Недостижение проектных показателей выработки запасов нефти для подобных месторождений требует проведения детального мониторинга разработки с учетом ключевых геологических характеристик и последующего регулирования и совершенствования системы разработки. Методический подход к совершенствованию системы разработки месторождений, осложненных тектоническими нарушениями, должен включать критический анализ первичной геолого-геофизической и промысловой информации, анализ основных показателей разработки, характеризующих выработку запасов нефти.

Цель работы: определение причин неравномерности выработки запасов по площади и разрезу продуктивных пластов, изучение влияния тектонических разломов различного порядка на эффективность реализуемой системы разработки, в том числе и на систему заводнения продуктивных пластов

Методы исследования: геолого-гидродинамическое моделирование разработки, геолого-промысловый анализ разработки, анализ результатов интерпретации гидродинамических исследований скважин, сопоставительный анализ фильтрационно-емкостных свойств пласта, полученных различными методами исследований. Анализ эффективности системы разработки проводился с использованием косвенных методов математической статистики, подкрепленных прямыми методами – трассерными исследованиями скважин.

Результаты. На примере Новомостовского нефтяного месторождения выделены гидродинамически обособленные участки с высокими значениями подвижных остаточных запасов, ограниченных тектоническими нарушениями, для которых предложены геолого-технические мероприятия и технологии, направленные на повышение выработки запасов нефти. По результатам проведенных исследований предложено методическое обоснование оперативного регулирования и мониторинга разработки пластов, осложненных тектоническими нарушениями.

Ключевые слова:

Месторождения Шаимского нефтегазоносного района, тектоническое нарушение, гидродинамическая взаимосвязь между скважинами, выработка запасов нефти, Новомостовское месторождение.

В последние два десятилетия в общемировых геологических запасах нефти и газа всё в большей степени начинают преобладать неантиклинальные ловушки углеводородов (УВ), среди которых значительное место принадлежит комплексным структурно-тектоническим, литолого-тектоническим и тектонически экранированным ловушкам [1–4]. Тектонические нарушения оказывают влияние на характер площадного распределения нефтегазоносности. Выявленные тектонические нарушения могут являться флюидопорами, а их совокупность может сформировать диа-

гональную систему разломов, вследствие чего вдоль плоскостей флюидопоров происходит изменение уровня водонефтяного контакта (ВНК). В этой связи надёжное картирование дизъюнктивных дислокаций при построении детальных геологических моделей месторождений становится необходимым условием их успешной разведки и дальнейшего проектирования систем разработки и эксплуатации продуктивных залежей [5, 6].

Для месторождений Шаимского нефтегазоносного района (НГР) вопрос изучения и уточнения геоло-

гического строения, в том числе распространения тектонических нарушений, является актуальным, особенно для месторождений со сформированной системой разработки. Наряду с широко развитыми разрывными нарушениями высокой амплитуды, для которых основным и достаточным признаком является разрыв и смещение продуктивных пластов по сместителю, важно выделять и картировать малоамплитудные нарушения, имеющие амплитуду смещения на грани разрешенности временного сейсмического разреза. Малоамплитудные смещения пластов, образующие в плане линейные аномалии, в существенной степени могут влиять на выработку запасов нефти. Это актуально и для месторождений Шаимского НГР при выделении и трассировании тектонических нарушений по отражающим горизонтам, стратифицируемым с кровлями продуктивных пластов верхней подсвиты тюменской свиты Ю₂–Ю₇. В границах только одного, среднего по запасам, месторождения данного НГР выделяются разломы ступенчатые и веерного строения [7–16].

Как уже отмечалось, сложное геологическое строение оказывает существенное влияние на величину отбора нефти месторождений, на которых запроектированный для бурения фонд скважин уже реализован [17–20]. В то же время по результатам эксплуатации скважин формируется представление об эффективности системы разработки и размещении скважин в условиях сильной тектонической деструкции продуктивных пластов [21–32].

Показательным примером влияния разломной тектоники на эффективность разработки для Шаимского НГР является Новомостовское месторож-

дение, продуктивные пласты которого осложнены системой тектонических нарушений. При построении геологической модели продуктивных пластов Ю₂–Ю₇ было выделено 63 отдельных сегмента – тектонических нарушений, при площади нефтеносности месторождения 7800 тыс. м² (рис. 1).

При проектировании Новомостовского месторождения, ввиду недостаточного представления о геологическом строении месторождения, в том числе о выдержанности пластов коллекторов Ю₂–Ю₆, заложении дизъюнктивных нарушений без смещения и с малой амплитудой смещения, была реализована площадная обращенная девятиточечная система разработки. Следует отметить, что с 2006 г. обзор проектных решений месторождений Шаимского и Красноленинского районов (Ем-Еговское, Кислорское, Ловинское, Сыморьяхское) свидетельствует о том, что на данных месторождения разработка продуктивных пластов тюменской свиты также осуществляется площадной обращенной девятиточечной системой с традиционным заводнением. Вышеуказанные месторождения, так же как и Новомостовское, с продуктивными пластами тюменской свиты имеют близкие геолого-геофизические параметры и характеризуются как высоко-расчлененные, низкопроницаемые и прерывистые с вязкостью нефти 0,4–1,8 мПа·с. Залежи нефти месторождений характеризуются неравномерной выработкой запасов нефти по площади.

Фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС) продуктивных пластов Новомостовского месторождения характеризуются низкой проницаемостью и высокой расчлененностью как по верти-

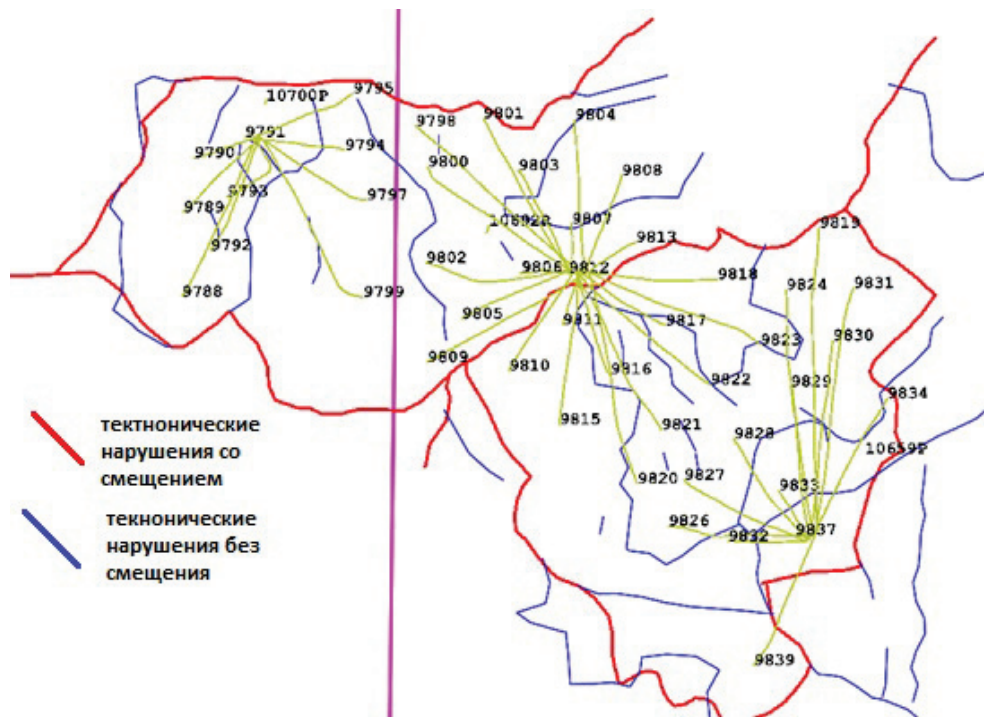


Рис. 1. Схема расположения разломов, выделенных в тюменской свите Новомостовского месторождения

Fig. 1. Scheme of the fault location of the Novomostovskoe oilfield in the Tyumen suite

кальному разрезу, так и по латерали, тем самым усложняя процесс разработки и подбор геолого-технических мероприятий, направленных на увеличение нефтеотдачи пластов. Фактором, осложняющим прогнозирование добычи углеводородов, является значительный разброс в значениях основных параметров, характеризующих фильтрационно-емкостные свойства пласта: пористость и проницаемость. Проницаемость, определенная различными методами – керн, гидродинамические исследования скважин (ГДИС) и по данным геофизических исследований скважин (ГИС), имеет существенную разницу в определенных интервалах продуктивных пластов Новомостовского месторождения. Так, например, значительное расхождение (в три и более раза) обнаружено в 32 % случаев. Особенно существенна разница показателей ФЕС по пласту Ю₆. Анализ предоставленных данных по ГИС, ГДИС и лабораторным исследованиям керна показал, что по скважинам с высоким расхождением значений рекомендуется переинтерпретация результатов исследований.

Геолого-промысловый анализ разработки и анализ выработки запасов нефти Новомостовского месторождения свидетельствуют о недостаточной эффективности разработки продуктивных пластов. Отмечаются опережающие темпы обводнения, объясняемые, вероятнее всего, наличием сети выявленных тектонических нарушений, являющихся каналами фильтрации и связывающих области дренирования скважин как с водонасыщенной частью пласта (водонасыщенные линзы присутствуют во всех пластах), так и с законтурной зоной. Характер выработки запасов нефти по площади месторождения также свидетельствует о наличии слабодренируемых участков. Около 69 % нефтенасыщенной площади пласта Ю₆ занимают зоны с коэффициентом выработки ниже 18 %, среди которых более всего распространены по площади нефтенасыщенные толщины от 4 до 8 м, здесь на них приходится около 37 % площади. Достаточно широко распространены по площади зоны с нефтенасыщенной толщиной от 8 до 12 м, где коэффициент выработки также в основном не превышает 21 %. На зоны с выработкой более 40 % в целом по пласту приходится менее 6 % общей площади нефтенасыщенных толщин.

В разрезе продуктивного пласта Ю₆ отмечено, что начальные подвижные запасы сосредоточены в основном в центральной его части, где также выделяется более интенсивная выработка. Доля извлеченных запасов нефти достигает 28 %, составляя в среднем 13 %.

Характер распределения основных технологических показателей разработки (удельных остаточных запасов, текущего пластового давления, обводненности) показывает высокую вариацию в пределах отдельных участков. Сопоставление указанных карт с картой расположения тектонических нарушений свидетельствует о видимой их корреляции.

Влияние тектонических разломов на выработку запасов нефти и оценка эффективности системы поддержания пластового давления, в том числе предположение о фильтрации пластового флюида через дизъюнктивные нарушения [17, 28–30], возможны и по анализу и сопоставлению ряда временных данных. К такой информации и данным можно отнести карты остаточных запасов нефти, изобар и разломов и их сопоставление, а также результаты анализа гидродинамических и трассерных исследований, статистических временных рядов «добыча–закачка», «добыча–добыча».

Совместный анализ карт изобар, разработки и остаточных запасов нефти по пластам Новомостовского месторождения показал, что отдельные зоны пластов характеризуются значительным перепадом пластового давления при больших объемах закачки рабочего агента с целью поддержания пластового давления (рис. 2).

Анализ основных показателей разработки свидетельствует о том, что текущий коэффициент использования запасов имеет низкие значения по пластам и эксплуатационные объекты разрабатываются неравномерно, при высокой обводненности продукции и снижении дебитов и пластового давления. Наблюдается рост пластового давления на участках, оконтуренных разрывными нарушениями при закачке рабочего агента, при этом дебиты нефти скважин низкие и с высокой долей воды в объеме добываемой продукции. Перераспределение давления не происходит, возможно, из-за слабопроницаемых тектонических нарушений.

С целью определения гидродинамического взаимодействия между нагнетательными и добывающими скважинами выполнен статистический (регрессионный) анализ по временным рядам «закачка воды – отбор жидкости». Анализ показал, что имеются скважины с отсутствием взаимосвязи. Это обусловлено особенностями геологического строения – наличием разломов (рис. 3, таблица).

Таблица. Коэффициент корреляции по скважинам на выделенном участке № 1

Table. Correlation coefficient of production wells on the allocated site № 1

| Скважины Wells | Разрабатываемый пласт Developed layer | Коэффициент корреляции Correlation coefficient |
|-------------------|--|---|
| 9823 9829 | Ю ₆ | 0,024 |
| 9834 9829 | Ю ₆ | 0,001 |
| 9818 9831 | Ю ₂ | 0,784 |
| 9818 9831 | Ю ₆ | 0,179 |
| 9823 9824 | Ю ₄ | 0,003 |
| 9823 9824 | Ю ₂ | 0,054 |

Для оценки достоверности полученных результатов корреляционные зависимости сравнивались с результатами трассерных исследований. По результатам данного сопоставления получена высокая сходимость. Оценка гидродинамической связи между скважинами трассерными исследованиями

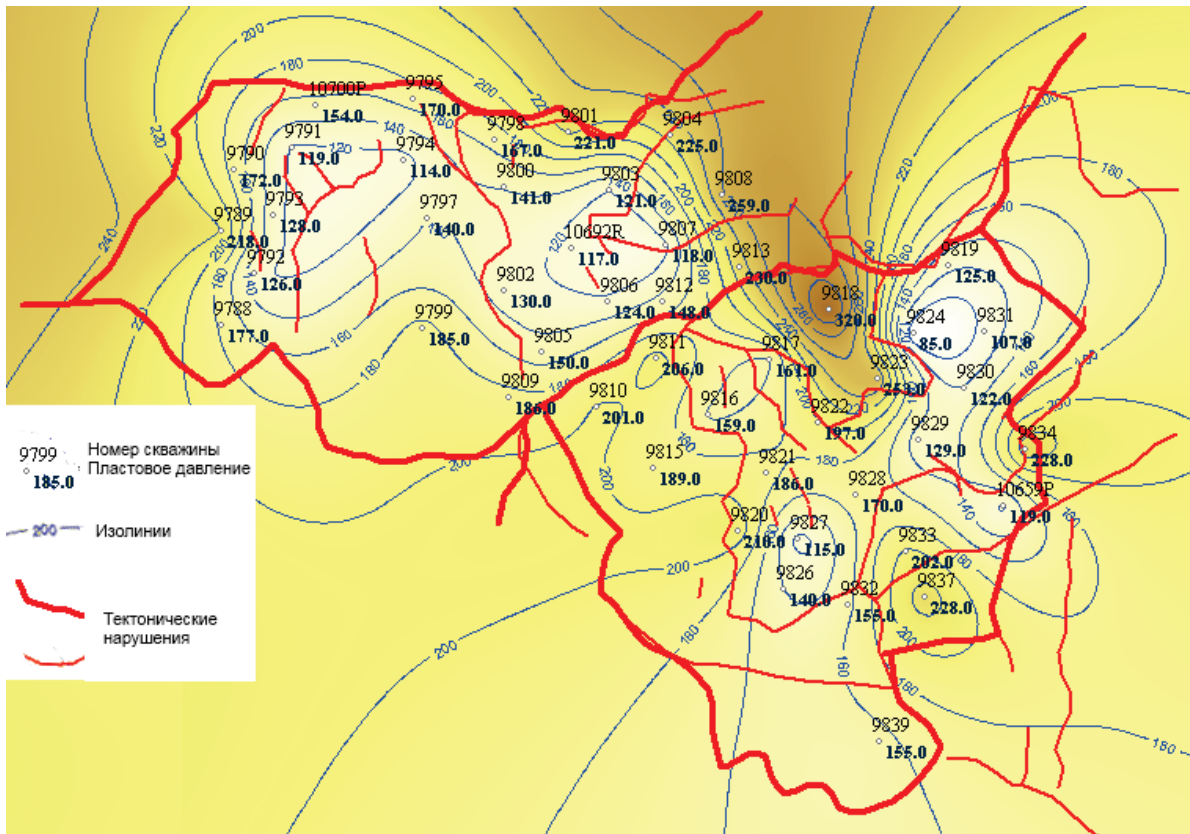


Рис. 2. Карта изобар с границами разнопорядковых тектонических нарушений Новомостовского месторождения

Fig. 2. Isobars map with the boundaries of different-order tectonic disturbances of the Novomostovskoe oilfield

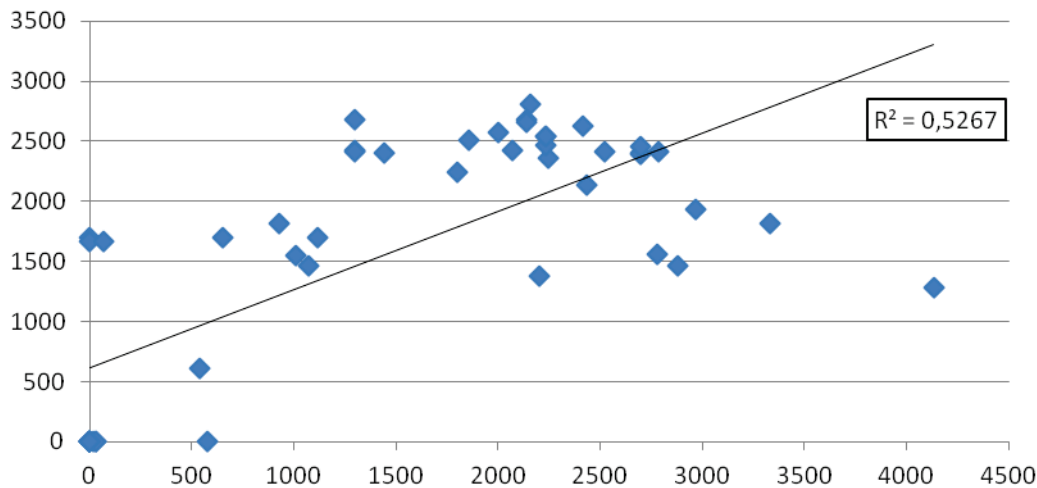


Рис. 3. График сопоставления показателей добычи жидкости и закачки воды нагнетательной скважины 9834 и добывающей скважины 9829, разрабатывающих пласт Ю₆

Fig. 3. Graph comparing fluid production and water injection through the injection well 9834 and the production well 9829 of the U₆

выполнена по ограниченному их количеству. И в связи с тем, что имеется подтверждение данных статистического анализа трассерными исследованиями, результаты взаимовлияния «добыча–закачка» и «добыча–добыча», полученные математическими расчетами, были приняты для пар скважин всего продуктивного пласта [4–6].

Составление карт остаточных запасов нефти, изобар, тектонических нарушений и коэффициентов корреляции позволило выделить участки, которые можно охарактеризовать как условно гидродинамически локализованные (рис. 2). На карте отчетливо выделяются перепады значения пластового давления, ограниченные тектоническими раз-

ломами, что в свою очередь свидетельствует о слабой проницаемости отдельных тектонических нарушений.

Выполненный по выделенным участкам геолого-промысловый анализ разработки свидетельствует о том, что по ним имеется потенциал повышения эффективности выработки запасов нефти путем совершенствования системы заводнения. Это приведет к постепенному восполнению энергетического состояния участков, планированию геолого-технических мероприятий (ГТМ) [5].

В условиях неопределенности границ гидродинамически связанного пласта рекомендуется проведение гидропрослушивания пласта, в том числе по причине наличия в непосредственной близости тектонического нарушения (разлома). При наличии слабой гидродинамической связи или полного ее отсутствия между скважинами могут быть предложены ГТМ, направленные на увеличение проницаемости пласта, например гидравлический разрыв пласта (ГРП). Проведение ГРП актуально для условий Новомостовского месторождения, эксплуатационные объекты которого характеризуются:

- высокой расчлененностью (0,28–0,30) по пластам Ю₃, Ю₄, Ю₆;
- высокой неоднородностью как по разрезу, так и по латерали, в связи с линзовидным строением коллектора;

- низкой проницаемостью коллектора;
- зонами замещения коллектора в пластах Ю₂ и Ю₅.

Для месторождений, залежи которых представлены неоднородным и низкопроницаемым коллектором, осложненных тектоническими нарушениями различного порядка, в условиях доступной информации и данных, рекомендуется методическое обоснование для выполнения оперативного регулирования и мониторинга разработки продуктивных пластов (рис. 4).

Выводы

Эффективная разработка месторождений с трудноизвлекаемыми запасами нефти требует оперативного регулирования разработки месторождений. В случае месторождений с залежами нефти, осложненными большим количеством тектонических нарушений, в том числе имеющих значительную амплитуду смещения продуктивных пластов, которые в свою очередь являются сильнорасчлененными и слабопроницаемыми, необходимо методическое сопровождение, позволяющее получить достоверное представление о гидродинамической связи коллектора как по разрезу, так и по площади и включающее:

- сравнительный анализ показателей фильтрационно-емкостных свойств пласта, определенных различными методами;

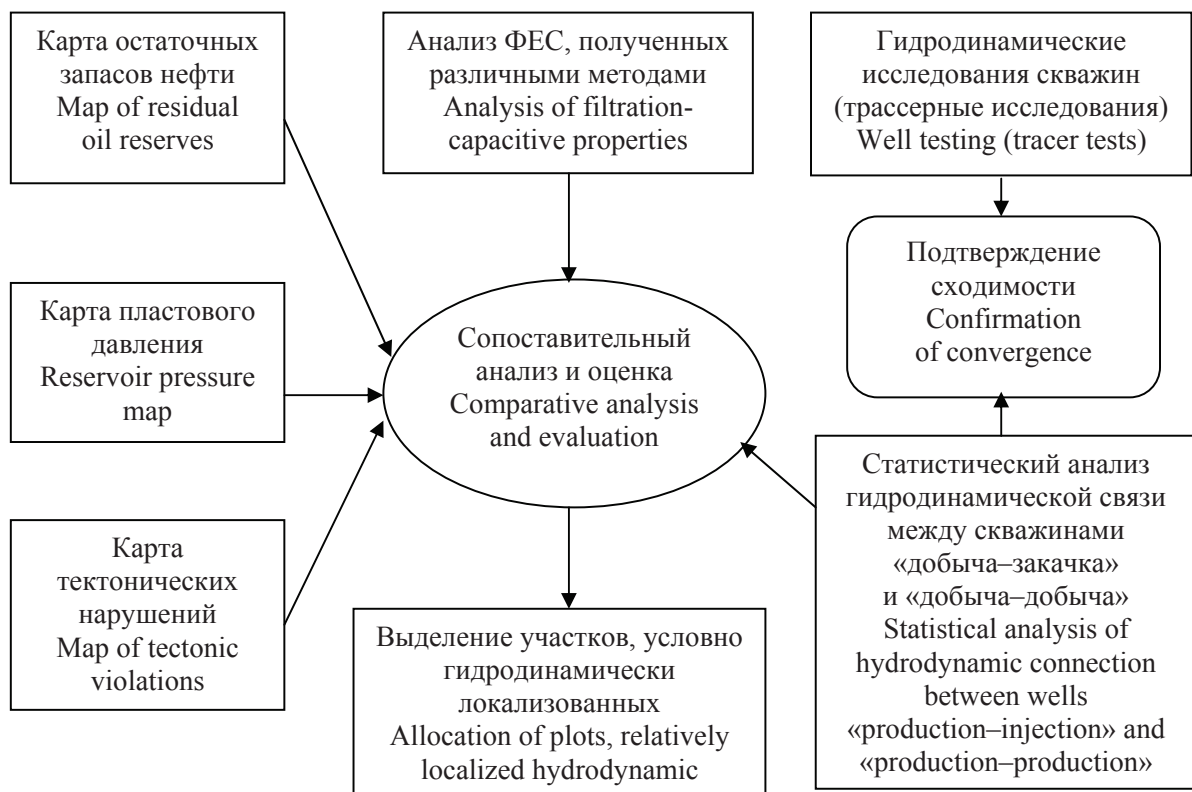


Рис. 4. Схема выделения участков, гидродинамически локализованных тектоническими нарушениями

Fig. 4. Scheme of allocation of the areas hydrodynamically localized by tectonic disturbances

- анализ распределения остаточных запасов нефти, пластового давления в границах зон с тектоническими нарушениями;
- анализ и сопоставление гидродинамических методов исследований скважин (трассерных ис-

- следований) с результатами статистической обработки данных по межскважинной корреляции «добыча–закачка» и «добыча–добыча»;
- выделение участков и разработка мероприятий, направленных на повышение нефтеизвлечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Особенности разработки залежей нефти, осложнённых тектоническими нарушениями / Ф.С. Салимов, А.Н. Лесной, Ю.А. Котенев, Д.Ю. Чудинова // Научно-технический журнал «Нефтегазовое дело». – 2016. – Т. 14. – № 1. – С. 42–48.
2. Особенности распределения физических свойств нефти в пластах Ватъеганского нефтяного месторождения / Л.Р. Фазылова, Ю.А. Котенев, Д.Ю. Чудинова, А.С. Валеев, М.Р. Дулкарнаев // Сборник научных трудов 43-й Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, посвященной 60-летию филиала УГНТУ в г. Октябрьском. – Октябрьский, 2016. – С. 263–267.
3. Проблемы интенсификации добычи нефти в низкопродуктивных пластах сложного геологического строения месторождений Красноленинского свода Западной Сибири / О.Г. Зацепин, А.В. Стенькин, В.В. Икс, Ю.А. Котенев, Д.Ю. Чудинова // Сборник научных трудов 43-й Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, посвященной 60-летию филиала УГНТУ в г. Октябрьском. – Октябрьский, 2016. – С. 166–170.
4. Методические основы планирования и организации интенсивных систем заводнения (на примере пластов Ватъеганского и Тевлинско-Русскинского месторождений) / А.С. Валеев, М.Р. Дулкарнаев, Ю.А. Котенев, Ш.Х. Султанов, Л.С. Бриллиант, Д.Ю. Чудинова // НТЖ «Экспозиция Нефть Газ». – 2016. – № 3 (49). – С. 38–44.
5. Геоинформационная стратегия разработки месторождений с трудноизвлекаемыми запасами нефти / Ш.Х. Султанов, Ю.А. Котенев, В.Е. Андреев, А.П. Стабинскас, И.В. Грехов // Георесурсы. – 2012. – № 3 (45). – С. 40–43.
6. Оптимизация системы заводнения в терригенных и карбонатных коллекторах / В.Е. Андреев, Д.Ю. Чудинова, А.П. Чижов, А.В. Чибисов // Научно-технический журнал «Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов». – 2016. – Вып. 4 (106). – С. 42–53.
7. Стратиграфия и палеогеография мезозойско-кайнозойского осадочного чехла Шаимского нефтегазоносного района (Западная Сибирь) / Э.О. Амон, В.П. Алексеев, А.Ф. Глебов, В.А. Савенко, Ю.Н. Федоров / под ред. В.П. Алексеева. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ, 2010. – 257 с.
8. Палеофациальный анализ отложений тюменской свиты Красноленинского месторождения / С.Л. Белоусов, О.А. Хурамшина, С.В. Шабакова, Е.В. Чернова // Научно-технический вестник ОАО «НК «РОСНЕФТЬ». – 2014. – № 3. – С. 8–12.
9. Бабин Е.А., Белозерова М.А., Ляпин А.В. Структурно-тектонические и сейсмодинамические особенности отложений тюменской свиты на примере месторождений ТПП «Урайнефтегаз» // Пути реализации нефтегазового и рудного потенциала ХМАО–Югры: XVII науч.-практ. конф. – Ханты-Мансийск, 2013. – С. 152–159.
10. Калгин В.П. Использование данных сейсморазведки для уточнения геологического строения тюменской свиты Красноленинского месторождения // Наука и ТЭК. – 2012. – № 4. – С. 25–26.
11. Перспективы нефтегазоносности отложений верхнетюменской подсвиты лицензионного участка Сургутский 7 / И.О. Быкова, С.Н. Шулико, А.А. Горячев, А.А. Вилисов, А.В. Коперчак // Пути реализации нефтегазового и рудного потенциала ХМАО–Югры: XIV науч.-практ. конф. – Ханты-Мансийск, 2011. – С. 350–359.
12. Иванов И.В. Метод улучшения связности коллекторов тюменской свиты месторождений Шаимского района при построении геологической модели на основе поинтервальной интерпретации ГИС // Пути реализации нефтегазового и рудного потенциала ХМАО–Югры: XIV науч.-практ. конф. – Ханты-Мансийск, 2011. – С. 230–237.
13. Кузьмин Ю.А., Иванова Н.А., Хайновская Я.А. Влияние эпигенетических процессов на фильтрационно-емкостные свойства пород-коллекторов тюменской свиты Шаимского НГР // Пути реализации нефтегазового и рудного потенциала ХМАО–Югры: XIV науч.-практ. конф. – Ханты-Мансийск, 2011. – С. 281–286.
14. Кузьмин Ю.А., Осипенко А.С. Мониторинг геологических моделей залежей тюменской свиты в процессе их доразведки и промышленности эксплуатации (на примере пласта Т₁ Славинского и Западно-Славинского месторождений) // Пути реализации нефтегазового и рудного потенциала ХМАО–Югры: XIV науч.-практ. конф. – Ханты-Мансийск, 2011. – С. 326–332.
15. Петрофизическая модель фильтрационно-емкостных свойств продуктивных отложений тюменской свиты Шаимского района / А.В. Мальшаков, В.А. Ефимов, Ю.А. Кузьмин, В.В. Борщев // Пути реализации нефтегазового потенциала ХМАО: III науч.-практ. конф. – Ханты-Мансийск, 2000. – С. 323–333.
16. История формирования отложений тюменской свиты Шаимского нефтегазоносного района / В.П. Алексеев, Ю.Н. Федоров, С.С. Газалеев, В.И. Русский, Л.И. Свечников, А.Ф. Хакимов // Геология угольных месторождений. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ, 2004. – Вып. 14. – С. 130–139.
17. Методические аспекты исследования продуктивных отложений тюменской свиты Южно-Конитлорского месторождения по материалам сейсмической съемки 3D / И.Н. Керусов, П.Н. Страхов, И.Э. Керусова, Н.П. Нестеренко, Д.Е. Мирошниченко, А.А. Потрясов, К.Г. Скачек, М.В. Мордвинцев, Д.Н. Крылов, В.В. Черныяева // Пути реализации нефтегазового потенциала ХМАО: VII науч.-практ. конф. – Ханты-Мансийск, 2004. – С. 86–93.
18. Алексеев В.П., Газалеев С.С., Свечников Л.И. Строение и корреляция отложений тюменской свиты // Пути реализации нефтегазового потенциала ХМАО: VIII науч.-практ. конф. – Ханты-Мансийск, 2005. – С. 346–352.
19. Быкова И.О., Шулико С.Н., Быков А.В. Моделирование коллекторских свойств тюменской свиты на примере месторождений Юганского Приобья // Пути реализации нефтегазового и рудного потенциала ХМАО–Югры: XI науч.-практ. конф. – Ханты-Мансийск, 2008. – С. 139–144.
20. Опшняков И.О. Уточнение петрофизической модели тюменской свиты Красноленинского месторождения // Наука и ТЭК. – 2012 апрель. – № 4. – С. 43–44.
21. Mining disturbance effect and mining arrangements analysis of near-fault mining in high tectonic stress region / H.G. Ji, H.S. Ma, J.A. Wang, Y.H. Zhang, H. Cao // Safety Science. – April 2012. – V. 50. – Iss. 4. – P. 645–651.
22. Pinxian W., Qianyu Li, Chun-Feng Li. Ch. 3. Tectonic Framework and Magmatism // Developments in Marine Geology. – 2014. – V. 6. – P. 81–84.
23. Kontorovich V.A. The Meso-Cenozoic tectonics and petroleum potential of West Siberia // Russian Geology and Geophysics. – April 2009. – V. 50. – Iss. 4. – P. 350–352.
24. Tertiary and Quaternary tectonic faulting in southernmost Illinois / W.J. Nelson, F.B. Denny, J.A. Devera, L.R. Follmer, J.M. Ma-

- sters // Engineering Geology. – 15 July 1997. – V. 46. – Iss. 3–4. – P. 240–242.
25. Dayal A.M. Basin Structure, Tectonics, and Stratigraphy // Shale Gas, Exploration and Environmental and Economic Impacts. – 2017. – V. 2. – P. 57–59.
26. The structural elements and tectonics of the Lake Van basin (Eastern Anatolia) from multi-channel seismic reflection profiles / M. Toker, A.M. Celal Sengor, F.D. Demirel Schluter, E. Demirbag, D. Cukur, C. Imren, F. Niessen // Journal of African Earth Sciences. – May 2017. – V. 129. – P. 170–172.
27. Determination of dynamic reserves of fractured horizontal wells in tight oil reservoirs by multi-region material balance method / Y. Wei, Q. Ran, Li Ran, J. Yuan, J. Dong // Petroleum Exploration and Development. – June 2016. – V. 43. – Iss. 3. – P. 493–495.
28. Clancy S.A., Worralla F., Davies R.J., Gluyasa J.G. An assessment of the footprint and carrying capacity of oil and gas well sites: the implications for limiting hydrocarbon reserves // Science of The Total Environment. – 2017. – V. 618. – P. 586–594.
29. Abdus Satter A., Iqbal G.M. Conventional and unconventional petroleum reserves – definitions and world outlook // Reservoir Engineering. The Fundamentals, Simulation, and Management of Conventional and Unconventional Recoveries. – 2016. – P. 436–437.
30. One-dimensional modeling of a recent Ganga avulsion: assessing the potential effect of tectonic subsidence on a large river / N. Gupta, M.G. Kleinhansb, E.A. Addinkb, P.M. Atkinsona, P.A. Carlinga // Geomorphology. – 15 May 2014. – V. 213. – P. 25–29.
31. McCall G.J.H. Tectonics // Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. – 2013. – V. 227. – P. 320–322.
32. Somnath D., Boseb S., Dasc K. Tectonic evolution of the Eastern Ghats Belt // Precambrian Research. – April 2013. – V. 227. – P. 250–252.

Поступила 26.04.2018 г.

Информация об авторах

Стенькин А.В., заместитель генерального директора по разработке месторождений, главный геолог ТПП «Урайнефтегаз» ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь», Россия, 628285, ХМАО–Югра.

Котенев Ю.А., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой геологии и разведки нефтяных и газовых месторождений Уфимского государственного нефтяного технического университета; заведующий лабораторией «Технология воздействия на пласт» Института стратегических исследований республики Башкортостан.

Султанов Ш.Х., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой геологии и разведки нефтяных и газовых месторождений Уфимского государственного нефтяного технического университета; заведующий лабораторией «Математическое моделирование процессов нефтегазоизвлечения» Института стратегических исследований республики Башкортостан.

Уметбаев В.Г., доктор технических наук, профессор кафедры геологии и разведки нефтяных и газовых месторождений Уфимского государственного нефтяного технического университета.

UDC 622.276

METHODICAL SUBSTANTIATION OF INCREASING PRODUCTION OF OIL RESERVES ON THE FIELDS COMPLICATED BY TECTONIC DISTURBANCES

Andrey V. Stenkin¹,
andrey.stenkin@lukoil.com

Yury A. Kotenev^{2,3},
geokot@inbox.ru

Shamil K. Sulnatov^{2,3},
ssultanov@mail.ru

Vil G. Umetbaev²,
kafedragl@yandex.ru

¹ LUKOIL-Western Siberia LLC TPP «Urayneftegaz»,
116a, Lenin Street, Uray, 628285, Russia.

² Ufa State Petroleum Technological University,
1, Kosmonavtov street, Ufa, Republic of Bashkortostan, 450062, Russia.

³ Institute of Strategic Researches of the Republic of Bashkortostan,
15, Kirov street, Ufa, Republic of Bashkortostan, 450008, Russia.

Relevance. A significant number of large oil fields are currently complicated by different tectonic dislocations. This article describes the influence of tectonic disorders on field development and production of oil reserves. The object of the study are the productive layers of the Jurassic deposits of the Shaim oil and gas bearing deposit, characterized by a high degree of heterogeneity and low values of filtration and capacitance properties, complicated by tectonic disturbances. Not achieving the plan of oil reserves production for such deposits requires detailed monitoring of the development, considering the main geological characteristics and subsequent regulation and improvement of the development system. The methodical approach to the improvement of the system of development of deposits complicated by tectonic disturbances includes critical analysis of primary geological, geophysical and fishing information, analysis of the main indicators of development characterizing the production of oil reserves

The main aim of the study is to determine the causes of uneven development of reserves by area and cut of productive strata, to study the influence of tectonic faults of various orders on the effectiveness of the used development system, including the flooding system of reservoirs.

The methods: geological and hydrodynamic modeling of exploration, geological and field analysis of exploration, analysis of the interpretation results of hydrodynamic studies of wells, comparative analysis of reservoir properties obtained by different research methods. The analysis of the efficiency of the development system was carried out using indirect methods of mathematical statistics, supported by the direct methods – tracer studies of wells.

The results. On the example of the Novomostovskoe oilfield the authors have selected hydrodynamically isolated areas with high values of mobile residual reserves limited by tectonic disturbances and proposed for them the geological and technical measures and technologies aimed at increasing the production of oil reserves. Based on the results of the studies the authors proposed a methodological justification for operational regulation and monitoring the exploration of the reservoir complicated by tectonic disturbances.

Key words:

Shaim oil and gas bearing deposits, tectonic disturbance, hydrodynamic interrelations between wells, development of oil reserves, Novomostovskoe oilfield.

REFERENCES

1. Salimov F.S., Lesnoy A.N., Kotenev Yu.A., Chudinova D.Yu. Osobennosti razrabotki zalezhey nefi oslozhnyonnykh tektonicheskimi narusheniyami [Design features of seal oil complicated by tectonic disturbances]. *Neftegazovoe delo*, 2016, vol. 14, no. 1, pp. 42–48.
2. Fazylova L.R., Kotenev Yu.A., Chudinova D.Yu., Valeev A.S., Dulkarnaev M.R. Osobennosti raspredeleniya fizicheskikh svoystv nefi v plastakh Vateganskogo nefyanogo mestorozhdeniya [Features of oil physical properties distribution in layers of Vategan oil field]. *Sbornik nauchnykh trudov 43 Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh uchennykh, aspirantov i studentov, posvyashchennoy 69-letiyu filiala UGNTU v g. Oktyabrskom* [Proc. of the 43 International Scientific and Technical Conference of Young Scientists, Post-Graduate Students and Students, dedicated to the 60th anniversary of the USPTU branch in Oktyabrsky]. Oktyabrsky, 2016. Vol. 2, pp. 263–267.
3. Zatsepin O.G., Stenkin A.V., Iks V.V., Kotenev Yu.A., Chudinova D.Yu. Problemy intensivatsii dobychi nefi v nizkoproduktivnykh plastakh slozhnogo geologicheskogo stroeniya mestorozhdeniya Krasnoleninskogo svoda Zapadnoy Sibiri [Problem of intensification of oil production in low productivity reservoirs with complex Geology of the deposits of the Krasnoleninsk arch in Western Siberia]. *Sbornik nauchnykh trudov 43 Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh uchennykh, aspirantov i studentov, posvyashchennoy 69-letiyu filiala UGNTU v g. Oktyabrskom* [Proc. of the 43 International Scientific and Technical Conference of Young Scientists, Post-Graduate Students and Students, dedicated to the 60th anniversary of the USPTU branch in Oktyabrsky]. Oktyabrsky, 2016. Vol. 2, pp. 263–267.

4. Valeev A.S., Dulkarnaev M.R., Kotenev Yu.A., Sultanov Sh.H., Brilliant L.S., Chudinova D.Yu. Metodicheskie osnovy planirovaniya i organizatsii intensivnykh sistem zavodneniya (na primere plastov Vateganskogo i Tevlinsko-Russkinskogo mestorozhdeniya) [Methodical bases of planning and organizing intensive flooding systems (on example Vateganskoe and Tevlinsko-Russkinskoe fields)]. *Exposition Oil & Gas*, 2016, no. 3 (49), pp. 38–44.
5. Sultanov Sh.H., Kotenev Yu.A., Andreev V.E., Stabinskas A.P., Grekhov I.V. Geoinformatsionnaya strategiya razrabotki mestorozhdeniya s trudnoizvlekaemymi zapasami nefiti [Geoinformation strategy of developing fields with oil reserves difficult to recover]. *Georesources*, 2012, no. 3 (45), pp. 40–43.
6. Andreev V.E., Chudinova D.Yu., Chizhov A.P., Chibisov A.V. Optimizatsiya sistemy zavodneniya v terrigenykh i karbonatnykh kollektorakh [Optimization of the waterflood system in terrigenous and carbonate reservoirs]. *Problems of gathering, treatment and transportation of oil and oil products*, 2016, no. 4 (106), pp. 42–53.
7. Amon E.O., Alexeev V.P., Glebov A.F., Savenko V.A., Fedorov Yu.N. Stratigrafiya i paleogeografiya mezozoyско-kaynozoyского osadochnogo chekhla Shaimskogo neftegazonosnogo rayona (Zapadnaya Sibir) [Stratigraphy and paleogeography of the Mesozoic-Cenozoic sedimentary cover of the Shaim oil and gas area (Western Siberia)]. *Ekaterinburg, USMU Publ.*, 2010. 257 p.
8. Belousov S.L., Khuramshina O.A., Shabakova S.V., Chernova E.V. Paleofatsialny analiz otlozheniy tyumenskoй svity Krasnoleninskogo mestorozhdeniya [Paleofacies analysis of Tyumen Suite deposits of krasnoleninskoye field]. *Scientific and Technical Gazette «ROSNEFT»*, 2014, no. 3, pp. 8–12.
9. Babin E.A., Belozerova M.A., Lyapin A.V. Strukturno-tektonicheskie i seysmodinamicheskie osobennosti otlozheniy tyumenskoй svity na primere mestorozhdeniya TPP «Urayneftegaz» [Structural-tectonic and seismodynamic features of the Tyumen Suite sediments on the example of the fields of TPP «Urayneftegaz»]. *Puti realizatsii neftegazovogo i rudnogo potentsiala KhMAO–Yugry. XVII nauchno-prakticheskaya konferentsiya* [Khanty-Mansiisk, XVII scientific-practical conference. Ways of realizing the oil and gas and ore potential of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug–Yugra]. Khanty-Mansiysk, 2013, pp. 152–159.
10. Kalgin V.P. Ispolzovanie dannykh seysmorazvedki dlya utochneniya geologicheskogo stroeniya tyumenskoй svity Krasnoleninskogo mestorozhdeniya [Use of seismic data to clarify the geological structure of the Tyumen Suite Krasnoleninsky field]. *Science and Fuel and Energy Complex*, 2012, no. 4, pp. 25–26.
11. Bykova I.O., Shuliko S.N., Goryachev A.A., Vilisov A.A., Koperchak A.V. Perspektivy Neftegazonosnosti otlozheniya verkhnyumenskoй podsvity litsenzionnogo uchastka Surgutskiy 7 [Petroleum potential of the verkhnyumenskoй subsuite of the license area of the Surgut 7]. *Puti realizatsii neftegazovogo i rudnogo potentsiala KhMAO–Yugry. XIV nauchno-prakticheskaya konferentsiya* [XIV scientific-practical conference. Ways of realizing the oil and gas and ore potential of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug–Yugra]. Khanty-Mansiisk, 2011, pp. 350–359.
12. Ivanov I.V. Metod uluchsheniya svyazannosti kollektorov tyumenskoй svity mestorozhdeniya Shaimskogo rayona pri postroenii geologicheskoy modeli na osnove pointervalnoy interpretatsii GIS [Method of improving the connectivity of reservoirs of Tyumen Suite of Shaimsky district fields in construction of a geological model based on interpretation of geophysical studies of wells]. *Puti realizatsii neftegazovogo i rudnogo potentsiala KhMAO–Yugry. XIV nauchno-prakticheskaya konferentsiya* [Khanty-Mansiysk, XIV scientific-practical conference. Ways of realizing the oil and gas and ore potential of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug–Yugra]. Khanty-Mansiysk, 2011, pp. 230–237.
13. Kuzmin Yu.A., Ivanova N.A., Khaynovskaya Ya.A. Vliyaniye epigeneticheskikh protsessov na filtratsionno-emkostnyye svoystva porod-kollektorov tyumenskoй svity Shaimskogo NGR [Influence of epigenetic processes on filtration-capacitive properties of rocks-reservoirs of the Tyumen Suite of the Shaimsky oil and gas area]. *Puti realizatsii neftegazovogo i rudnogo potentsiala KhMAO–Yugry. XIV nauchno-prakticheskaya konferentsiya* [Khanty-Mansiysk, XIV scientific-practical conference. Ways of realizing the oil and gas and ore potential of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug–Yugra]. Khanty-Mansiysk, 2011, pp. 281–286.
14. Kuzmin Yu.A., Osipenko A.S. Monitoring geologicheskikh modeley zalezhey tyumenskoй svity v protsesse ikh dorazvedki i promyshlennosti ekspluatatsii (na primere plasta T1 Slavinskogo i Zapadno-Slavinskogo mestorozhdeniya) [Monitoring geological models of Tyumen Suite deposits at their further exploration and exploitation industry (on the example of T1 layer of Slavinsky and West Slavinsky deposits)]. *Puti realizatsii neftegazovogo i rudnogo potentsiala KhMAO–Yugry. XIV nauchno-prakticheskaya konferentsiya* [Khanty-Mansiysk, XIV scientific-practical conference. Ways of realizing the oil and gas and ore potential of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug–Yugra]. Khanty-Mansiysk, 2011, pp. 326–332.
15. Malshakov A.V., Efimov V.A., Kuzmin Yu.A., Borshchev V.V. Petrofizicheskaya model filtratsionno-emkostnykh svoystv produktivnykh otlozheniy tyumenskoй svity Shaimskogo rayona [Petrophysical model of reservoir properties of productive deposits of the Tyumen Suite of the Shaim district]. *III nauchno-prakticheskaya konferentsiya. Puti realizatsii neftegazovogo i rudnogo potentsiala KhMAO* [III scientific-practical conference. Ways of realizing the oil and gas and ore potential of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug–Yugra]. Khanty-Mansiisk, 2000, pp. 323–333.
16. Alexeev V.P., Fedorov Yu.N., Gazaleev S.S., Russkiy V.I., Svechnikov L.I., Khakimov A.F. Istoriya formirovaniya otlozheniy tyumenskoй svity Shaimskogo neftegazonosnogo rayona [The history of formation of the deposits of the Tyumen Suite of the Shaim oil and gas district]. *Geology of coal deposits*, 2004, no. 14, pp. 130–139.
17. Kerusov I.N., Strakhov P.N., Kerusova I.E., Nesterenko N.P., Miroshnichesko D.E., Potryasov A.A., Skachek K.G., Mordvintsev M.V., Krylov D.N., Chernyaeva V.V. Metodicheskie aspekty issledovaniya produktivnykh otlozheniy tyumenskoй svity Yuzhno-Konitlorskogo mestorozhdeniya po materialam seysmicheskoy semki 3D [Methodical aspects of research of productive deposits of the Tyumen Suite of the Yuzhno-Konitlorsky field on materials of seismic survey 3D]. *Puti realizatsii neftegazovogo i rudnogo potentsiala KhMAO–Yugry. VII nauchno-prakticheskaya konferentsiya* [VII scientific-practical conference. Ways of realizing the oil and gas and ore potential of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug–Yugra]. Khanty-Mansiysk, 2004, pp. 86–93.
18. Alekseev V.P., Gazaleev S.S., Svechnikov L.I. Stroenie i korrelyatsiya otlozheniy tyumenskoй svity [Structure and correlation of Tyumen suite]. *Puti realizatsii neftegazovogo i rudnogo potentsiala KhMAO–Yugry. VIII nauchno-prakticheskaya konferentsiya* [VIII scientific-practical conference. Ways of realizing the oil and gas and ore potential of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug–Yugra]. Khanty-Mansiysk, 2005, pp. 346–352.
19. Bykova I.O., Shuliko S.N., Bykov A.V. Modelirovaniye kolektorskikh svoystv tyumenskoй svity na primere mestorozhdeniy Yuganskogo Priobya [Structure and correlation of the deposits of the Tyumen Suite]. *Puti realizatsii neftegazovogo i rudnogo potentsiala KhMAO–Yugry. IX nauchno-prakticheskaya konferentsiya* [IX scientific-practical conference. Ways of realizing the oil and gas and ore potential of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug–Yugra]. Khanty-Mansiysk, 2009, pp. 139–144.
20. Oshnyakov I.O. Utochneniye petrofizicheskoy modeli tyumenskoй svity Krasnoleninskogo mestorozhdeniya [Clarification of petrophysical model of the Tyumen Suite of the Krasnoleninsky De-

- posit]. *Science and Fuel and Energy Complex*, 2012, no. 4, pp. 43–44.
21. Ji H.G., Ma H.S., Wang J.A., Zhang Y.H., Cao H. Mining disturbance effect and mining arrangements analysis of near-fault mining in high tectonic stress region. *Safety Science*, April 2012, vol. 50, no. 4, pp. 645–651.
 22. Pinxian W., Qianyu Li, Chun-Feng Li. Ch. 3. Tectonic Framework and Magmatism. *Developments in Marine Geology*, 2014, vol. 6, pp. 81–84.
 23. Kontorovich V.A. The Meso-Cenozoic tectonics and petroleum potential of West Siberia. *Russian Geology and Geophysics*, April 2009, vol. 50, no. 4, pp. 350–352.
 24. Nelson W.J., Denny F.B., Devera J.A., Follmer L.R., Masters J.M. Tertiary and Quaternary tectonic faulting in southernmost Illinois. *Engineering Geology*, July 1997, vol. 46, no. 3 (15) pp. 240–242.
 25. Dayal A.M. Basin Structure, Tectonics, and Stratigraphy. Shale Gas, Exploration and Environmental and Economic Impacts, 2017, vol. 2, pp. 57–59.
 26. Toker M., Celal Sengor A.M., Demirel Schluter F.D., Demirbag E., Cukur D., Imren C., Niessen F. The structural elements and tectonics of the Lake Van basin (Eastern Anatolia) from multi-channel seismic reflection profiles. *Journal of African Earth Sciences*, May 2017, vol. 129, pp. 170–172.
 27. Wei Y., Ran Q., Ran Li, Yuan J., Dong J. Determination of dynamic reserves of fractured horizontal wells in tight oil reservoirs by multi-region material balance method. *Petroleum Exploration and Development*, June 2016, vol. 43, no. 3, pp. 493–495.
 28. Clancy S.A., Worralla F., Davies R.J., Gluyasa J.G. An assessment of the footprint and carrying capacity of oil and gas well sites: the implications for limiting hydrocarbon reserves. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 618, pp. 586–594.
 29. Abdus Satter A., Iqbal G.M. Conventional and unconventional petroleum reserves – definitions and world outlook. *Reservoir Engineering. The Fundamentals, Simulation, and Management of Conventional and Unconventional Recoveries*, 2016, pp. 436–437.
 30. Gupta N., Kleinhans M.G., Addinkb E.A., Atkinson P.M., Carlinga P.A. One-dimensional modeling of a recent Ganga avulsion: assessing the potential effect of tectonic subsidence on a large river. *Geomorphology*, 15 May 2014, vol. 213, pp. 25–29.
 31. McCall G.J.H. Tectonics. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, 2013, vol. 227, pp. 320–322.
 32. Somnath D., Boseb S., Dasc K. Tectonic evolution of the Eastern Ghats Belt. *Precambrian Research*, April 2013, vol. 227, pp. 250–252.

Received: 26 April 2018.

Information about the authors

Andrey V. Stenkin, deputy general director, LUKOIL-Western Siberia LLC TPP «Urayneftegaz».

Yury A. Kotenev, Dr. Sc., professor, head of the department, Ufa State Petroleum Technological University; head of the laboratory, Institute of Strategic Researches of the Republic of Bashkortostan.

Shamil K. Sulnatov, Dr. Sc., associate professor, professor, Ufa State Petroleum Technological University; head of the laboratory, Institute of Strategic Researches of the Republic of Bashkortostan.

Vil G. Umetbaev, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University.

Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Корректурa и перевод на английский язык *С.В. Жаркова*
Дизайн обложки *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива
Валерия Касаткина

Руководство для авторов и образец оформления статьи: izvestiya.tpu.ru

Подписано к печати 25.01.2019. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 26,06. Уч.-изд. л. 23,56.
Заказ 17-19. Тираж 500 экз.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ