

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 332, № 6, 2021

ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ

Редакционная коллегия

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

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

Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2021

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 геологических объектов.

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
- Экономические и социальные аспекты использования георесурсов

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 332, № 6, 2021

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

Editorial Board

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

AIMS AND SCOPES

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

The journal was founded in 1903.

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

ISSN (print) – 2500-1019

ISSN (on-line) – 2413-1830

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

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

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

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

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

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

The publication of manuscripts is free of charge.

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

- О неоднозначности интерпретации поля температур замораживаемого породного массива с помощью скважинной термометрии**
Семин М.А., Левин Л.Ю., Богомяков А.В., Пугин А.В. 7
On the ambiguity of interpretation of the temperature field of the frozen rock mass using borehole thermometry
Semin M.A., Levin L.Yu., Bogomyagkov A.V., Pugin A.V.
- Исследование триботехнических характеристик рабочих органов винтового насоса**
Тимашев Э.О., Латыпов Б.М., Уразаков К.Р. 19
Tribotechnical characteristics of the screw pair of the progressing cavity pump
Timashev E.O., Latypov B.M., Urazakov K.R.
- Роль геодинамических движений в прорывах вод в выработки при разработке месторождений в сложных гидрогеологических условиях**
Сашурин А.Д., Панжин А.А., Харисов Т.Ф. 28
Role of geodynamic movements in water breakthroughs into workings at exploration under difficult hydrogeological conditions
Sashurin A.D., Panzhin A.A., Kharisov T.F.
- Аналитический подход к оценке эффекта водяной пробки в вентиляционных стволах шахт**
Шалимов А.В., Казаков Б.П., Зайцев А.В. 39
Analytical approach to estimation of water build-up effect in mine ventilation shafts
Shalimov A.V., Kazakov B.P., Zaitsev A.V.
- Новый методический подход к прогнозированию подверженности оборудования высокотемпературных газоконденсатных скважин углекислотной коррозии**
Пonomарев А.И., Иванов Н.В., Юсупов А.Д. 49
New methodical approach to the CO₂-corrosion estimation of high-temperature gas-condensate wells equipment
Ponomarev A.I., Ivanov N.V., Yusupov A.D.
- Ресурсно-энергетическая эффективность обустройства скважин с частотно-регулируемой подачей насоса**
Соловьев И.Г., Константинов И.В., Говорков Д.А. 60
Resource-energy efficiency of artificial lift selection for wells with frequency controlled pump
Solovyev I.G., Konstantinov I.V., Govorkov D.A.
- Классификация форм связанной воды в каолиновых глинах**
Середин В.В., Ядзинская М.Р., Андрианов А.В. 73
Classification of bound water forms in kaolinitic clays
Seredin V.V., Yadzinskaya M.R., Andrianov A.V.
- Уточнение корреляционных зависимостей между данными статического зондирования и деформационно-прочностными характеристиками грунтов**
Яббарова Е.Н., Латыпов А.И. 82
Clarification of correlation dependences between the parameters of cone penetration test and strength and deformation characteristics of soils
Yabbarova E.N., Latypov A.I.
- Влияние плотности засыпки древесной биомассы на характеристики её сушки в условиях высокотемпературного нагрева**
Нигаи Н.А., Сыродой С.В. 90
Influence of density of wood biomass filling on the characteristics of its drying under high temperature heating
Nigay N.A., Syrodoy S.V.
- Гидромагнетитовая порода в технологии магнезиальных вяжущих материалов**
Митина Н.А., Хабас Т.А. 98
Hydromagnesite waste-rock in magnesia cement technology
Mitina N.A., Khabas T.A.
- Способ оценки допустимых концентраций загрязняющих веществ с учетом состояния донных отложений**
Савичев О.Г., Чжоу Дань 107
Method for assessing allowable concentrations of polluting substances with conditions of river sediments
Savichev O.G., Zhou Dan
- Минералогия и геохимия тонштейнов в углях Черногорского месторождения Минусинского бассейна**
Вергунов А.В. 118
Mineralogy and geochemistry of tonsteins in coals of Chernogorskoe deposit of the Minusinsk basin
Vergunov A.V.
- Сравнительный анализ физических свойств и экономической эффективности буровых растворов с нанодобавками**
Давуди Ш., Еремян Г.А., Степико А.В., Рукавишников В.С., Минаев К.М. 130
Comparative analysis of the physical properties and economic efficiency of drilling fluids with nano-additives
Davoodi Sh., Eremyan G.A., Stepiko A.V., Rukavishnikov V.S., Minaev K.M.
- Особенности поведения наполненных полимеров для резисторов при циклическом режиме нагружения**
Минакова Н.Н., Ушаков В.Я. 142
Features of behavior of filled polymers for resistors under a cyclic loading mode
Minakova N.N., Ushakov V.Ya.
- Геохимическая характеристика почв территории с высокой аэротехногенной нагрузкой**
Воробьева Д.А., Гусева Н.В. 149
Geochemical characteristics of soils: a case study of territory with a high aerotechnogenic load
Vorobeva D.A., Guseva N.V.
- Экспериментальное исследование качества дробления руд для подземного выщелачивания**
Голик В.И., Разоренов Ю.И., Комащенко В.И., Бурдзиева О.Г. 160
Experimental study of the quality of ore crushing for underground leaching
Golik V.I., Razorenov Yu.I., Komashchenko V.I., Burdzieva O.G.
- Сопrotивление породы при бурении мелкорезцовым алмазным инструментом**
Нескоромных В.В., Попова М.С., Баочанг Л. 167
Rock resistance when drilling with small cutting diamond tools
Neskoromnykh V.V., Popova M.S., Baochang L.

- | | | |
|--|------------|--|
| Анализ процесса деформирования грунтовой дамбы при заполнении чаши хвостохранилища
Ефремов Е.Ю. | 178 | Analysis of the embankment dam deformation during tailing storage reservoir filling
Efremov E.Yu. |
| Определение погонных электротехнических параметров нефтепогружного кабеля
Глазырин А.С., Исаев Ю.Н., Кладиев С.Н., Леонов А.П., Раков И.В., Колесников С.В., Ланграф С.В., Филипас А.А., Копырин В.А., Хамитов Р.Н., Ковалев В.З., Лавринович А.В. | 186 | Determination of running electrical characteristics of oil submersible cable
Glazyrin A.S., Isaev Yu.N., Kladiev S.N., Leonov A.P., Rakov I.V., Kolesnikov S.V., Langraf S.V., Filipas A.A., Kopyrin V.A., Khamitov R.N., Kovalev V.Z., Lavrinovich A.V. |
| Прогноз устойчивости склонов участка берега Химкинского водохранилища
Ушаков А.С., Кулешов А.П. | 198 | Forecast of slope stability of the bank section of the Khimki reservoir
Ushakov A.C., Kuleshov A.P. |

УДК 622.253.3

О НЕОДНОЗНАЧНОСТИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУР ЗАМОРАЖИВАЕМОГО ПОРОДНОГО МАССИВА С ПОМОЩЬЮ СКВАЖИННОЙ ТЕРМОМЕТРИИ

Семина Михаил Александрович¹,
seminma@inbox.ru

Левин Лев Юрьевич¹,
aerolog_lev@mail.ru

Богомягков Александр Васильевич¹,
bavaerolog@gmail.com

Пугин Алексей Витальевич¹,
lyosha.p@gmail.com

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

Актуальность. При проходке вертикальных шахтных стволов с применением специального способа искусственного замораживания пород необходимо осуществлять контроль состояния ледопородного ограждения, формируемого вокруг строящегося ствола. Наиболее распространенным и информативным способом экспериментального контроля состояния замороженных пород является на сегодняшний день скважинная термометрия. По данным скважинной термометрии осуществляется калибровка параметров математической модели (теплофизических свойств пород) и интерпретация поля температуры во всем объеме замораживаемого породного массива путем математического моделирования. Калибровка параметров математической модели в определенных условиях может приводить к неоднозначности в определении параметров модели, причина которой в настоящее время не изучена.

Цель настоящей работы состоит в исследовании условий возникновения неоднозначности рассчитанных теплофизических свойств породного массива в результате калибровки математической модели по данным измерений в контрольно-термических скважинах.

Объектом исследования является замораживаемый водонасыщенный породный массив вокруг двух строившихся шахтных стволов калийного рудника Нежинского горно-обогатительного комплекса.

Методы исследования включали в себя сбор и обработку данных скважинной термометрии состояния замораживаемого породного массива, постановку математической модели теплопереноса в замораживаемом породном массиве, численное решение прямой и обратной задач Стефана и теоретическую интерпретацию рассогласований между измеренными и вычисленными температурами пород.

Результаты. Проведены исследования величин рассогласований измеренных и численно рассчитанных температур в контрольно-термических скважинах на фазовой плоскости калибруемых параметров математической модели – теплопроводностей пород в зонах льда и охлаждения. Показано, что минимум функционала рассогласования в определенных условиях перемещается с течением времени или является неединственным. Проведен анализ возникающей неоднозначности на базе упрощенной математической модели теплового баланса на границе фронта фазового перехода. Получено, что на стадии активного замораживания возможно недостоверное определение теплопроводности в зоне льда из-за высокого градиента температуры в массиве вблизи контрольно-термических скважин и погрешности скважинной инклинометрии. На стадии пассивного замораживания возможно недостоверное определение обеих теплопроводностей, так как решение задачи зависит преимущественно от их соотношения.

Ключевые слова:

Искусственное замораживание пород, ледопородное ограждение, контрольно-термические скважины, обратная задача Стефана, математическое моделирование, теплопроводность пород.

Введение

Строительство стволов шахт и тоннелей метрополитенов в сложных гидрогеологических условиях осуществляется с использованием специальных способов и, в частности, способа искусственного замораживания пород [1, 2]. Целью искусственного замораживания породного массива является формирование ледопородного ограждения (ЛПО) заданной толщины, достаточной для того, чтобы воспринять давление окружающих незамороженных горных пород и содержащейся в них поровой воды, не допустить проникновения подземных вод в строящуюся горную выработку.

Действующие «Правила безопасности ...» обязывают организовывать систематический контроль состояния замороженных пород [3]. Согласно [4], наблюдение за процессом замораживания и состоянием ЛПО должно осуществляться с использованием контрольных скважин: гидрогеологических и термометрических. Термометрия в контрольно-термических (КТ) скважинах на сегодня является основным и наиболее информативным способом анализа фактических параметров ЛПО – этот экспериментальный способ применяется при строительстве стволов шахт и тоннелей метрополитенов как на территории России [5–7], так и за рубежом [8–11].

Экспериментальный контроль состояния ЛПО, как правило, сопровождается теоретическими расчетами времени формирования ЛПО заданной толщины [12–14]. В ряде практических случаев экспериментальный и теоретический методы используются взаимосвязано: в этом случае экспериментально измеренные температуры породного массива в КТ скважинах применяются для параметризации математической модели замораживаемого породного массива, а последняя используется для определения поля температур во всем объеме породного массива, подверженно тепловому воздействию от системы замораживания [15–20]. За рубежом такой подход чаще всего называется обратным анализом [15, 16], в то время как в России – решением коэффициентной обратной задачи Стефана [17, 18], или просто обратной задачи [19]. Впервые такой подход был применен в работе [19] и заключался в калибровке значений теплопроводностей породного массива на предмет наилучшего соответствия вычисленных и измеренных температур в КТ скважинах. Выбор теплопроводностей обосновывался низкой точностью их определения по результатам лабораторных испытаний образцов керна пород.

Как было показано в [17], в ряде практических ситуаций может существовать более одного решения обратной задачи Стефана. Физически это означает, что теплофизические свойства породного массива могут неоднозначно определяться по данным измерений температуры в КТ скважинах. В такой ситуации высок риск неправильного выбора теплофизических параметров породного массива из полученного множества решений обратной задачи. Это неблагоприятно, т. к. в этой ситуации может возникать неконтролируемая погрешность при теоретическом определении температурного поля породного массива на пространственном удалении от КТ скважин, а также при прогнозировании искусственного замораживания пород в будущем без опоры на данные скважинной термометрии.

По этой причине важно определить условия, при которых возникает неоднозначность определения теплофизических свойств породного массива в результате калибровки математической модели по данным измерений в КТ скважинах. В существующей научной литературе обозначенный частный вопрос остается на сегодняшний день не освещенным.

Настоящая статья посвящена анализу условий возникновения неоднозначности в определении теплофизических свойств породного массива по данным измерений в КТ скважинах. Анализ проводился для реальных данных скважинной термометрии, полученных в процессе контроля формирования ЛПО вокруг строившихся вертикальных шахтных стволов рудника Нежинского горно-обогатительного комплекса в республике Беларусь.

Математическая модель замораживаемого породного массива

Рассматривалась задача об искусственном замораживании породного массива контуром вертикальных замораживающих скважин. Замораживаемый

объем породного массива делился на несколько горизонтальных слоев, каждый из которых рассматривался в отдельности (рис. 1).

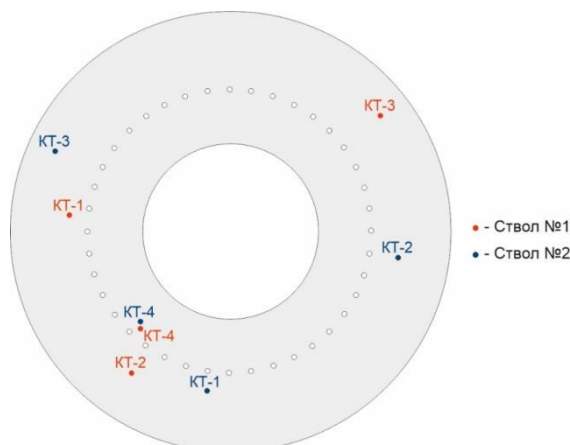


Рис. 1. Геометрия расчетной области: горизонтальный слой породного массива с контуром замораживающих скважин и КТ скважинами для ствола № 1 (красный цвет) и ствола № 2 (синий цвет)

Fig. 1. Geometry of the domain: a horizontal layer of the rock mass with the contour of freezing boreholes and control boreholes for shaft no. 1 (red) and shaft no. 2 (blue)

Теоретический анализ теплопереноса в каждом слое влажного породного массива при его искусственном замораживании проводился посредством решения двумерной нестационарной задачи Стефана в обобщенной постановке [21]. При математической постановке задачи Стефана для каждого слоя пород принимались следующие допущения:

- 1) однородность и изотропность теплофизических свойств породного массива в зонах льда и охлаждения;
- 2) вертикальный тепловой поток отсутствует; распределение температуры считается однородным по всей толщине слоя;
- 3) миграция поровой воды не рассматривается;
- 4) породный массив является полностью насыщенным влагой, а его поровое пространство не содержит газовых компонент;
- 5) локальное тепловое равновесие между различными фазами (сухой скелет, поровая вода, поровый лед);
- 6) фазовый переход поровой влаги происходит полностью в некотором конечном интервале температур $[T^{(sd)}; T^{(lq)}]$.

При задании положений замораживающих и КТ скважин учитывались их фактические горизонтальные отклонения от проектных положений, полученные с помощью скважинной инклинометрии. На рис. 1, схематично иллюстрирующем контур замораживания, отклонения скважин не показаны.

С учетом сделанных допущений задача Стефана в обобщенной постановке в энтальпийном виде записывается следующим образом [17]:

$$\frac{\partial H_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial y} \right), \quad (1)$$

$$\lambda_i = \left(\lambda_i^{(lq)}\right)^{1-\varphi_i} \cdot \left(\lambda_i^{(sd)}\right)^{\varphi_i}, \quad (2)$$

$$H_i(T_i) = \begin{cases} \rho_i^{(lq)} c_i^{(lq)} (T_i - T_i^{(lq)}) + \rho_i^{(lq)} w_i L, & T_i^{(lq)} \leq T_i; \\ \rho_i^{(lq)} w_i L \cdot (1 - \varphi_i), & T_i^{(sd)} \leq T_i < T_i^{(lq)}; \\ \rho_i^{(sd)} c_i^{(sd)} (T_i - T_i^{(sd)}), & T_i < T_i^{(sd)}, \end{cases} \quad (3)$$

$$\varphi_i(T_i) = \begin{cases} 0, & T_i^{(lq)} \leq T_i; \\ (T_i - T_i^{(lq)}) / (T_i^{(sd)} - T_i^{(lq)}), & T_i^{(sd)} \leq T_i < T_i^{(lq)}; \\ 1, & T_i < T_i^{(sd)}, \end{cases} \quad (4)$$

$$\left[\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial n} - \alpha (T_{fb}(t) - T_i) \right]_{\Omega_{fb}} = 0, \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{\lambda_b}{2r_{fb} \xi} \text{Nu} = \frac{\lambda_b}{2r_{fb} \xi} \cdot 1,55 \left(\text{Pe} \frac{2r_{fb} \xi}{h} \right)^{0,33}, \quad (6)$$

$$\text{Pe} = \frac{2r_{fb} \xi \rho_b c_b V}{\lambda_b h}, \quad (7)$$

$$T_i|_{\Omega_{out}} = T_{0i}, \quad (8)$$

$$T_i|_{l=0} = T_{0i}, \quad (9)$$

где индекс i соответствует номеру слоя породного массива; H – удельная энтальпия породного массива, Дж/м³; x, y – физические координаты, м; t – физическое время, с; $\lambda^{(lq)}, \lambda^{(sd)}$ – теплопроводности массива в зонах охлаждения и льда соответственно (в смысле Н.Г. Трупака [1]), Вт/(м·°C); $c^{(lq)}, c^{(sd)}$ – удельные теплоемкости массива в зонах охлаждения и льда соответственно, Дж/(кг·°C); $\rho^{(lq)}, \rho^{(sd)}$ – плотности массива в зонах охлаждения и льда соответственно, кг/м³; $T^{(lq)}$ – температура начала кристаллизации поровой воды (температура ликвидуса), °C; $T^{(sd)}$ – температура начала плавления порового льда (температура солидуса), °C; φ – объемная доля льда в порах породного массива (льдиность), м³/м³; L – удельная теплота кристаллизации воды, Дж/кг; w – влажность породного массива (в смысле Н.А. Цытовича [22]), кг/кг; $T_{fb}(t)$ – температура хладоносителя, °C; T_0 – температура непо потревоженного породного массива на удалении от контура замораживания, °C; α – коэффициент теплоотдачи на границе с замораживающими скважинами, Вт/(м²·°C); Nu – число Нуссельта; Pe – число Пекле; λ_b – теплопроводность хладоносителя, Вт/(м·°C); c_b – удельная теплоемкость хладоносителя, Дж/(кг·°C); ρ_b – плотность хладоносителя, кг/м³; r_{fb} – радиус замораживающих колонок, м; $\xi=0,29$ – безразмерный коэффициент, учитывающий то, что восходящий поток хладоносителя занимает только часть сечения замораживающей колонки; V – средняя скорость хладоносителя в замораживающей колонке, м/с; h – высота замораживающих колонок, м; Ω_{fb} – граница с замораживающими скважинами; Ω_{out} – внешняя граница области моделирования; n – координата вдоль нормали к границе Ω_{fb} , м.

Математическая модель реализована численно с помощью метода конечных разностей на полярной сетке, состоящей из трех кольцевых блоков. Между

кольцевыми блоками с различной густотой сетки задавалось условие интерфейса (равенство температур и тепловых потоков). Размер ячеек сетки определялся на основании предварительного моделирования с целью обеспечения независимости решения от способа разбиения. На границе с замораживающими колонками задавалось сгущение конечно-разностной сетки для корректного моделирования высоких градиентов температуры в начальный период замораживания (размер ячеек на границе с колонками составил не более 1 см). На внешней границе расчетной области размер ячеек равен около 1,50 м. Количество узлов в итоговом варианте сетки, принятой для расчетов, составило 29504. Использовалась центральная по пространству и верхняя по времени разностная схема для уравнения диффузии. Алгоритмизация осуществлялась в среде MS Visual Studio. Моделирование проводилось для двух слоев горных пород в интервале замораживания пород для условий строящихся стволов рудника Нежинского горно-обогатительного комплекса – слоя мела, залегающего в интервале глубин [86,5 м; 113 м], и слоя песка, залегающего в интервале глубин [119 м; 147 м]. Теплофизические свойства этих слоев, взятые из отчета по инженерно-геологическим изысканиям для рассматриваемого участка, сведены в табл. 1.

Таблица 1. Теплофизические свойства исследуемых слоев породного массива

Table 1. Thermophysical properties of the studied layers of the rock mass

Свойство Property	Значение/Value			
	Ствол № 1/Shaft no. 1		Ствол № 2/Shaft no. 2	
	Мел Chalk	Песок Sand	Мел Chalk	Песок Sand
$\lambda^{(sd)}$, Вт/(м·°C)	2,46	4,3	2,46	4,4
$\lambda^{(lq)}$, Вт/(м·°C)				
$\lambda^{(lq)}$, Вт/(м·°C)	1,67	2,64	1,67	3
$\rho^{(sd)}$, кг/м ³	1870	1840	1870	2020
$\rho^{(sd)}$, кг/м ³				
$\rho^{(lq)}$, кг/м ³	1870	1840	1870	2020
$\rho^{(lq)}$, кг/м ³				
$c^{(sd)}$, Дж/(кг·°C)	1164	900	1164	896
$c^{(sd)}$, Дж/(кг·°C)				
$c^{(lq)}$, Дж/(кг·°C)	1720	1712	1720	1000
$c^{(lq)}$, Дж/(кг·°C)				
w , кг/кг	0,163	0,086	0,157	0,09
w , кг/кг				
$T^{(sd)}$, °C	-0,08	-0,4	-0,08	-0,3
$T^{(lq)}$, °C	-0,58	-0,9	-0,58	-0,8
L , Дж/кг	330000	330000	330000	330000
L , Дж/кг				
T_0 , °C	10,3	10,6	10,3	10,4

В табл. 2 представлены геометрические параметры задачи. На рис. 2 представлены временные диаграммы температуры и расхода хладоносителя в замораживающих колонках. В качестве хладоносителя использовался 25%-й раствор CaCl₂, теплофизические свойства которого взяты из [23]: $\rho_b=1280$ кг/м³, $c_b=2659$ Дж/(кг·°C), $\lambda_b=0,49$ Вт/(м·°C). Максимальный расход хладоносителя в системе размораживания (263 м³/с) соответствует средней скорости хладоноси-

теля в замораживающей колонке, равной около 0,22 м/с, и числу Рейнольдса, равному примерно 580, согласно [24], в этом случае реализуется ламинарный режим течения ($Re < 2300$). Формулы (6), (7) для расчета коэффициента теплоотдачи соответствуют ламинарному режиму течения.

Таблица 2. Геометрические параметры задачи

Table 2. Geometric parameters

Параметр Parameter	Значение Value
Радиус кругового сектора (расчетной области), м Radius of the computational domain, m	31
Среднее расстояние от центра кругового сектора до центра замораживающей колонки, м Radius of the freezing contour, m	8
Радиус замораживающей колонки, м Freezing pipe radius, m	0,073
Количество замораживающих колонок Number of freezing pipes	40
Глубина замораживающих колонок, м Depth of freezing pipes, m	160

Контроль состояния замороженных пород на каждом из двух строящихся стволов осуществлялся с помощью четырех КТ скважин, местоположения которых показаны на рис. 1. Абсолютная погрешность измерений в скважинах составляла 1 °С с разрешающей способностью 0,5 м. Измеренные температуры по глубине КТ скважин, эпюры которых представлены на рис. 3, использовались для калибровки теплофизических свойств породного массива (теплопроводностей в зонах льда и охлаждения, влажности). Калибровка теплофизических свойств породного массива производилась посредством минимизации функ-

ционала I рассогласования температур на контрольных скважинах, измеренных экспериментально ($T_i^{(c)}$) и рассчитанных теоретически (T_i), путем решения прямой задачи Стефана:

$$I = \sqrt{\frac{1}{N_c} \frac{1}{\Delta T^2} \sum_{i=1}^{N_c} (T_i - T_i^{(c)})^2}, \quad (10)$$

где N_c – количество контрольных скважин; $\Delta T = \max_{t \in [0, t_{end}]} (T_0 - T_{fr}(t))$ – характерная разница температур в рассматриваемой задаче, °С; t_{end} – время моделирования, сут.

Полученные в результате минимизации функционала I (10) теплофизические свойства породного массива по сути являются эффективными теплофизическими свойствами, в которые неявным образом «зашиваются» другие, неучтенные в модели физические процессы и факторы – неоднородность породного массива, погрешность процедуры инклинометрии замораживающих и КТ скважин, теплоперенос вследствие возможной миграции влаги и др.

Результаты моделирования

В работе проводились исследования вида функционала I в фазовом пространстве калибруемых параметров задачи ($\lambda^{(sd)}$ и $\lambda^{(lq)}$). В результате проведенного многопараметрического численного моделирования замораживания породного массива при различных значениях теплопроводностей $\lambda^{(sd)}$ и $\lambda^{(lq)}$ получены изолинии функционала I и положения его минимума в фазовом пространстве теплопроводностей в различные моменты времени для двух стволов и двух рассматриваемых слоев пород (рис. 4–6).

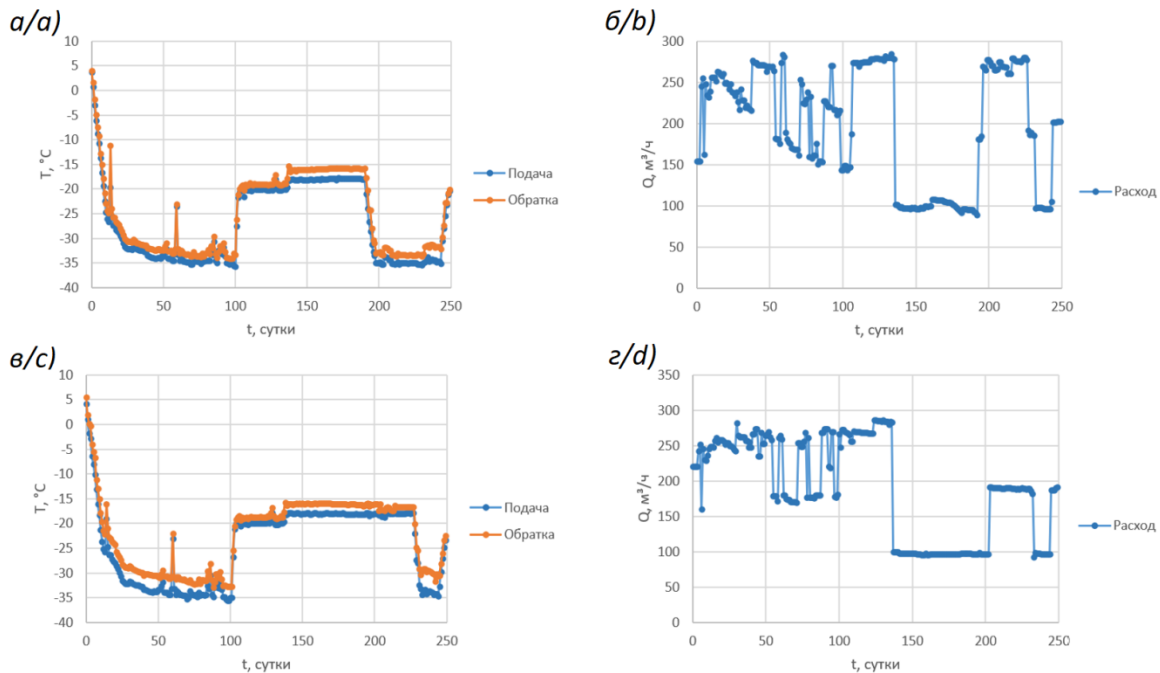


Рис. 2. Временные диаграммы температуры и расхода хладоносителя в замораживающих контурах для стволов № 1 (а, б) и № 2 (в, з)

Fig. 2. Time diagrams of the temperature and flow rate of the coolant in the freezing circuits for shaft no. 1 (a, b) and shaft no. 2 (c, d)

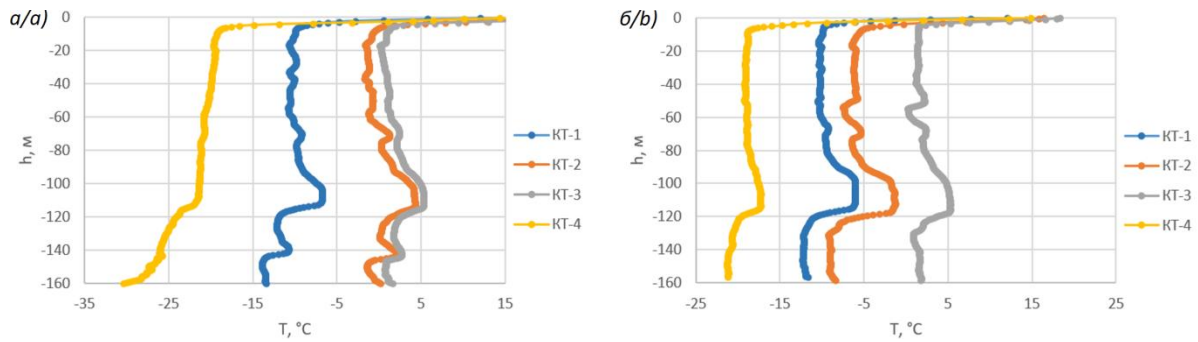


Рис. 3. Этюры температур в КТ скважинах ствола № 1 (а) и ствола № 2 (б) в момент времени 100 суток
Fig. 3. Temperatures in control boreholes vs depth; simulation time is 100 days; a) shaft no. 1; b) shaft no. 2

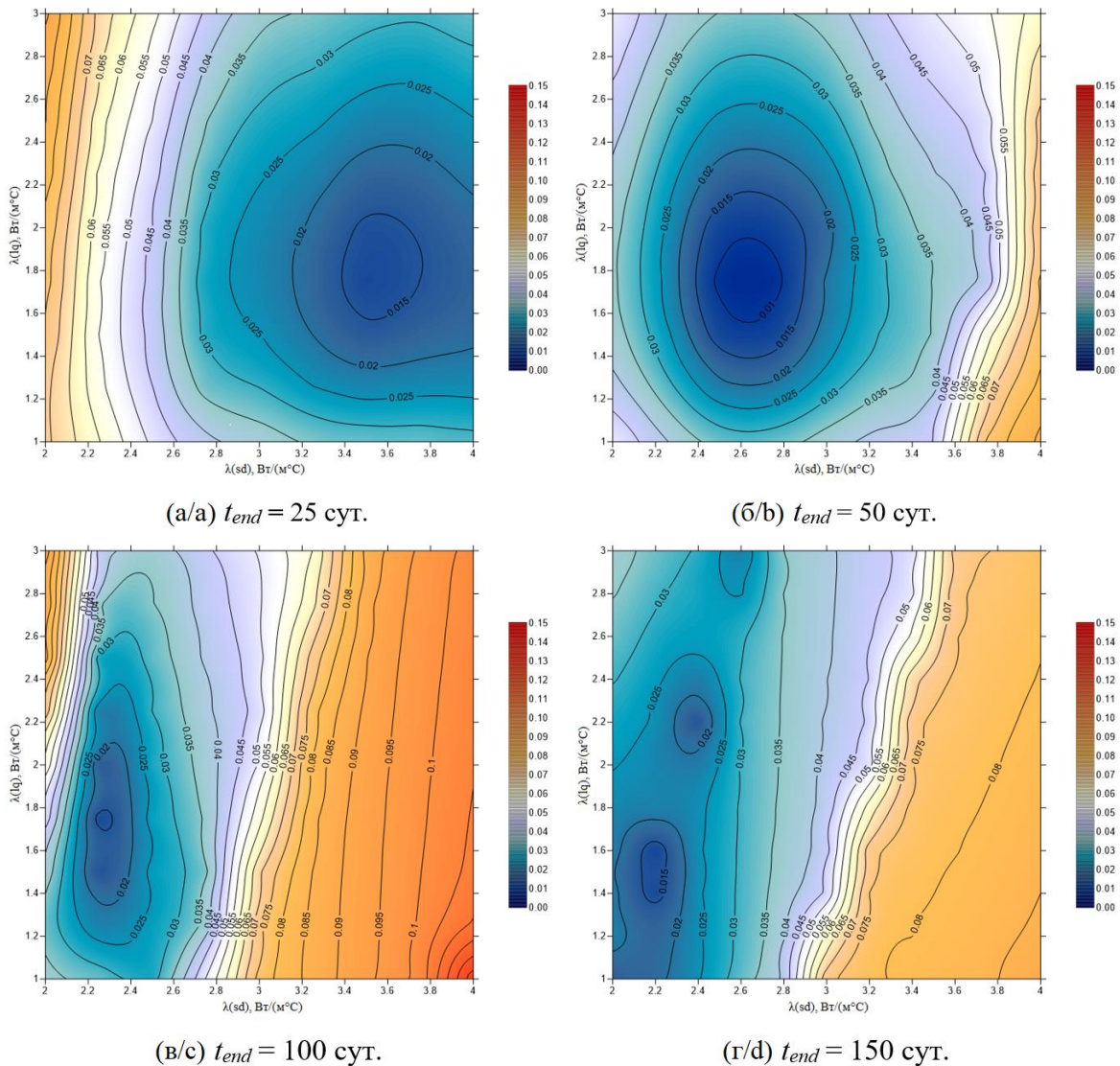


Рис. 4. Изолинии функционала рассогласований температур в фазовом пространстве параметров минимизации (λ_{sd} , λ_{liq}) при различных периодах замораживания для слоя мела, ствол № 1

Fig. 4. Isolines of the functional of temperature mismatch in the phase space of the minimization parameters (λ_{sd} , λ_{liq}) at different freezing periods for the chalk layer, shaft no. 1

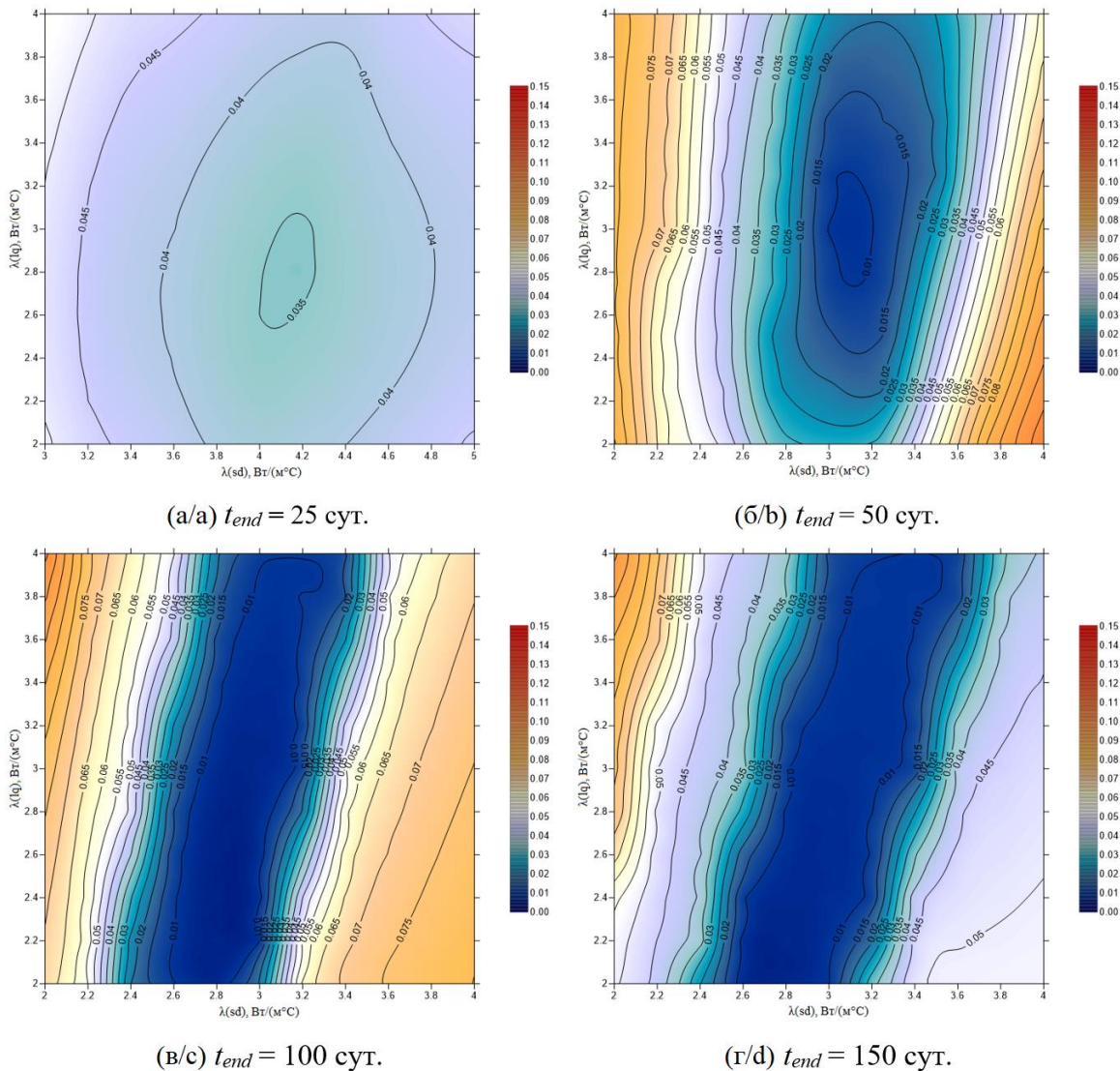


Рис. 5. Изолинии функционала рассогласований температур в фазовом пространстве параметров минимизации (λ_{sd} , λ_{lq}) при различных периодах замораживания для слоя песка, ствол № 1

Fig. 5. Isolines of the functional of temperature mismatch in the phase space of the minimization parameters (λ_{sd} , λ_{lq}) at different freezing periods for the sand layer, shaft no. 1

В целом для всех четырех рассмотренных случаев (2 ствола и 2 слоя пород) получена схожая качественная картина изменения положения и формы минимума функционала I . На начальном промежутке времени с момента запуска системы замораживания (0–50 суток) минимум единственный, но его положение постепенно изменяется с течением времени (смещается справа налево). В промежуток времени 50–100 суток происходит изменение формы минимума из точки в линию. Положение линии в последующие моменты времени не изменяется существенным образом (исследовались времена до 250 суток с момента начала замораживания).

На некоторых графиках (рис. 4, з, б, з) вместо линии минимумов присутствуют несколько локальных минимумов, лежащих на одной линии. Это связано с особенностями интерполяции двумерного поля функционала I по ограниченному количеству вычисленных дискретных точек (сетка 9 на 9 точек).

Количественный анализ изолиний функционала I позволил выявить следующие интересные особенности. Перемещение минимума функционала на начальном промежутке времени 0–50 суток для обоих слоев пород происходит практически параллельно оси абсцисс, т. е. в этот промежуток времени значение теплопроводности в зоне льда сильно зависит от времени. Следовательно, определение значения теплопроводности в зоне льда по данным скважинной термометрии на этом промежутке времени может оказаться недостоверным. Помимо этого, положения минимума функционала I на начальном промежутке времени для обоих слоев пород различны для разных стволов, как по оси абсцисс, так и по оси ординат. Особенно ярко это проявляется для малых времен (25 суток, рис. 4, а и б, а). Вероятно, это связано с сильным влиянием факторов неоднородности пород, погрешностью данных инклинометрии и прочими неучтенными в модели факторами.

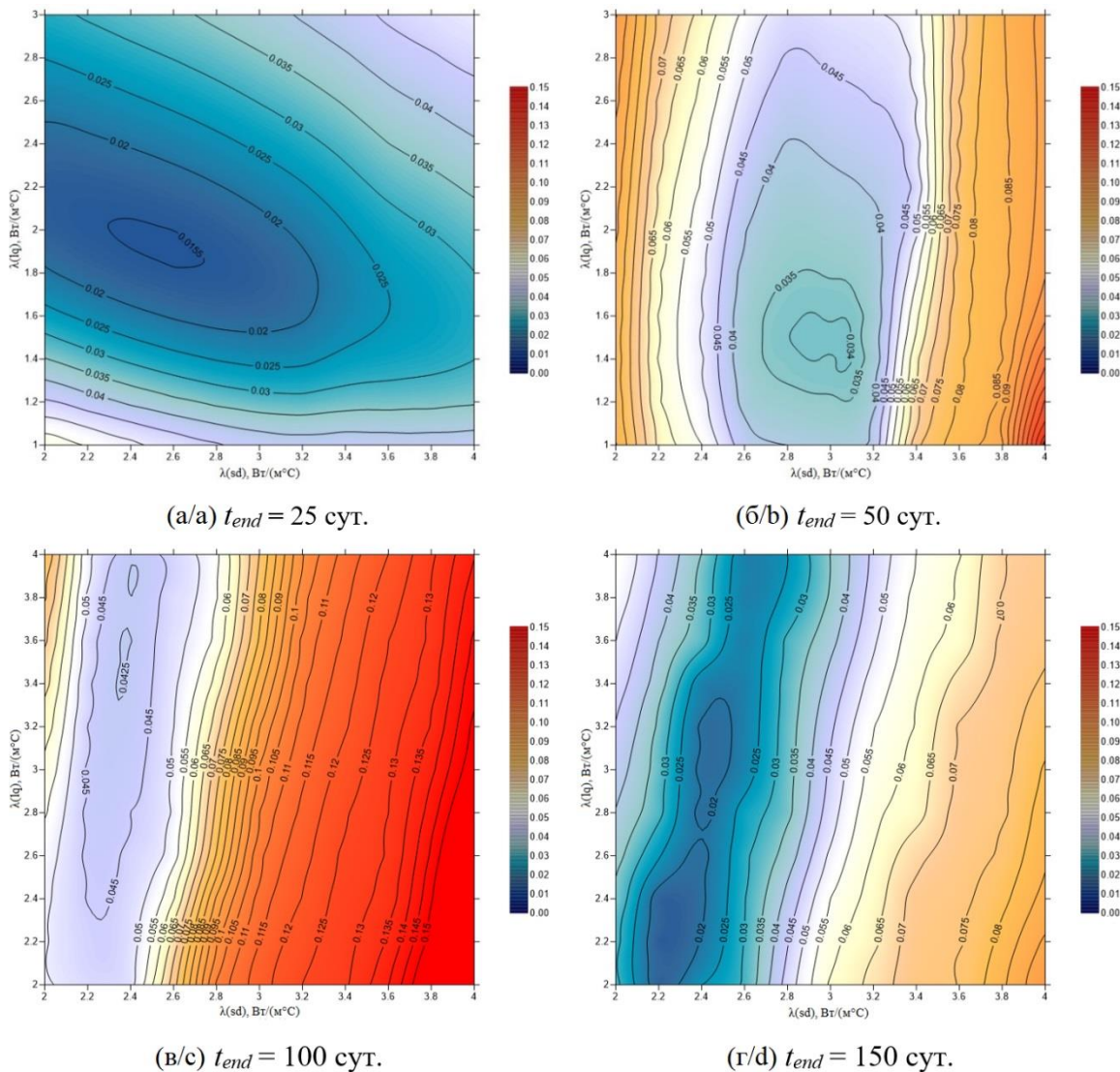


Рис. 6. Изолинии функционала рассогласований температур в фазовом пространстве параметров минимизации (λ_{sd} , λ_{lq}) при различных периодах замораживания для слоя мела, ствол № 2

Fig. 6. Isolines of the functional of temperature mismatch in the phase space of the minimization parameters (λ_{sd} , λ_{lq}) at different freezing periods for the chalk layer, shaft no. 2

Для времен моделирования более 100 суток положения линий минимумов функционала для разных стволов примерно совпадают и у мела, и у песка. Угол наклона линии минимумов функционала для мела варьируется в диапазоне от 75 до 84°, в то время как угол наклона линии минимумов функционала для песка варьируется в диапазоне от 73 до 81°. Это указывает на то, что при таких временах решение задачи Стефана намного более чувствительно к изменению теплопроводности в зоне льда, чем в зоне охлаждения. Также это указывает на то, что из решения обратной задачи Стефана при больших временах моделирования невозможно корректно определить одновременно теплопроводности в зонах льда и охлаждения.

Анализ результатов моделирования

Полученные закономерности изменения положений и формы минимума функционала (10) были также проанализированы на качественном уровне с по-

мощью упрощенной модели теплового баланса в одномерном случае. Для простоты предполагалось, что в породном массиве имеется граница фазового перехода γ , разделяющая зону льда и охлаждения. В этом случае уравнение баланса теплоты для некоторого малого участка этой границы имеет вид:

$$\lambda^{(sd)} \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{\gamma^-} - \lambda^{(lq)} \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{\gamma^+} = \rho L w \frac{dR}{dt}, \quad (11)$$

где r – координата вдоль нормали к границе фазового перехода γ ; m ; R – координата, характеризующая положение границы фазового перехода, м; индекс «+» указывает на то, что выражение записывается для области справа от границы (зона охлаждения), а индекс «-» – слева от границы (зона льда).

Выражение (11) представляет собой граничное условие на фронте фазового перехода в классической одномерной постановке задачи Стефана [20, 25]. Первое слагаемое слева в (11) характеризует теплоотток к

замораживающей колонке, второе – земные теплопритоки. Их разница приводит к перемещению положения R фронта фазового перехода и росту ЛПО.

Распределения температуры слева и справа от фронта фазового перехода γ упрощенно может быть представлено с использованием одномерной модели, предложенной в [12]:

$$T_1 = T_{fb} + \frac{T_{ph} - T_{fb}}{\ln(R/r_{fb})} \ln(r/r_{fb}), \quad r_{fb} < r < R, \quad (12)$$

$$T_2 = T_0 + \frac{T_{ph} - T_0}{\ln(R/R_0)} \ln(r/R_0), \quad R < r < R_0. \quad (13)$$

Здесь T_{ph} – температура фазового перехода, °С; r_{fb} – радиус замораживающей колонки, м; R_0 – радиус теплового влияния системы замораживания, м. Индекс «1» соответствует зоне льда, а индекс «2» – зоне охлаждения.

Выражения (12) и (13) соответствуют случаю единственной замораживающей скважины. Коорди-

ната фронта фазового перехода R и радиус теплового влияния R_0 являются функциями времени и других теплофизических свойств породного массива. Согласно [1, 12, 25, 26] они возрастают со временем пропорционально $t^{1/2}$.

Прежде всего, проведена оценка вклада каждого из слагаемых в уравнении (11). Так, в начальные моменты времени (стадия активного замораживания) толщина ЛПО мала, а температурный градиент максимален, вследствие чего первое слагаемое в (11) намного больше, чем второе. Это следует как из вида производных выражений (12) и (13) по радиальной координате, так и из результатов численного моделирования на двумерной модели (1)–(9) (рис. 7, а). Это приводит к тому, что рост ЛПО происходит преимущественно за счет первого слагаемого слева в (11). Если пренебречь вторым слагаемым слева, то решение задачи Стефана будет зависеть от отношения $\lambda^{(sd)}/w$. При этом зависимость решения от величины $\lambda^{(lq)}$ сохраняется и реализуется опосредованно через радиус теплового влияния.

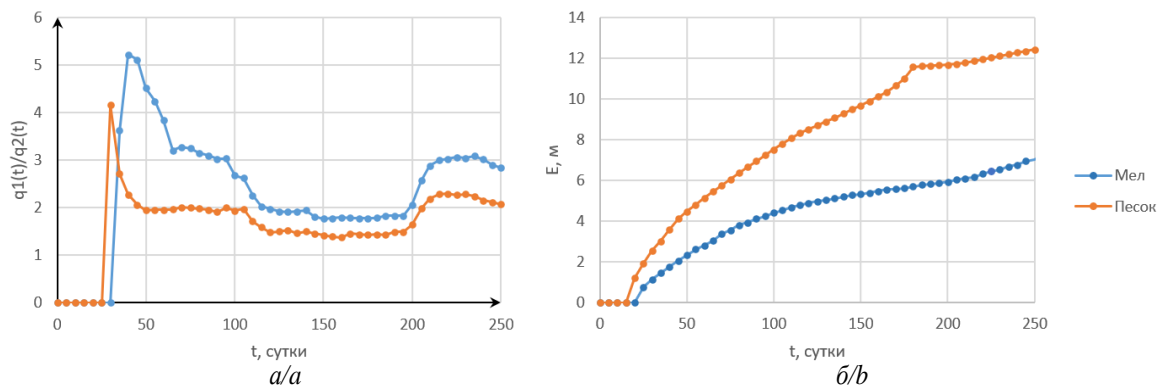


Рис. 7. Временные диаграммы отношения теплооттоков и теплопритоков к границе ЛПО (а) и толщины ЛПО (б), ствол № 1

Fig. 7. Ratio of heat fluxes and heat inflows to the frozen wall boundary vs. time (а) and the frozen wall thickness vs. time (б), shaft no. 1

Затем в период пассивного замораживания ($t > 100$ суток), когда происходит замедление роста и/или поддержание ЛПО заданной толщины, тепловые потоки слева в (11) выравниваются и практически компенсируют друг друга. В этом случае величина R изменяется слабо или же остается неизменной. Если в этом случае пренебречь правой частью (11) как наименьшим по абсолютной величине слагаемым, то нетрудно видеть, что решение будет зависеть от отношения теплопроводностей $\lambda^{(sd)}/\lambda^{(lq)}$. Именно такая картина наблюдается на рис. 4–6 при временах более 100 суток.

Проведенный анализ не объясняет причин временного изменения положения минимума функционала (10) на стадии активного замораживания. Поэтому дополнительно была проведена оценка чувствительности решения к погрешности измерений температуры, вносимой погрешностью данных скважинной инклинометрии. По опыту авторов настоящей работы погрешность определения смещения скважин, полученных из скважинной инклинометрии,

может быть высока и превышать 0,5 м для глубин более 100 м [27, 28]. А с учетом того, что на начальном временном промежутке замораживания градиент температуры породного массива вблизи замораживающих скважин высокий, это может приводить к существенным погрешностям измерения температуры в КТ скважинах.

Если принять, что погрешность определения смещения КТ скважины от горизонтального положения по данным инклинометрии составляет Δ (м), то погрешность в определении температуры, определенная из (12) и (13), составит:

$$\Delta T_1 = \frac{\partial T_1}{\partial r} \Delta = (T_{ph} - T_{fb}) \ln\left(\frac{r_{fb}}{R(t)}\right) \frac{\Delta}{r}, \quad (14)$$

$$\Delta T_2 = \frac{\partial T_2}{\partial r} \Delta = (T_{ph} - T_0) \ln\left(\frac{R_0(t)}{R(t)}\right) \frac{\Delta}{r}. \quad (15)$$

Использование той или иной формулы обусловлено тем, куда попадает КТ скважина – в зону льда или

в зону охлаждения. В начальный промежуток времени до того, как граница фазового перехода достигла рассматриваемой КТ скважины, следует применять формулу (15), а далее – формулу (14). Функция (14) убывает с течением времени, в то время как функцию (15) можно считать приблизительно постоянной, т. к. согласно [12] соотношение между $R_0(t)$ и $R(t)$ не зависит от времени (случай единственной замораживающей скважины).

Граница фронта фазового перехода довольно быстро достигает все КТ скважины за исключением КТ-3, которые находятся на расстоянии более 2 м от контура замораживания. Об этом можно судить по временным зависимостям толщины ЛПО для ствола № 1 (рис. 7, б). Поэтому после 25–50 суток с момента начала замораживания следует применять формулу (14). В рамках этой формулы для условий строившихся стволов рудника Нежинского горно-обогатительного комплекса погрешность определения температуры в КТ скважинах вследствие неточностей скважинной инклинометрии может быть приближенно оценена следующим образом:

$$\Delta T_1 = 35 \cdot \ln \left(\frac{0,073}{1,073} \right) \frac{0,5}{1,073} \approx 13,4 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (16)$$

Здесь в качестве r использовано расстояние от КТ скважины до ближайшей к ней замораживающей скважины – 1 м, величина радиуса фронта фазового перехода также принята равной 1 м. Если принять, что на всех КТ скважинах имеет место такая погрешность измерения температуры, то погрешность определения функционала (10) составит:

$$\Delta I = \frac{\partial I}{\partial T^{(c)}} \Delta T^{(c)} = \frac{13,4}{35} = 0,38. \quad (17)$$

Эта погрешность сопоставима со значениями функционала рассогласований (10), что следует из рис. 4–6, а потому может привести к существенному изменению положения минимума функционала. Если фактическое положение КТ скважины оказывается ближе к контуру замораживания, чем в математической модели с неправильным заданным смещением скважин по вертикали, то температурное влияние замораживающих скважин на КТ скважину в реальности произойдет быстрее, чем в модели. Это приведет к завышению теплопроводностей породного массива, что имело место в начальные моменты времени (рис. 4–6).

С течением времени погрешность (17) будет уменьшаться по логарифмическому закону (16) и, начиная с определенного момента, перестанет суще-

ственным образом влиять на положение минимума функционала (10). Таким образом, гипотеза о погрешности скважинной инклинометрии объясняет временную динамику положения минимума функционала (10) на стадии активного замораживания, и только на этой стадии.

Заключение

В статье описаны проведенные исследования функционала рассогласования экспериментально-измеренных и модельных температур в контрольно-термических скважинах. Показано, что минимум функционала рассогласования в определенных условиях меняется с течением времени или является неединственным. Это приводит к неоднозначности процедуры калибровки параметров математической модели тепловых процессов в замораживаемом породном массиве по данным скважинной термометрии.

В результате анализа условий возникновения неоднозначности получено, что на стадии активного замораживания возможно недостоверное определение теплопроводности в зоне льда из-за высокого градиента температуры породного массива вблизи контрольно-термических скважин и погрешности скважинной инклинометрии. На стадии пассивного замораживания возможно недостоверное определение обеих теплопроводностей (в зоне льда и в зоне охлаждения) вследствие того, что в данном промежутке времени решение прямой задачи Стефана зависит преимущественно от их соотношения.

В целом можно сделать вывод, что калибровка теплофизических параметров породного массива при его искусственном замораживании должна осуществляться на основании анализа временной зависимости положения и формы минимума функционала рассогласования температур в контрольно-термических скважинах. Определение теплофизических свойств породного массива по данным скважинной термометрии для отдельных моментов времени, скорее всего, окажется недостоверным.

В статье не исследовались другие возможные способы однозначного определения теплофизических свойств породного массива, например, применение других методов регуляризации обратной задачи Стефана (по методу А.Н. Тихонова), других способов вычисления функционала рассогласований. Данные вопросы являются предметом дальнейших исследований авторов статьи.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 17-11-01204.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трупаков Н.Г. Замораживание горных пород при проходке стволов. – М.: Углетехиздат, 1954. – 895 с.
2. Шуплик М.Н. Специальные способы строительства подземных сооружений // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № 1. – С. 595–625.
3. Правила безопасности при строительстве подземных сооружений ПБ 03-428-02 // утв. Постановлением Госгортехнадзора РФ от 02.11.2001 № 49. – 167 с.
4. ВСН 189-78. Инструкция по проектированию и производству работ по искусственному замораживанию грунтов при строительстве метрополитенов и тоннелей. – М.: Минтрансстрой, 1978. – 117 с.
5. Intellectual monitoring of artificial ground freezing in the fluid-saturated rock mass / I. Panteleev, A. Kostina, M. Zhelnin, O. Plekhov, L. Levin // Procedia Structural Integrity. – 2017. – V. 5. – P. 492–499.
6. Левин Л.Ю., Семенов М.А., Паршаков О.С. Совершенствование методов прогнозирования состояния ледопородного огражде-

- ния строящихся шахтных стволов с использованием распределенных измерений температуры в контрольных скважинах // Записки Горного института. – 2019. – Т. 237. – С. 268–274.
7. Применение искусственного замораживания грунтов при сооружении межтоннельной сбойки Серебряноборских тоннелей / И.Н. Тараненко, К.П. Никифоров, В.Н. Киселев, Е.А. Делпани // Метро и тоннели. – 2008. – № 2. – С. 20–23.
 8. Thermal behavior in cross-passage construction during artificial ground freezing: case of Harbin Metro Line / Z. Li, J. Chen, M. Sugimoto, C. Mao // Journal of Cold Regions Engineering. – 2020. – V. 34. – № 3. – art. no. 05020002.
 9. Numerical simulation and measurement analysis of the temperature field of artificial freezing shaft sinking in Cretaceous strata / Z. Yao, H. Cai, W. Xue, X. Wang, Z. Wang // AIP Advances. – 2019. – V. 9. – № 2. – С. 025209.
 10. Papakonstantinou S., Anagnostou G., Pimentel E. Evaluation of ground freezing data from the Naples subway // Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering. – 2013. – V. 166. – № 3. – P. 280–298.
 11. Modeling artificial ground freezing for construction of two tunnels of a metro station in Napoli (Italy) / A. Mauro, G. Normino, F. Cavuoto, P. Marotta, N. Massarotti // Energies. – 2020. – V. 13. – № 5. – art. no. en13051272. DOI: 10.3390/en13051272.
 12. Хакимов Х.Р. Вопросы теории и практики искусственного замораживания грунтов. – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1957. – 191 с.
 13. Artificial ground freezing: a review of thermal and hydraulic aspects / M.A. Alzoubi, M. Xu, F.P. Hassani, S. Poncet, A. Sasmito // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2020. – V. 104. – art. no. 103534.
 14. Fan W., Yang P. Ground temperature characteristics during artificial freezing around a subway cross passage // Transportation Geotechnics. – 2019. – V. 20. – art. no. 100250.
 15. Artificial ground freezing to excavate a tunnel in sandy soil. Measurements and back analysis / G. Russo, A. Corbo, F. Cavuoto, S. Autuori // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2015. – V. 50. – P. 226–238.
 16. Viggiani G.M.B., De Sanctis L. Geotechnical aspects of underground railway construction in the urban environment: the examples of Rome and Naples // Geological Society Engineering Geology Special Publication. – 2009. – V. 22. – № 1. – P. 215–240. DOI: 10.1144/EGSP22.18
 17. Левин Л.Ю., Семина М.А., Зайцев А.В. Калибровка теплофизических свойств породного массива при моделировании формирования ледопородного ограждения строящихся шахтных стволов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2019. – № 1. – С. 172–184.
 18. Численное решение обратной задачи определения объемной теплоемкости породного массива в процессе искусственного замораживания / М.С. Желнин, О.А. Плехов, М.А. Семина, Л.Ю. Левин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2017. – № 4. – С. 56–75.
 19. Долгов О.А. Методика расчета процесса замораживания горных пород при проходке стволов шахт способом замораживания на большую глубину // Замораживание горных пород при проходке стволов шахт. – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1961. – С. 9–64.
 20. Myers T.G., Hennessy M.G., Calvo-Schwarzwälder M. The Stefan problem with variable thermophysical properties and phase change temperature // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2020. – T. 149. – art. no. 118975.
 21. Самарский А.А., Моисеенко Б.Д. Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1965. – Т. 5. – № 5. – С. 816–827.
 22. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. – М.: Высш. школа, 1973. – 448 с.
 23. Данилова Г.Н., Филаткин В.Н. Сборник задач по процессам теплообмена в пищевой и холодильной промышленности. – М.: Пищевая промышленность, 1976. – 240 с.
 24. Михеев М.А. Основы теплопередачи. – М.-Л.: ГЭИ, 1956. – 390 с.
 25. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел / пер. с англ. – М.: Наука, 1964. – 488 с.
 26. Зайцев А.В. Научные основы расчета и управления тепловым режимом подземных рудников: дис. ... д-ра техн. наук. – Пермь, 2019. – 247 с.
 27. Паршаков О.С. Разработка автоматизированной системы термометрического контроля ледопородных ограждений: дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 2020. – 140 с.
 28. Thermal Monitoring of frozen wall thawing after artificial ground freezing: case study of Petrikov potash mine / L. Levin, I. Golovatiy, A. Zaitsev, A. Pugin, M. Semin // Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research. – 2021. – V. 107. – art. no. 103685.

Поступила 19.04.2021 г.

Информация об авторах

Семина М.А., кандидат технических наук, научный сотрудник отдела аэрологии и теплофизики, Горный институт УрО РАН.

Левин Л.Ю., доктор технических наук, заведующий отделом аэрологии и теплофизики, Горный институт УрО РАН.

Богомяжков А.В., младший научный сотрудник лаборатории математического моделирования горнотехнических процессов, Горный институт УрО РАН.

Пугин А.В., кандидат технических наук, научный сотрудник отдела аэрологии и теплофизики, Горный институт УрО РАН.

UDC 622.253.3

ON THE AMBIGUITY OF INTERPRETATION OF THE TEMPERATURE FIELD OF THE FROZEN ROCK MASS USING BOREHOLE THERMOMETRY

Mikhail A. Semin¹,
seminma@inbox.ru

Lev Yu. Levin¹,
aerolog_lev@mail.ru

Alexander V. Bogomyagkov¹,
bavaerolog@gmail.com

Aleksey V. Pugin¹,
lyosha.p@gmail.com

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

The relevance. Sinking vertical mine shafts using artificial ground freezing requires controlling the state of the frozen wall formed around the shaft under construction. The most widespread and informative method of experimental control of the frozen wall state is borehole thermometry. The borehole thermometry data is used to adjust the parameters of the model (thermophysical properties of rocks) to re-create the temperature field in the entire volume of the frozen rock mass by means of mathematical modeling. Adjustment of the model parameters under certain conditions can lead to ambiguity in determining the model parameters, the reason for which is currently not studied.

The main aim is to study the conditions for ambiguity occurrence in the calculated thermophysical properties of the rock mass as a result of the adjusting the parameters of the model according to the measurement data in the control boreholes.

The object of the research is a frozen water-saturated rock mass around two mine shafts of the potash mine of the Nezhinsky mining and processing complex under construction.

Research methods included the collection and processing of borehole thermometry data, the formulation of a mathematical model of heat transfer in the frozen rock mass, the numerical solution of the direct and inverse Stefan problems and the theoretical interpretation of the mismatch between the measured and calculated temperatures of the rocks.

Results. We studied the mismatch between the measured and numerically calculated temperatures in the control boreholes on the phase plane of the adjusted parameters of the model – the thermal conductivities of frozen and unfrozen rocks. It is shown that the minimum of the mismatch functional under certain conditions moves over time or is not unique. The analysis of the arising ambiguity is carried out on the basis of a simplified mathematical model of the heat balance at the boundary of the phase transition front. It was found that at the ice growing stage, an unreliable determination of thermal conductivity in the frozen rock is possible due to the high temperature gradient in the rock mass near the control boreholes and the error of borehole inclinometry. At the ice holding stage, an unreliable determination of both thermal conductivities is possible, since the solution of the problem depends mainly on their ratio.

Key words:

Artificial freezing of rocks, frozen wall, control boreholes, inverse Stefan problem, mathematical modeling, thermal conductivity of rocks.

The research was financially supported by the Russian Science Foundation within the scientific project no. 17-11-01204.

REFERENCES

1. Trupak N.G. *Zamorazhivanie gornykh porod pri prokhodke stvolov* [Freezing of rocks during shaft sinking]. Moscow, Ugletekhizdat Publ., 1954. 895 p.
2. Shuplik M.N. Special methods of construction of underground structures. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2013, no. 1, pp. 595–625. In Rus.
3. *Pravila bezopasnosti pri stroitelstve podzemnykh sooruzheniy PB 03-428-02* [Safety rules for the construction of underground structures]. Moscow, Gosgortekhnadzor RF Publ., 2001. 167 p.
4. *VSN 189-78. Instruksiya po proektirovaniyu i proizvodstvu rabot po iskusstvennomu zamorazhivaniyu gruntov pri stroitelstve metropolitenov i tonneley* [Instructions for the design and production of works on artificial freezing of soils during the construction of subways and tunnels]. Moscow, Mintransstroy Publ., 1978. 117 p.
5. Panteleev I., Kostina A., Zhelnin M., Plekhov O., Levin L. Intellectual monitoring of artificial ground freezing in the fluid-saturated rock mass. *Procedia Structural Integrity*, 2017, vol. 5, pp. 492–499.
6. Levin L.Yu., Semin M.A., Parshakov O.S. Improving methods of frozen wall state prediction for mine shafts under construction using distributed temperature measurements in test wells. *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 237, pp. 268–274. DOI 10.31897/PML2019.3.268 In Rus.
7. Taranenko I.N., Nikiforov K.P., Kiselev V.N., Deplanyi E.A. The use of artificial soil freezing in the construction of an inter-tunnel linkage of the Serebryanoborsk tunnels. *Metro and tunnels*, 2008, no. 2, pp. 20–23. In Rus.
8. Li Z., Chen J., Sugimoto M., Mao C. Thermal behavior in cross-passage construction during artificial ground freezing: case of Harbin Metro Line. *Journal of Cold Regions Engineering*, 2020, vol. 34, no. 3, art.no. 05020002.
9. Yao Z., Cai H., Xue W., Wang X., Wang Z. Numerical simulation and measurement analysis of the temperature field of artificial freezing shaft sinking in Cretaceous strata. *AIP Advances*, 2019, vol. 9, no. 2, art. no. 025209.
10. Papakonstantinou S., Anagnostou G., Pimentel E. Evaluation of ground freezing data from the Naples subway. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering*, 2013, vol. 166, no. 3, pp. 280–298.
11. Mauro A., Normino G., Cavuoto F., Marotta P., Massarotti N. Modeling artificial ground freezing for construction of two tunnels of a metro station in Napoli (Italy). *Energies*, 2020, vol. 13, no. 5, art. no. en13051272. DOI: 10.3390/en13051272.

12. Khakimov H.R. *Voprosy teorii i praktiki iskusstvennogo zamorazhivaniya gruntov* [Issues of the theory and practice of artificial soil freezing]. Moscow, Akademiya nauk SSSR Publ., 1957. 191 p.
13. Alzoubi M.A., Xu M., Hassani F.P., Poncet S., Sasmito A. Artificial ground freezing: a review of thermal and hydraulic aspects. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, vol. 104, art. no. 103534.
14. Fan W., Yang P. Ground temperature characteristics during artificial freezing around a subway cross passage. *Transportation Geotechnics*, 2019, vol. 20, art. no. 100250.
15. Russo G., Corbo A., Cavuoto F., Autuori S. Artificial ground freezing to excavate a tunnel in sandy soil. Measurements and back analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2015, vol. 50, pp. 226–238.
16. Viggiani G.M.B., De Sanctis L. Geotechnical aspects of underground railway construction in the urban environment: the examples of Rome and Naples. *Geological Society Engineering Geology Special Publication*, 2009, vol. 22, no. 1, pp. 215–240. DOI: 10.1144/EGSP22.18
17. Levin L.Y., Semin M.A., Zaitsev A.V. Adjustment of thermophysical rock mass properties in modeling frozen wall formation in mine shafts under construction. *Journal of Mining Science*, 2019, vol. 55, pp. 157–168. DOI: 10.1134/S1062739119015419
18. Zhelnin M.S., Plekhov O.A., Semin M.A., Levin L.Yu. Numerical solution for an inverse problem about determination of volumetric heat capacity of rock mass during artificial freezing. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2017, no. 4, pp. 56–75. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.4.05
19. Dolgov O.A. Metodika rascheta protsessy zamorazhivaniya gornykh porod pri prokhodke stvolov shakht sposobom zamorazhivaniya na bolshuyu glubinu [Methodology for calculating the process of freezing rocks when driving mine shafts by freezing to a great depth]. *Zamorazhivanie gornykh porod pri prokhodke stvolov shakht* [Freezing of soils during shaft sinking]. Moscow, Akademiya nauk SSSR Publ., 1961. pp. 9–64.
20. Myers T.G., Hennessy M.G., Calvo-Schwarzwalder M. The Stefan problem with variable thermophysical properties and phase change temperature. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, vol. 149, art. no. 118975.
21. Samarskii A.A., Moiseyenko B. D. An economic continuous calculation scheme for the stefan multidimensional problem. *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 1965, vol. 5, no. 5, pp. 43–58. In Rus.
22. Cytovich N.A. *Mekhanika merzlykh gruntov* [Mechanics of frozen soils]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1973. 448 p.
23. Danilova G.N., Filatkin V.N. *Sbornik zadach po protsessam teploobmena v pishchevoy i kholodilnoy promyshlennosti* [Collection of problems on the processes of heat exchange in the food and refrigeration industry]. Moscow, Pishchevaya promyshlennost Publ., 1976. 240 p.
24. Miheev M.A. *Osnovy teploperedachi* [Heat transfer basics]. Moscow, Leningrad, GEI Publ., 1956. 390 p.
25. Carslaw H.S., Jaeger J.C. *Conduction of heat in solids*. Moscow, Nauka Publ., 1964. 488 p.
26. Zaitsev A.V. *Nauchnye osnovy rascheta i upravleniya teplovym rezhimom podzemnykh rudnikov*. Dis. Dokt. nauk [Scientific basis for calculating and controlling the thermal regime of underground mines]. Perm, 2019. 247 p.
27. Parshakov O.S. *Razrabotka avtomatizirovannoy sistemy termometricheskogo kontrolya ledoporodnykh ograzhdeniy*. Dis. Kand. nauk [Development of an automated system for thermometric control of frozen wall]. Perm, 2020. 140 p.
28. Levin L., Golovaty I., Zaitsev A., Pugin A., Semin M. Thermal monitoring of frozen wall thawing after artificial ground freezing: case study of Petrikov potash mine. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, vol. 107, art. no. 103685.

Received: 19 April 2021.

Information about the authors

Mikhail A. Semin, Cand. Sc., researcher, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Lev Yu. Levin, Dr. Sc., head of the Department of Aerology and Thermophysics, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Alexander V. Bogomyagkov, junior researcher, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Aleksey V. Pugin, Cand. Sc., researcher, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

УДК 622.276.53.054.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАБОЧИХ ОРГАНОВ ВИНТОВОГО НАСОСА

Тимашев Эдуард Олегович¹,
timashev@mail.ru

Латыпов Булат Маратович¹,
bulatti@hotmail.com

Уразакв Камил Рахматуллович¹,
urazakk@mail.ru

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

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения точности расчетов возникающих крутящих нагрузок, что позволит обеспечить условия для уточнения алгоритмов диагностики и прогнозирования ресурса винтовых насосных установок со штанговым и погружным приводом. Винтовые насосные установки используются в скважинных условиях, характеризующихся высокой вязкостью откачиваемой пластовой жидкости и высоким содержанием механических примесей в ней (коэффициент взвешенных частиц более 500 мг/л). Опыт эксплуатации винтовых насосных установок показывает, что надежность насосных установок зависит от состояния рабочих органов. В процессе эксплуатации эластомер статора набухает, что приводит к росту потерь на трение или к разрушению эластомера. Для повышения эффективности подбора, расчета и диагностики винтовых насосных установок важно понимание процессов, происходящих при трении металлического ротора по эластомеру статора в условиях смазки пластовой жидкостью.

Цель исследования заключается в определении зависимости коэффициента трения пары рабочих органов винтового насоса от числа Зоммерфельда для эластомерного материала статора винтового насоса, построении участка кривой Штрибека, характерной для условий работы погружных винтовых насосных установок, и определении характерных режимов трения материала резина–сталь.

Методы: экспериментальные исследования на триботехнической установке ИИ-5018 пар металл–эластомер в условиях сухого трения и при различных смазочных средах; статистическая обработка результатов экспериментов.

Результаты. Установлена зависимость коэффициента трения от числа Зоммерфельда для пары трения ротор–статор винтового насоса. Определены режимы трения, характерные для условий эксплуатации винтовых насосных установок.

Ключевые слова:

Добыча нефти, винтовой насос, трение, эластомер, триботехника, число Зоммерфельда, кривая Штрибека.

Винтовые насосные установки используются во всем мире как средство добычи и перекачки высоковязкой жидкости. Для механизированной добычи нефти преимуществом этих насосов является возможность откачки жидкости с высоким содержанием механических примесей и минимальным погружением под динамический уровень [1]. Работа винтового насоса обеспечивается двумя рабочими органами – винтом (ротором) и статором. Наибольшее распространение для добычи нефти получили винтовые пары с металлическим ротором и статором, выполненным из эластомерного материала, от правильности выбора которого будет зависеть наработка всей насосной установки, поэтому выбор эластомера является одной из важнейших задач, которые следует планировать при расчете дизайна винтовой насосной установки. По этой причине при выборе эластомеров всегда следует учитывать материалы, способные противостоять агрессивному воздействию температуры, давления и свойств жидкостей, которым оборудование будет подвергаться в течение всего срока эксплуатации. В качестве материала эластомера используются различные виды каучуков: бутадиеннитрильный каучук, гидрированный бутадиенакрилонитрильный каучук, фторкаучук и другие. Каждый

тип эластомерного материала подходит для конкретной среды в зависимости от его первоначальных механических свойств. Эти свойства включают стойкость к истиранию, теплоустойчивость, проницаемость для газа, подверженность взрывной декомпрессии, устойчивость к разрыву, воздействию воды и химических веществ [2–4].

Важнейшим фактором, определяющим энергетические затраты при работе винтового насоса, являются потери момента на трение в винтовой паре, которые зависят от свойств геометрии ротора и статора и механических и триботехнических свойств этих элементов.

В работе [5] проводился факторный анализ влияния геолого-технических и технологических параметров на необходимый крутящий момент в электродвигателе штанговой винтовой насосной установки. Установлено, что наибольшее влияние на значение крутящей нагрузки оказывает натяг винтовой пары и вязкость откачиваемой жидкости. При этом коэффициент трения в расчетах винтовой пары был задан постоянной величиной.

В работах [6, 7] проводились исследования эрозионного износа эластомеров винтовых насосов, в которых использовались модели Финни, Биттера и Хат-

чингса. Показано, что с ростом твердости материала эластомера эрозионный износ уменьшается. В ряде исследований, реализующих методику подбора эластомеров под условия эксплуатации скважины [8, 9], основными критериями выделяются термобарические условия работы насоса и агрессивность компонентов перекачиваемой жидкости. Для оценки влияния этих факторов на значение коэффициента трения необходимо исследование трения для образцов, выдержанных в различных средах.

Коэффициент трения является одним из параметров для расчета крутящей и осевой нагрузки в винтовых насосных установках [10, 11], при этом в различных методиках расчета он используется как константа.

В работе [12] показано, что процесс трения винтовой пары характеризуется непрерывным изменением контактного давления и скорости скольжения рабочей поверхности при вращении ротора. В связи с этим коэффициент трения при вращении ротора будет варьироваться с изменением контактного давления и скорости скольжения, поэтому для приближенного расчета потерь на трение необходимо выполнять 3D моделирование работы винтовых насосов методом конечных элементов. Для этого помимо упругих свойств эластомеров необходимо задавать и триботехнические свойства. В работах [13, 14] при 3D моделировании винтового насоса коэффициент трения использовался как константа. Уточненная зависимость коэффициента трения от контактного давления и скорости скольжения позволит создавать более точные модели винтового насоса.

В работах [5, 15, 16] показано, что на основе анализа крутящей и осевой нагрузки обеспечивается возможность диагностики технического состояния винтовой пары насоса. Точность диагностирования технического состояния насоса будет зависеть от точности определения крутящего момента в винтовой паре, поэтому важнейшей задачей является определение триботехнических аспектов взаимодействия рабочих органов. Также показано, что перепад давления насоса линейно зависит от осевой нагрузки с коэффициентом детерминации 0,78, что позволяет на основе датчика осевой нагрузки, расположенного на устье скважины, оценить изменение динамического уровня [15]. В работе [16] установлена линейная зависимость перепада давления насоса от крутящего момента. Для более точной оценки динамического уровня скважины необходима полная картина процессов трения, происходящих в винтовой паре.

В ряде работ [17, 18 и др.] показано, что коэффициент трения различных пар трения нелинейно зависит от коэффициента Зоммерфельда (учитывающего вязкость смазки и давление контактных поверхностей, а также скорость их скольжения). Установление зависимости коэффициента трения от числа Зоммерфельда позволит более точно установить энергоэффективный режим работы винтовой насосной установки.

В отличие от работ [17, 19] в данной статье приведены результаты исследования процессов трения, выполненного для условий (контактное давление, вяз-

кость жидкости и скорость скольжения), характерных для винтовых насосных установок, применяющихся для добычи нефти.

Постановка задачи исследования и описание экспериментального стенда

Задача исследования – экспериментально установить зависимость коэффициента трения пары эластомер–сталь от числа Зоммерфельда (учитывающего вязкость смазки, контактное давление и скорость скольжения пары скольжения). Это классическая задача, заключающаяся в построении диаграммы Штрибека [20]. Диаграмма Штрибека представляет собой зависимость коэффициента трения от числа Зоммерфельда, по которой можно определить один из режимов смазки: гидродинамический, граничный и смешанный.

Для получения адекватной зависимости варьируемыми параметрами в эксперименте являются все параметры числа Зоммерфельда. Вязкость смазочной среды варьируется температурой и составом жидкости (вода, промышленное масло, нефть). Изменение контактного давления и скорости скольжения предусмотрено возможностями триботехнической установки ИИ-5018.

Схема экспериментального стенда приведена на рис. 1.

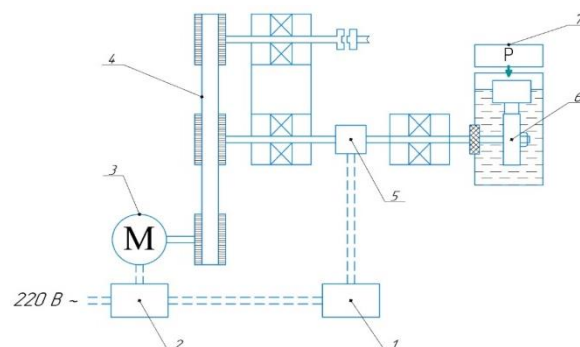


Рис. 1. Схема экспериментального стенда
Fig. 1. Test bench

Принцип работы экспериментального стенда следующий: при помощи программного средства на персональном компьютере – 1 управляющий сигнал передается на тиристорный регулятор – 2, который задает необходимую частоту вращения асинхронного двигателя – 3. Через клиноременную передачу – 4 и измеритель крутящего момента – 5 вращение передается на ролик – 6, в котором узел нагружения – 7 прижимает эластомерный вкладыш. Величина нагружения задается весами. Значение момента трения, определяемого измерителем крутящего момента – 5, передается на персональный компьютер – 1.

На рис. 2, а изображен металлический ролик. Твердость ролика 34–38 HRC, материал – сталь 40ХН.

На рис. 2, б изображен эластомерный вкладыш, изготовленный из материала статора винтового насоса.



Рис. 2. Пара трения: а) стальной ролик; б) вкладыш
Fig. 2. Friction pair: a) steel roller; b) elastomer piece

Методическая часть

Число Зоммерфельда определялось по зависимости вида:

$$So = \frac{\mu \cdot V}{N}, \quad (1)$$

где V – скорость относительного движения, м/с; μ – вязкость жидкой среды, Па·с; N – удельная сила прижатия, Н/м.

Коэффициент трения определялся по формуле:

$$\varphi_c = \frac{M_{тр}}{R \cdot P},$$

где $M_{тр}$ – момент трения, Н·м; R – радиус диска, м; P – нагрузка на вкладыш, Н.

Регистрация крутящего момента происходила с помощью датчика крутящего момента, который формировал набор данных и передавал на персональный компьютер.

Нагрузка на вкладыш обеспечивалась грузами, масса которых была определена с помощью электронных весов.

Для каждого эксперимента фиксировались следующие параметры:

- динамическая вязкость среды (с помощью вискозиметра определены значения вязкости в зависимости от температуры);
- площадь контакта, мм²;
- шероховатость ролика Rz 3,69;
- температура окружающей среды, начальная температура образца, °С;
- конечная температура образца, °С;
- частота вращения ролика, об/мин;
- осевая нагрузка, кг;
- момент трения, Н·м.

Трибологические условия контакта пары трения эластомер–статор приближены к реальным за счет соответствия значений контактного давления и скорости скольжения. По зависимостям из [12] были рассчитаны диапазоны контактных давлений и скоростей скольжения металлического ротора об эластомер статора (для винтовых насосов эксплуатирующихся в скважинных условиях):

- контактное давление – от 0,3 до 1 МПа в зависимости от глубины спуска насоса и параметров насоса);
- скорость скольжения – от 0,1 до 1 м/с.

Результаты исследования

На первом этапе было проведено исследование влияния различных факторов на коэффициент трения образцов эластомера без смазки. В рассматриваемом диапазоне скоростей скольжения и контактных давлений значительных изменений коэффициента трения обнаружено не было. Для исходного образца коэффициент трения составил 0,44, для выдержанного в нефти – 0,31. Изменение коэффициента трения связано с поверхностной пластификацией образца при выдерживании его в нефти.

На втором этапе было проведено исследование контактного взаимодействия в условиях смазки масляной пленкой.

Наибольшее влияние на значение коэффициента трения оказал фактор нагрузки (контактного давления). С ростом нагрузки во всех условиях наблюдалось уменьшение коэффициента трения. При увеличении нагрузки в 3,3 раза (с 0,3 до 1 МПа) коэффициент трения уменьшился практически в два раза (в среднем с 0,33 до 0,18). Результаты представлены на рис. 3. Снижение коэффициента трения можно объяснить тем, что при малых нагрузках контакт происходит только на самых высоких выступах поверхности, поэтому реальная площадь контакта меньше, чем теоретическая. По мере роста нагрузки менее высокие выступы будут вовлекаться в процесс трения, что приведет к увеличению площади контакта и снижению силы трения.

Влияние скорости контактного взаимодействия неоднозначно. При малых нагрузках трехкратное увеличение скорости приводило максимум к 8 % увеличению коэффициента трения. При максимальных нагрузках увеличение скорости скольжения приводило к снижению коэффициента трения на 7 %.

На третьем этапе было проведено исследование влияния различных факторов на коэффициент трения образцов эластомера в условиях масляной ванны. Результаты исследований приведены на рис. 4.

В условиях обильной смазки влияние контактного давления на коэффициент трения становится практически линейным (рис. 4, б). Кроме того, снизились значения коэффициентов трения.

На четвертом этапе были построены зависимости коэффициента трения от числа Зоммерфельда.

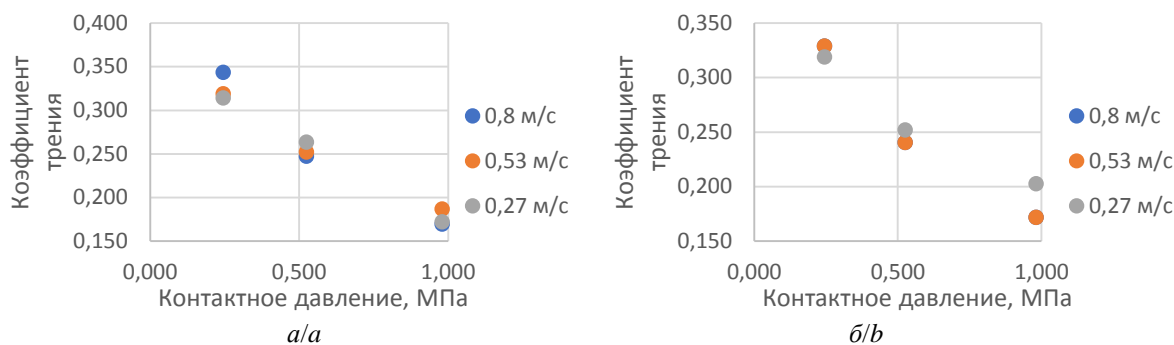


Рис. 3. Влияние нагрузки на коэффициент трения: а) исходный образец; б) выдержанный в нефти образец
Fig. 3. Loading influence on friction coefficient: a) original sample; b) oil-aged sample

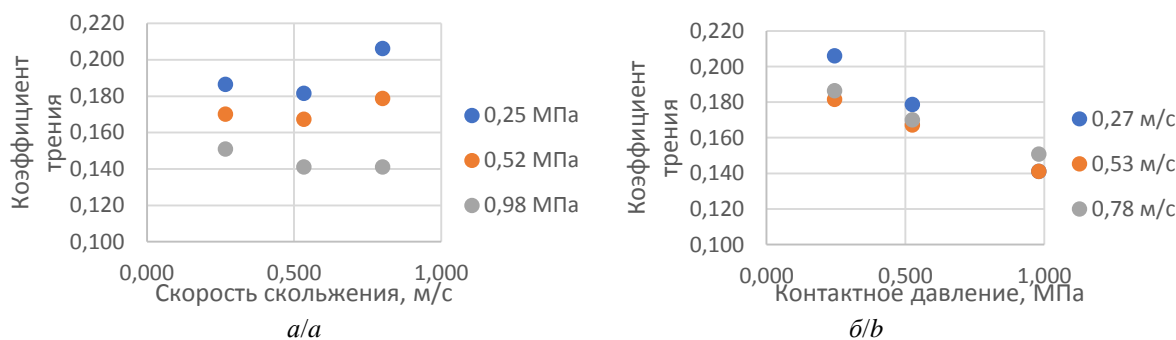


Рис. 4. Влияние скорости скольжения (а) и контактного давления (б) на коэффициент трения
Fig. 4. Dependence of the friction coefficient on the sliding speed (a) and contact pressure (b)

На рис. 5 показаны построенные зависимости для исходного образца (а), образца, выдержанного в нефти (б), и исходного образца в условиях масляной ванны (в).

Во всех случаях коэффициент детерминации моделей является удовлетворительным (более 0,6), что говорит о том, что эффект граничного трения для эластомеров, используемых для изготовления винтовых насосов, есть, хоть и менее выраженный в сравнении с контактом металл по металлу (это объясняется тем, что, в отличие от металлической поверхности, поверхность эластомера плохо образует смазочную пленку). В то же время при испытаниях в масляной ванне зависимость коэффициента трения от числа Зоммерфельда практически линейная.

На пятом этапе было проведено исследование влияния различных факторов на коэффициент трения образцов эластомера в условиях нефтяной ванны. Для этого использовалась нефть вязкостью 560,7 мПа·с (при температуре 20 °С).

На рис. 6 показано влияние контактного давления (а) и скорости скольжения (б) на коэффициент трения в условиях нефтяной ванны.

Поскольку вязкость нефти на порядок больше, чем у масла, использованного в предыдущих опытах, наблюдается более выраженный эффект жидкостного трения, поскольку во всех случаях с ростом скорости коэффициент трения увеличивался.

На рис. 7 показано влияние нагрузки (а) и скорости скольжения (б) на коэффициент трения в воде.

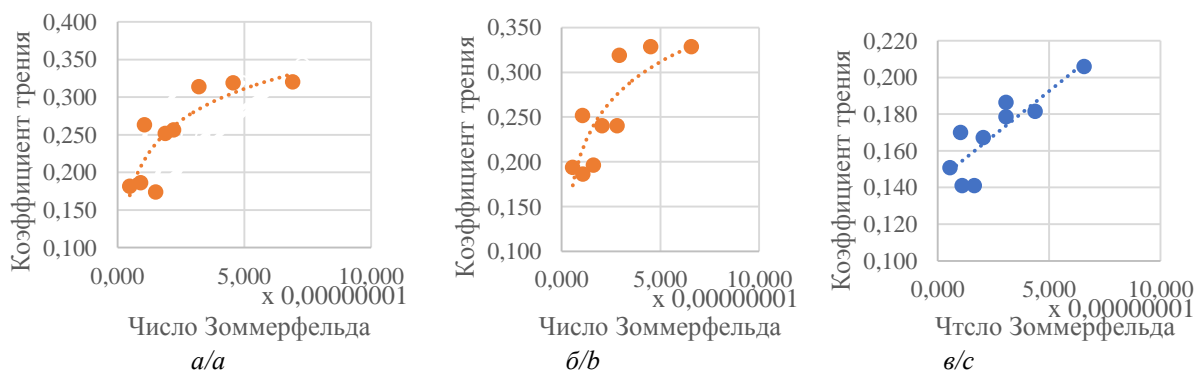


Рис. 5. Зависимости коэффициента трения от числа Зоммерфельда для исходного образца (а), образца выдержанного в нефти (б), образца испытываемого в масляной ванне (в)

Fig. 5. Friction coefficient dependence on the Sommerfeld number for an initial sample (a), a sample aged in oil (b), a sample tested in an oil bath (c)

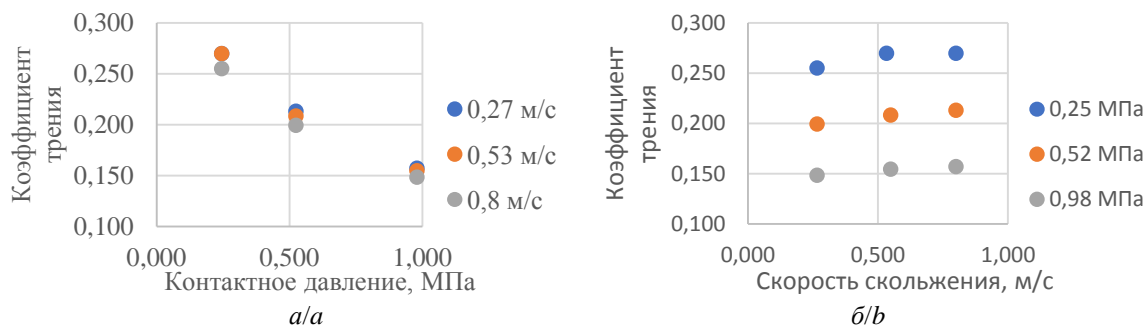


Рис. 6. Влияние контактного давления (а) и скорости скольжения (б) на коэффициент трения
Fig. 6. Friction coefficient dependence on the contact pressure (a) and sliding speed (b)

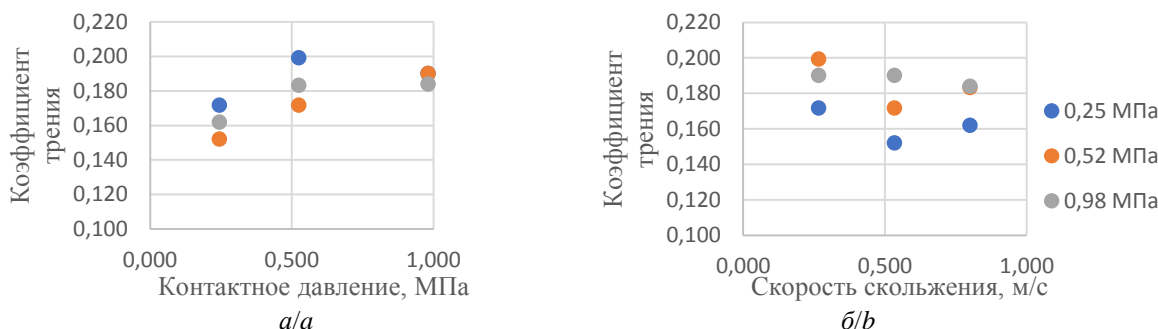


Рис. 7. Влияние контактного давления (а) и скорости скольжения (б) на коэффициент трения
Fig. 7. Friction coefficient dependence on the contact pressure (a) and sliding speed (b)

На рис. 8 показано влияние числа Зоммерфельда на коэффициент трения в условиях обильной смазки в различных жидкостях (совмещенные данные в средах: нефть, масло и вода). В связи с тем, что вязкость

жидкостей различается между собой на порядки (и соответственно число Зоммерфельда), шкала на графике показана в логарифмическом виде.

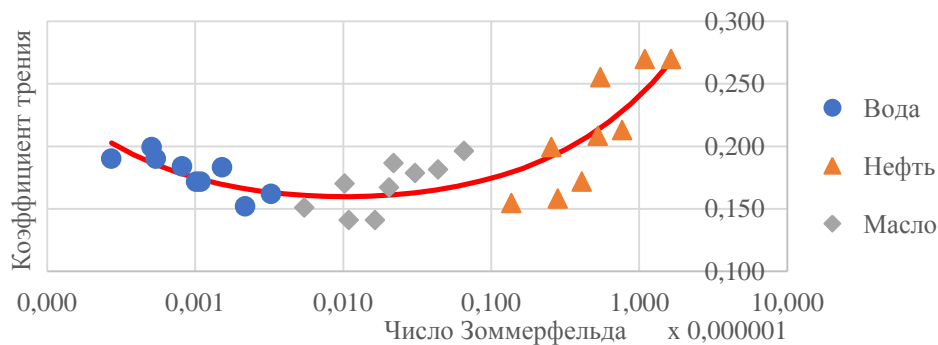


Рис. 8. Зависимость коэффициента трения от числа Зоммерфельда (шкала логарифмическая)
Fig. 8. Friction coefficient dependence on the Sommerfeld number (logarithmic scale)

При трении в условии смазки водой наблюдаются низкие значения числа Зоммерфельда. При этом с ростом числа Зоммерфельда наблюдается снижение коэффициента трения. Это характерно для процессов граничного трения. В условиях смазки маслом вязкость жидкости на порядок выше. При этом наблюдается минимальная величина коэффициента трения, характерная для режима смешанного трения. Кроме того, с ростом числа Зоммерфельда наблюдается рост коэффициента трения. Для высоковязкой нефти с увеличением числа Зоммерфельда наблюдается более интенсивный рост коэффициента трения, в сравнении с условиями смазки маслом, что характерно для гид-

родинамического режима трения, когда на коэффициент трения преобладающее влияние оказывает вязкость среды.

Для данных на рис. 8 построено уравнение регрессии (1), вид которой был применен из работы [21]. Уравнение построено с помощью оптимизационного пакета Gekko [22]. Коэффициент детерминации R^2 получился равным 0,73. Коэффициенты модели $a=99,437489957$, $b=0,1397658309$, $c=10,114598909e-07$.

$$f = a\sqrt{So} + b + \frac{c}{\sqrt{So}}.$$

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при трении пары сталь–эластомер винтового

насоса наблюдаются эффекты граничного трения, аналогичные происходящим в паре сталь–сталь, хоть и менее выраженные в связи с особенностями формирования смазочной пленки на поверхности эластомера. По полученной диаграмме Штрибека можно выделить явно выраженный участок с гидродинамическим трением (при трении в условиях высоковязкой нефти), а также смешанного трения в условиях воды и масла. Наибольшее влияние на коэффициент трения оказывают вязкость жидкости и контактное давление.

Заключение

По экспериментально полученной диаграмме Штрибека для эластомерного материала можно выделить два режима, характерных для условий эксплуатации винтовых насосов в скважине, – это режим смешанного трения (при малой вязкости жидкости) и гидродинамического трения (в условиях высоковязкой нефти). Полученная зависимость позволит более

точно определять необходимый крутящий момент на электродвигателе. Эти данные могут быть использованы при проектировании, подборе и диагностике винтовых насосных установок.

Минимальное значение коэффициента трения для пары сталь–эластомер, согласно полученной зависимости, составляет 0,16. Установлено, что из всех факторов эксплуатации наибольшее влияние на коэффициент трения пары эластомер винтового насоса – стальной ролик оказывает контактное давление. В условиях гидродинамического трения рост контактного давления приводит к снижению коэффициента трения до минимальных значений. При малой вязкости порядка 20 мПа·с четырехкратный рост контактного давления приводит к снижению коэффициента трения на 20 %, при высокой вязкости порядка 500 мПа·с четырехкратный рост контактного давления приводит к снижению коэффициента трения на 40 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Латыпов Б.М. Установка штангового винтового насоса для добычи нефти в осложненных условиях // Нефтегазовое дело. – 2012. – Т. 10. – № 1. – С. 13–15.
2. Влияние условий эксплуатации наработку штанговых винтовых насосных установок / Б.М. Латыпов, А.С. Топольников, А.Г. Комков, Р.Р. Исмагилов // Нефтегазовое дело. – 2016. – Т. 15. – № 2. – С. 55–60.
3. Increased run life in progressive cavity pumps from characterization of high nitrile elastomers in the Orinoco Oil Belt / M.J. Han, E. Guerra, S.V. Rangel, I.B. Gamez, A. Delgado // SPE Artificial Lift Conference and Exhibition-Americas. – The Woodlands, Texas, USA, 2018. – С. 1–29. URL: <https://onepetro.org/SPEALCE/proceedings-abstract/18ALCE/2-18ALCE/D021S005R003/214323> (дата обращения: 15.03.2021).
4. Исаев А.А., Малыгин В.И., Шарифуллин А.А. Исследование напорных характеристик винтовых насосов и анализ влияния условий эксплуатации на обрывность колонны насосных штанг // Нефть. Газ. Новации. – 2019. – № 10. – С. 78–82.
5. Уразаков К.Р., Латыпов Б.М. Влияние геолого-технических и технологических параметров на нагрузки и усталостную прочность в штанговой колонне винтовых насосов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 5. – С. 120–127.
6. Analysis of progressive cavity pumps specific wear processes using Finnie models / M. Popescu, A.I. Popovici, F.N. Petrescu, N.N. Antonescu // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – V. 174. – С. 1–7. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/174/1/012020/pdf> (дата обращения: 15.03.2021).
7. Analysis of progressive cavity pumps specific wear processes using Bitter and Hutchings models / A.I. Popovici, M. Popescu, N.N. Antonescu, F.N. Petrescu // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – V. 174. – С. 1–7. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/174/1/012022/> (дата обращения: 15.03.2021).
8. Marchan L., Socorro D., Concalves E. Application of elastomer more resistant to gas in progressive cavity pumps in Boscana field to improve run life // SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference Proceedings. – Maracaibo, Venezuela, 2014. – С. 1–12. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-169414-MS> (дата обращения: 15.03.2021).
9. Delpassand M.S. Progressing cavity (PC) pump design optimization for abrasive applications // Proceedings – SPE Production Operations Symposium. – Oklahoma City, Oklahoma, 1997. – P. 1–5. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-37455-MS> (дата обращения: 15.03.2021).
10. Методика расчета и подбора дизайнов установок винтовых насосов с погружным и поверхностным приводами для добычи нефти / М.Г. Волков, Р.С. Халфин, А.Р. Брот, А.С. Топольников, Б.М. Латыпов, Э.О. Тимашев // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2018. – № 6. – С. 32–37.
11. Уразаков К.Р., Латыпов Б.М., Исмагилов Р.Р. Методика расчета штанговых колонн для винтовых насосных установок // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2015. – № 4. – С. 72–94.
12. Балденко Д.Ф., Балденко Ф.Д., Гноевых А.Н. Одновинтовые гидравлические машины. В 2 т. Т. 1. Одновинтовые насосы. – М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2005. – 488 с.
13. Three dimensional dynamics simulation of progressive cavity pump with stator of even thickness / Z. Zhou, X.C. Shi, G.G. Cao, C.L. Sun, Y. H., L. Holiday, W. Hanfu // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2013. – V. 106. – P. 71–76.
14. Three dimensional FEM simulation and parameter study on laden torque of interference friction of PCP / He Liu, X.D. He, Hean He, Xiuxi Wang, Gang Cao // Society of Petroleum Engineers – Progressing Cavity Pumps Conference. – Alberta, Canada, 2010. – P. 1–7. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-135808-MS> (дата обращения: 15.03.2021).
15. Mena L., Klein S. Surface axial load based Progressive Cavity Pump optimization system // SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference Proceedings. – Caracas, Venezuela, 1999. – P. 1–6. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-53962-MS> (дата обращения: 15.03.2021).
16. Quick look methodology for progressive cavity pump sizing and performance monitoring / N. Agrawal, R. Baid, L. Mishra, P. Ghosh, M. Kushwaha // SPE Oil & Gas India Conference and Exhibition. – Society of Petroleum Engineers. – Mumbai, India, 2015. – P. 1–23. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-178097-MS> (дата обращения: 15.03.2021).
17. Surface roughness effect on the friction and wear behaviour of acrylonitrile–butadiene rubber (NBR) under oil lubrication / D. Feng, M. Shen, X. Peng, X. Meng // Tribol. Lett. – 2017. – V. 65. – № 10. – P. 1–14. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11249-016-0793-5> (дата обращения: 15.03.2021).
18. Уразаков К.Р., Латыпов Б.М., Исмагилов Р.Р. Экспериментальные исследования коэффициента трения элементов штанговой колонны винтовых насосных установок // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2015. – № 3. – С. 256–270. URL: http://ogbus.ru/issues/3_2015/ogbus_3_2015_p256-270_UrazakovKR_ru.pdf (дата обращения 15.03.2021).
19. Study on wear behaviours under NBR/stainless steel under sand water-lubricated conditions / C.L. Dong, C.Q. Yuan, X.Q. Bai, Y. Yang, X.P. Yan // Wear. – 2015. – V. 332–333. – P. 1012–1020. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043164815000162> (дата обращения 15.03.2021).
20. Lu X., Khonsari M.M., Gelinck E.R.M. The Stribeck curve: experimental results and theoretical prediction // J. Tribol. – 2006. – № 128 (4). – P. 789–794.

21. Уразаков К.Р. Эксплуатация наклонно направленных скважин. – М.: Недра, 1993. – 169 с.
22. GEKKO optimization suite / L.D. Beal, D.C. Hill, R.A. Martin, J.D. Hedengren // Processes. – 2018. – V. 6 (8). – P. 1–26. URL: <https://www.mdpi.com/2227-9717/6/8/106/pdf>

Поступила 19.04.2021 г.

Информация об авторах

Тимашев Э.О., кандидат технических наук, докторант кафедры машин и оборудования нефтегазовых промыслов Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Латыпов Б.М., кандидат технических наук, доцент кафедры машин и оборудования нефтегазовых промыслов Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Уразаков К.Р., доктор технических наук, профессор кафедры машин и оборудования нефтегазовых промыслов Уфимского государственного нефтяного технического университета.

UDC 622.276.53.054.4

TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF THE SCREW PAIR OF THE PROGRESSING CAVITY PUMP

Eduard O. Timashev¹,
timashev@mail.ru

Bulat M. Latypov¹,
bulatti@hotmail.com

Kamil R. Urazakov¹,
urazakk@mail.ru

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

The relevance of the study is caused by the necessity in increasing the precision of calculating the torsional loads, which will provide conditions for refining the diagnostic algorithms and predicting the resource of progressing cavity pumps. They are used in downhole conditions characterized by high viscosity of the pumped fluid (more than 30 mPa·s) and a high content of mechanical impurities in it (the concentration of particles is more than 500 mg/l). The operating experience of the progressing cavity pumps shows that the reliability of pumping units depends on the state of the working bodies. During operation, the stator elastomer swells, which leads to increase in friction losses. To improve the efficiency of selection, calculation and diagnostics of the progressing cavity pumps, it is important to have a deep understanding of the processes occurring during the friction of a metal rotor against the stator elastomer under conditions of formation fluid lubrication.

The purpose of the study is to determine the dependence of the friction coefficient of a pair of working bodies of the progressing cavity pump on the Sommerfeld number for the elastomeric material of the progressing cavity pump stator and to plot a section of the Stribeck curve typical for the operating conditions of the progressing cavity pumps.

Methods: experimental studies on tribotechnical installation II-5018 metal-elastomer pairs.

Results. The authors have determined the friction coefficient dependence on the Sommerfeld number for the rotor–stator friction pair, according to which the Stribeck curve was constructed.

Key words:

Oil production, progressing cavity pump, friction, elastomer, tribotechnics, Sommerfeld number, Stribeck curve.

REFERENCES

- Latypov B.M. Progressing cavity pump for oil production in complicated operating conditions. *Petroleum engineering*, 2012, vol. 10, no. 1, pp. 13–15. In Rus.
- Latypov B.M., Topolnikov A.S., Komkov A.G., Ismagilov R.R. The influence of operating conditions on the operating time of progressing cavity pump. *Petroleum engineering*, 2016, vol. 14, no. 2, pp. 55–60. In Rus.
- Han M.J., Guerra E., Rangel S.V., Gamez I.B., Delgado A. Increased run life in progressive cavity pumps from characterization of high nitrile elastomers in the Orinoco Oil Belt. *SPE Artificial Lift Conference and Exhibition-Americas. Society of Petroleum Engineers*. The Woodlands, Texas, USA, 2018. pp. 1–29. Available at: <https://onepetro.org/SPEALCE/proceedings-abstract/18ALCE/2-18ALCE/D021S005R003/214323> (accessed: 15 March 2021).
- Isaev A.A., Malyhin V.I., SHarifullin A.A. Investigation of screw pumps' head-capacity curves and analysis of the effect of operating conditions on the parting of a sucker rod string. *Neft. Gas. Novacii*, 2019, no. 10, pp. 78–82. In Rus.
- Urazakov K.R., Latypov B.M. Influence of operating conditions on loads and fatigue strength in a rod column of PCP. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 5, pp. 120–127. In Rus.
- Popescu M., Popovici A.I., Petrescu F.N., Antonescu N.N. Analysis of progressive cavity pumps specific wear processes using Finnie models. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 174, pp. 1–7. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/174/1/012020/pdf> (accessed: 15 March 2021).
- Popovici A.I., Popescu M., Antonescu N.N., Petrescu F.N. Analysis of progressive cavity pumps specific wear processes using Bitter and Hutchings models. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 174, pp. 1–7. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/174/1/012022/pdf> (accessed: 15 March 2021).
- Marchan L., Socorro D., Concalves E. Application of elastomer more resistant to gas in progressive cavity pumps in Boscan field to improve run life. *SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference Proceedings*. Maracaibo, Venezuela, 2014. pp. 1–12. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-169414-MS> (accessed: 15 March 2021).
- Delpassand M.S. Progressing cavity (PC) pump design optimization for abrasive applications. *Proceedings – SPE Production Operations Symposium*. Oklahoma City, Oklahoma, 1997. pp. 1–5. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-37455-MS> (accessed: 15 March 2021).
- Volkov M.G., Khalfin R.S., Brot A.R., Topolnikov A.S., Latypov B.M., Timashev E.O. Methodology for calculating and selecting designs for progressing cavity pumps installations with submersible and surface drives for oil production. *Equipment and technologies for oil and gas complex*, 2018, no. 6, pp. 32–37. In Rus.
- Urazakov K.R., Latypov B.M., Ismagilov R.R. Methodology for calculating sucker rod string of progressing cavity pump. *Oil and gas business*, 2015, no. 4, pp. 72–94. In Rus. Available at: http://ogbus.ru/issues/4_2015/ogbus_4_2015_p72-94_UrazakovKR_ru.pdf (accessed: 15 March 2021).
- Baldenko D.F., Baldenko F.D., Gnoevyh A.N. *Odnovintovye gidravlicheskie mashiny. T. 1. Odnovintovye nasosy* [Screw hydraulic machines V. 1. Screw pumps]. Moscow, IRC Gazprom Publ., 2005. 488 p.
- Zhou Z., Shi X.C., Cao G.G., Sun C.L., Y H., Holiday L., Hanfu W. Three dimensional dynamics simulation of progressive cavity pump with stator of even thickness. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2013, vol. 106, pp. 71–76.

14. He Liu, He X.D., Hean He, Xiuxi Wang, Gang Cao. Three dimensional FEM simulation and parameter study on laden torque of interference friction of PCP. *Society of Petroleum Engineers – Progressing Cavity Pumps Conference*. Alberta, Canada, 2010. pp. 1–7. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-135808-MS> (accessed: 15 March 2021).
15. Mena L., Klein S. Surface axial load based Progressive Cavity Pump optimization system. *SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference Proceedings*. Caracas, Venezuela, 1999. pp. 1–6. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-53962-MS> (accessed: 15 March 2021).
16. Agrawal N., Baid R., Mishra L., Ghosh P., Kushwaha M. Quick look methodology for progressive cavity pump sizing and performance monitoring. *SPE Oil & Gas India Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers*. Mumbai, India, 2015. pp. 1–23. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-178097-MS> (accessed: 15 March 2021).
17. Feng D., Shen M., Peng X., Meng X. Surface roughness effect on the friction and wear behaviour of acrylonitrile–butadiene rubber (NBR) under oil lubrication. *Tribol. Lett.*, 2017, vol. 65, no. 10, pp. 1–14. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11249-016-0793-5> (accessed: 15 March 2021).
18. Urazakov K.R., Latypov B.M., Ismagilov R.R. Experimental studies of the coefficient of friction of the elements of the rod string of Progressing cavity pumps. *Oil and gas business*, 2015, no. 3, pp. 256–270. In Rus. Available at: http://ogbus.ru/issues/3_2015/ogbus_3_2015_p256-270_UrazakovKR_ru.pdf (accessed: 15 March 2021).
19. Dong C.L., Yuan C.Q., Bai X.Q., Yang Y., Yan X.P. Study on wear behaviours for NBR/stainless steel under sand water-lubricated conditions. *Wear*, 2015, vol. 332–333, pp. 1012–1020. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043164815000162> (accessed: 15 March 2021).
20. Lu X., Khonsari M.M., Gelinck E.R.M. The Stribeck curve: experimental results and theoretical prediction. *J. Tribol.*, 2006, no. 128 (4), pp. 789–794.
21. Urazakov K.R. *Ekspluatatsiya naklonno napravlennykh skvazhin* [Oil production from directional wells]. Moscow, Nedra Publ., 1993. 169 p.
22. Beal L.D., Hill D.C., Martin R.A., Hedengren J.D. GEKKO optimization suite. *Processes*, 2018, vol. 6 (8), pp. 1–26. Available at: <https://www.mdpi.com/2227-9717/6/8/106/pdf> (accessed: 15 March 2021).

Received: 19 April 2021.

Information about the authors

Eduard O. Timashev, Cand. Sc., doctoral student, Ufa State Petroleum Technological University.

Bulat M. Latypov, Cand. Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technological University

Kamil R. Urazakov, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University.

УДК 622.831:622.274

РОЛЬ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ В ПРОРЫВАХ ВОД В ВЫРАБОТКИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В СЛОЖНЫХ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Сашурин Анатолий Дмитриевич¹,
sashour@igd.uran.ru

Панжин Андрей Алексеевич¹,
andrey.panzhin@gmail.com

Харисов Тимур Фаритович¹,
timur-ne@mail.ru

¹ Институт горного дела УрО РАН,
Россия, 620075, г. Екатеринбург, ГСП-219, ул. Мамина-Сибиряка, 58.

Актуальность исследования обусловлена широкой распространенностью проблемы предотвращения прорывов водных масс в подземные горные выработки, успешное решение которой во многом определяет эффективность и безопасность разработки месторождений.

Цель: исследование взаимосвязи современных геодинамических движений с опасностью прорыва водных объектов в горные выработки при разработке месторождений в сложных гидрогеологических условиях.

Объект: массив месторождений, находящиеся в сложных гидрогеологических условиях, а именно залегающих под мощной осадочной толщей, вмещающей несколько водоносных горизонтов.

Методы: аналитический, спутниковое позиционирование двухчастотными геодезическими GPS приемниками, компьютерное моделирование векторного и тензорного деформационного поля.

Результаты. На основании анализа произошедших аварийных ситуаций, связанных с прорывами вод на рудниках, их причин и способов предупреждения установлено, что одним из важнейших факторов, вызывающих прорыв водных объектов, являются современные геодинамические движения, формирующие неоднородное мозаичное напряженно-деформированное состояние в массиве пород, препятствующее сохранению целостности водозащитных массивов. Известные способы предотвращения опасности прорыва вод в горные выработки путем закладки выработанного пространства и поддержания налегающей толщи целиками при назначении и применении параметров очистных работ без учета формирования реального напряженно-деформированного состояния под влиянием геодинамических движений, как правило, сопровождаются авариями. В качестве рекомендаций по предупреждению прорывов вод в горные выработки представлен и апробирован метод изучения геодинамических движений и процессов деформирования, протекающих в массиве, на примере Еланского и Ёлкинского полиметаллических месторождений. Установлены векторы трендовых движения пунктов совместно с тектоническим строением исследуемого региона. Зафиксированы максимальные вертикальные поднятия и максимальные горизонтальные смещения. Результаты измерений обработаны и преобразованы в векторное и тензорное представление деформационного поля, где выделены главные компоненты тензора деформаций.

Выводы. Исследуемый массив находится в умеренной зоне напряженно-деформированного состояния с характерной разнонаправленностью тензора деформаций, что приводит к развитию сдвиговых деформаций в массиве горных пород, отрицательно влияющих на устойчивость горных выработок, а также способствующих раскрытию естественных структурных нарушений массива горных пород и повышению его фильтрационных свойств. Повышение надежности применяемых способов предотвращения опасности прорывов вод в горные выработки требует проведения специальных исследований формирования реального напряженно-деформированного состояния и учета его параметров при проектировании и ведении очистных работ.

Ключевые слова:

Прорывы вод, сложные гидрогеологические условия, водные объекты, затопление рудников, геодинамика, тензор деформаций, напряженно-деформированное состояние.

Введение

Критерием сложных гидрогеологических условий подземной разработки месторождений полезных ископаемых принято считать наличие природных или искусственных водных объектов, способных создать аварийные прорывы водных или грязевых масс в горные выработки в процессе их строительства и эксплуатации. К наземным водным объектам относятся искусственные и естественные водоемы. В качестве подземных водных объектов выступают обводненные породы налегающей толщи, именуемые водоносными горизонтами, нередко осложненные карстовыми явлениями.

Относительно небольшое число факторов, создающих неблагоприятные гидрогеологические условия разработки месторождений, при их широкой распространенности выдвигают проблему предотвращения прорывов водных масс в подземные горные выработки в одну из актуальнейших проблем горного дела, успешное решение которой во многом определяет эффективность и безопасность разработки месторождений [1]. В мировой и отечественной горной практике едва ли найдется вид полезного ископаемого, добыча которого не сопровождалась бы аварийными и катастрофическими прорывами вод, в том числе, наряду с экономическим ущербом, и с трагическими последствиями. Особенно чувствительны к прорыву вод в горные выработки соляные шахты, для

которых они чаще всего завершаются полным затоплением и выводом предприятия из эксплуатации. В зарубежной горной практике насчитывается несколько десятков затопленных соляных шахт. Среди отечественных соляных рудников полностью затоплены Соля-Илецкая соляная шахта-1 (1979 г.), Березниковский рудник-3 (1986 г.), Березниковский рудник-1 (2006 г.) и в аварийном состоянии пока работает Соликамский рудник-2 [2–5].

В отечественной практике аварийные прорывы подземных вод имели место на десятках угольных шахт Кузбасса [6]. Прорывы вод из подземных и наземных источников происходили в угольные шахты Украины, Казахстана, Киргизии. Затопление шахты «Западная» ООО Компания «Ростовуголь» Новошахтинского угольного бассейна произошло из законсервированной соседней шахты через ее действующий ствол, что воспрепятствовало эвакуации сорока шести шахтеров, которые были спасены через несколько дней после проходки специальной выработки из другой, действующей, соседней шахты [7].

Внезапный прорыв от 150 до 300 тыс. м³ грязевых масс в 2005 г. на шахте «Соколовская» АО «ССГПО» Казахстана привело к гибели двух человек [8]. Шахта полностью была выведена из строя и приведена в рабочее состояние лишь через 7 месяцев. Катастрофа с затоплением рудника «Мир» компании «Алроса», происшедшая в 2017 г., сопровождалась прорывом около 300 тыс. м³ воды через предохранительный целик из расположенного выше отработанного карьера. В настоящее время рудник затоплен, из 150 человек, находившихся в момент прорыва под землей, 8 человек не удалось спасти. Экономический ущерб от катастрофы был оценен приблизительно в 7,4 млрд р.

Одним из наиболее трагичных катастроф в международной горной практике является, пожалуй, затопление рудника Замбии «Муфулира», происшедшее в 1970 г. Месторождение, представленное несколькими изолированными участками, залегающими на разных глубинах, было вскрыто до глубины 500 м вертикальными стволами, а нижние горизонты до глубины 1050 м были вскрыты наклонными слепыми стволами. Отработка велась системами с обрушением вмещающих пород. В зону обрушения одного из ранее отработанных локальных участков верхнего этажа на протяжении многих лет складировались флотационные хвосты обогатительной фабрики. В хвостохранилище скопилось около 19,6 млн т отвальной массы, поверхность которой была покрыта водой от стока грунтовых вод, атмосферных осадков и отстоя хвостов.

В сентябре 1970 г. большое количество жидких шламов прорвалось в подземные горные выработки. Эпицентры прорывов располагались в различных местах верхнего этажа разработки. В момент аварии в руднике присутствовало 303 человека, только 214 остались живы. Свидетели этого происшествия утверждают, что шлам прорывался из различных мест и быстро заполнял выработки, уничтожая все на своем пути. Оборудование, буровые станки, погрузочные машины были снесены потоком. Насосные станции были затоплены, и рудник был полностью выведен из

строя. Комиссией было установлено, что причиной катастрофы на руднике стала активизация процесса сдвижения горных пород в старой зоне обрушения [9].

Проведенный краткий исторический экскурс по аварийным и катастрофическим случаям прорыва водных объектов в горные выработки подземных горных предприятий, ведущих разработку месторождений в сложных гидрогеологических условиях, позволяет сделать вывод, что решение данной проблемы играет важную роль в обеспечении эффективности и безопасности подземных разработок на протяжении всей истории горного дела и актуальность ее не утрачена на современном этапе его развития.

Техническими исследованиями в рассмотренных выше случаях прорывов вод в горные выработки шахт установлено, что нарушения водозащитных свойств, формирование магистральных водопроводящих трещин и зон в породах водозащитной толщи были вызваны процессом самообрушения горных пород и сдвижением массива над выработанным пространством.

Сохранение целостности водозащитной толщи в сложившейся практике обеспечивается либо применением камерных систем разработки с поддержанием целиками налегающих пород, либо применением систем разработки с закладкой выработанного пространства, в том числе твердеющими смесями. Во многих случаях эти способы обеспечивают успешную разработку месторождений в сложных гидрогеологических условиях. Однако, как следует из приведенных и других многочисленных примеров, при их применении нередко возникают сбои, вызывающие значительные экономические потери и трагические последствия с гибелью людей [10]. Причины сбоев, создающих аварийные и катастрофические ситуации при разработке месторождений под водными объектами, являются предметом исследований, результаты которых приведены в данной работе.

Сбои в предупреждении аварий и катастроф с прорывами вод в горные выработки обусловлены недостаточно точной оценкой устойчивости массива и сохранением водозащитных свойств налегающих пород. В обоих случаях устойчивые безопасные параметры систем разработки и ожидаемые деформации водозащитной толщи определяются исходя из двух факторов – свойств массива горных пород и напряженно-деформированного состояния вмещающего массива. Прогнозные оценки и проектные решения по обеспечению устойчивости горных выработок основываются, как правило, на однородном, стабильном во времени напряженном состоянии со среднезвешенными параметрами напряжений, формируемыми весом налегающих пород. В лучшем случае, при наличии натурных исследований, учитываются дополнительные, чаще всего, горизонтальные тектонические силы. Но принципиально во всех этих случаях напряженно-деформированное состояние принимается относительно однородным и неизменным во времени.

В действительности в массиве формируется неоднородная, мозаичная структура полей напряжений и деформаций и, что очень важно, нестабильная, изме-

няющаяся во времени [11]. Ее формирование происходит под воздействием двух основополагающих факторов: природной блочной иерархической структуры массива и подвижности блоков под воздействием геодинамики [12–13].

В результате несоответствия параметров очистных камер конкретным геомеханическим условиям возможно самообрушение налегающих пород с нарушением вышележащей водозащитной толщи. Примером подобной ситуации может служить разработка Соколовского железорудного месторождения в Казахстане.

Шахта Соколовская разрабатывает северный фланг Соколовского железорудного месторождения, на южном фланге которого действует одноименный карьер. Месторождение залегает под 120-метровой толщей рыхлых отложений, включающих два мощных водоносных горизонта. Для осушения месторождения в карьерном и шахтном полях были построены подземные кольцевые системы осушения, с помощью которых уровень подземных вод был частично понижен. Шахта проектировалась в 70-е гг. прошлого сто-

летия, когда свежа была память трагедии на руднике «Муфулира» Замбии [14]. Под ее влиянием на шахте дополнительно к подземной системе осушения, решившей частично проблему, была запроектирована система разработки с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями.

За период с 1975 по 1998 гг. работы шахты системой с закладкой было отработано 432 очистные камеры, из которых в 245 произошли самообрушения пород кровли и висячего бока. Самообрушения 44 камер, пройдя в трубообразной форме через оставленный скальный предохранительный целик и пронизав рыхлые отложения с водоносными горизонтами, вышли на земную поверхность, образовав воронки обрушения, заполненные водой (рис. 1). Происходящий процесс развития сдвижения горных пород, вызвавший прямой доступ грязевых масс из обводненной налегающей рыхлой толщи через образовавшуюся систему воронок обрушения в подземное пространство шахты, сделал бессмысленным дальнейшее применение систем разработки с закладкой.

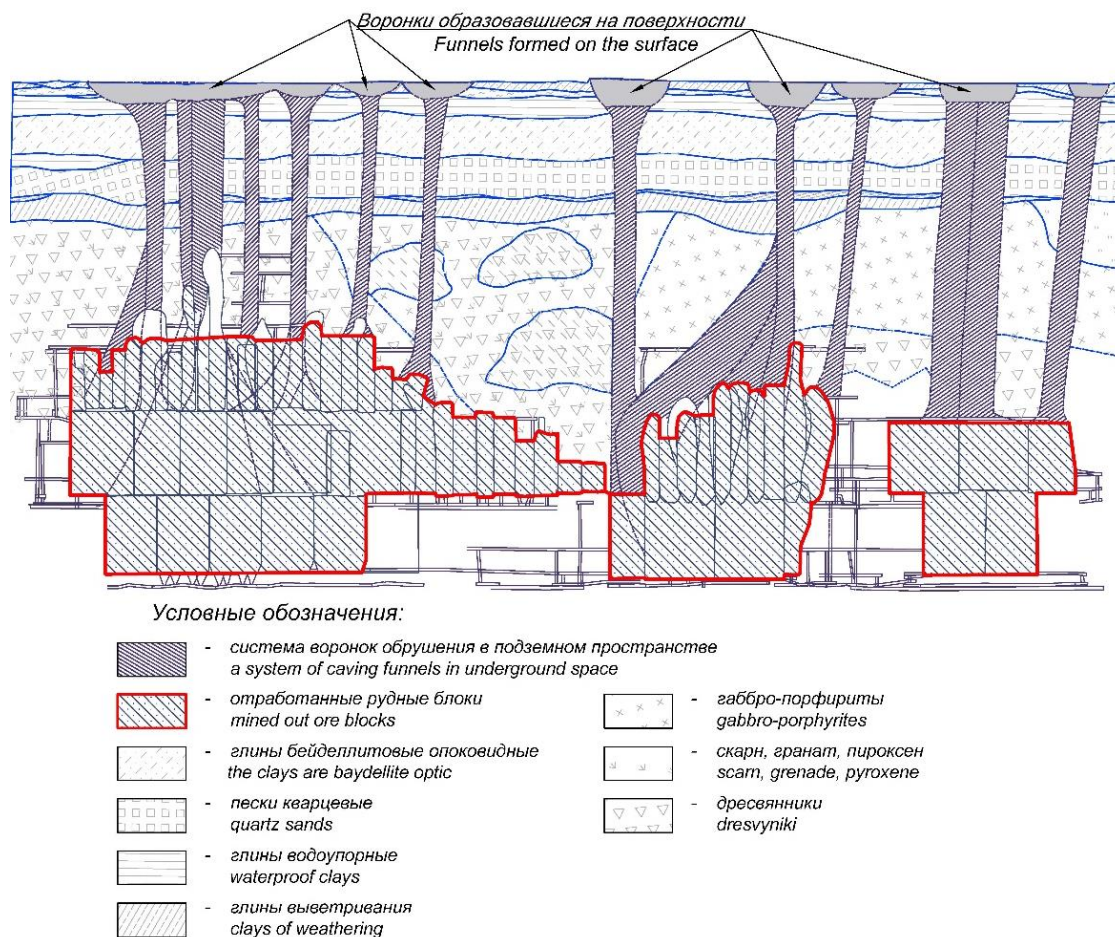


Рис. 1. Развитие воронок обрушения на ш. Соколовская
 Fig. 1. Development of caving funnels at Sokolovskaya mine

С 1998 г. шахта Соколовская перешла на системы разработки с обрушением налегающих пород. Начавшийся в период применения систем разработки с закладкой процесс объединения отдельных воронок обрушения в укрупненные зоны обрушения завер-

шился в 2005 г. прорывом в подземное пространство шахты грязевых масс. По разным оценкам, как отмечено выше, их объем составил 150–300 тысяч кубических метров, что привело к гибели двух человек. На 7 месяцев все работы на шахте были приостановлены.

Непосредственная причина, вызвавшая прорыв обводненных рыхлых пород в виде селевой массы в шахту, очевидна – нарушение процессом сдвижения, конкретнее процессом воронкообразования, водозащитной толщи с установлением прямой связи водоносных горизонтов и рыхлых пород покрывающей толщи с подземным пространством шахты. А выяснение причины развития столь многочисленных самообрушений в очистных камерах до их закладки и причины нетипичного развития воронок обрушения в специфичной трубообразной форме с глубин около 300 м потребовало специальных научных исследований [15].

Проведенные ИГД УрО РАН исследования позволили выдвинуть версию, что основу сложившейся катастрофической ситуации создала неоднородная мозаичная структура напряженно-деформированного состояния массива, сформировавшаяся под воздействием геодинамических движений, которая не была известна и не была учтена на стадиях проектирования, строительства и последующей эксплуатации шахты.

На рис. 2 представлено поле деформаций массива горных пород в районе месторождения в виде тензоров главных деформаций, построенное по результатам мониторинга современных геодинамических движений за период с 2012 по 2017 гг.

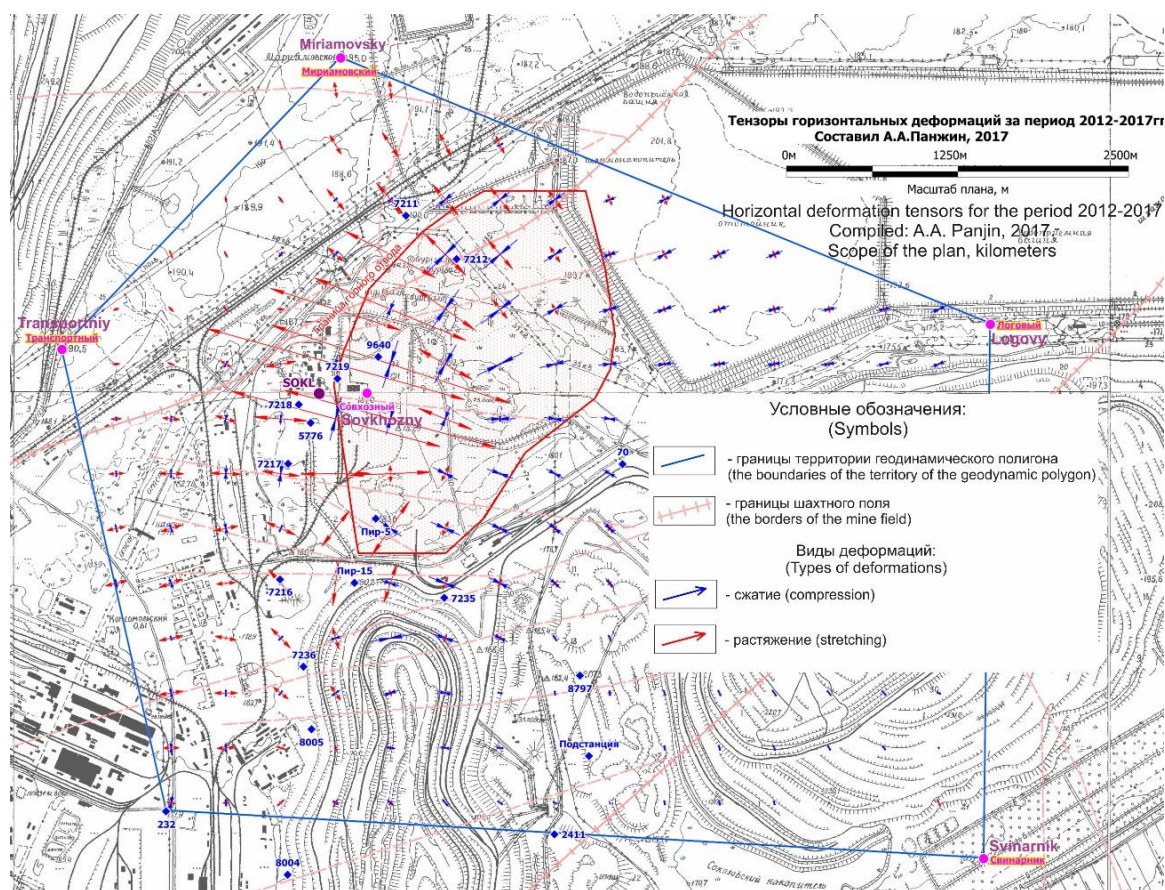


Рис. 2. Тензоры горизонтальных деформаций массива горных пород в районе шахты Соколовская за период с 2012 по 2017 гг.

Fig. 2. Tensors of horizontal deformation of the massif of rocks near Sokolovskaya mine for 2012–2017

Представленное деформационное поле массива, сформировавшееся под воздействием геодинамических движений, характеризуется тензором разнонаправленных главных деформаций – растяжения и сжатия [16]. Сочетание депрессии, вызванной растягивающими деформациями по одному из главных направлений, со сжимающими деформациями по второму главному направлению ведет к разуплотнению горных пород, раскрытию трещин, образованию сдвиговых деформаций и формированию обрушений. Депрессионное раскрытие трещин от нескольких до десятков сантиметров отмечалось в буровых скважинах эксплуатационной разведки очистных блоков. Повышенный уровень деформаций обоих видов осо-

бенно характерен для участка, примыкающего к границе шахтного поля со стороны восстания рудной пачки, в области начала и современного этапа разработки месторождения, чем объясняется повышенная распространенность самообрушений.

Взаимосвязь аномального развития процесса сдвижения с депрессионными зонами, формируемыми современными геодинамическими движениями, установлена при разработке Южной залежи (ш. Северопесчанская), где от разработки очистной камеры размером около 50×50×50 м на глубине 400 м, вопреки коэффициентам разрыхления, на поверхности образовалась зона обрушения, объем которой превышал объем отработанной камеры.

Примечательны в этом плане аварии, происшедшие на шахте Магнетитовая Высокогорского ГОКа. 01.10.2009 г. в районе шахтного поля произошло техногенное землетрясение магнитудой 2,3 балла, которое инициировало процесс проседания территории грузовой железнодорожной станции ГОКа, не попадавшей в зону непосредственной подработки. Максимальная величина оседания за счет уплотнения массива в депрессионной зоне, вызвавшая искривление и разрушение всех станционных железнодорожных путей и прилегающих промышленных зданий, составила 1,3 м. Через месяц – 01.11.2009 г. – из соседнего отработанного карьера в шахту прорвались флотационные хвосты обогатителя, которые сбрасывались в него в течение нескольких лет. Прорвавшиеся хвосты полностью затопили нижний подготавливаемый этаж, отодвинув срок ввода его в эксплуатацию. Исследования показали, что прорыв хвостов был обусловлен нарушением водозащитных свойств разделительного целика между карьером и шахтой современными геодинамическими движениями, сопровождавшими сейсмическое событие.

Таким образом, приведенные примеры свидетельствуют, что одним из важнейших факторов, вызывающих развитие аварийных ситуаций прорыва водных объектов в шахты, являются современные геодинамические движения, формирующие неоднородное мозаичное поле напряжений в массиве, препятствующее сохранению целостности водозащитных массивов [17].

Методы исследования

Решение проблемы защиты горных выработок от прорыва водных объектов основывается на сохранении свойств водозащитной толщи, отделяющей горные выработки от водных объектов. Эта задача требует четкого соответствия параметров очистных работ на конкретных участках месторождения реальным геомеханическим условиям, особенно параметрам напряженно-деформированного состояния, формируемого современными геодинамическими движениями [18].

Исследование и мониторинг напряженно-деформированного состояния производится поэтапно. На первом этапе создается геодинамический полигон, геодезические пункты которого охватывают изучаемую территорию залегания месторождения. В состав полигона целесообразно включать, при наличии, постоянно действующие станции GNSS, что позволяет оценить ретроспективно развитие напряженно-деформированного состояния за некоторый предшествующий период [19–22].

На втором этапе на созданном полигоне с заданной периодичностью определяются текущие координаты геодезических пунктов методом спутникового позиционирования двухчастотными приемниками геодезического класса. Приращенные координаты геодезических пунктов между циклами измерений представляют собой их трендовые движения.

Третий этап посвящается интерпретации инструментальных измерений текущих координат геодези-

ческих пунктов. Деформации интервалов между геодезическими пунктами, обусловленные взаимными приращениями координат, с использованием аппарата механики сплошной среды и метода конечных элементов преобразуются и визуализируются в деформационные поля.

Объект исследования

Предлагаемый подход к предотвращению опасности прорыва подземных вод в шахтные пространства применен к будущим рудникам по разработке Еланского и Ёлкинского полиметаллических месторождений, находящихся в стадии освоения. Еланское и Ёлкинское месторождения представляют собой типичный пример месторождений, залегающих под мощной осадочной толщей, вмещающей несколько водоносных горизонтов.

Объекты находятся на юго-восточном склоне Воронежского кристаллического массива, имеющего ярко выраженное двухъярусное строение. Скальный кристаллический фундамент сложен крепкими (коэффициент крепости по шкале Протодяконова 15–16) и устойчивыми породами, а осадочный чехол мощностью 200–250 м представлен девонскими, меловыми, палеогеновыми, неогеновыми и четвертичными отложениями [23].

Гидрогеологические условия на участке Еланского и Ёлкинского месторождений схожи и в общем плане определяются их расположением в пределах Приволжско-Хоперского артезианского бассейна. На участке месторождений сформирована единая гидравлическая система, состоящая из водоносных, слабодонных, слабоупорных и упорных горизонтов и комплексов. Еланское месторождение, при мощности осадочной толщи 250 м, вмещает в себе 10 водоносных горизонтов с максимальным дебитом до 3,9 л/с. Ёлкинское месторождение представлено 200 м осадочной толщи, которая вмещает в себе 7 водоносных горизонтов с максимальным дебитом до 3,3 л/с (рис. 3).

Верховодка, донской водно-ледниковый и средневерхнечетвертичный аллювиальные и неогеновый терригенный горизонты (неоген-четвертичный водоносный комплекс) находятся в верхней части общей гидравлической системы. Подземные воды здесь имеют как свободную поверхность, так и, в связи с наличием в кровле глинистых прослоев и линз, местные напоры величиной 2,2–13,4 м; глубина залегания уровня подземных вод изменяется от 10 до 50 м.

Водовмещающие породы представлены разнородными песками, иногда глинистыми, суглинками. Мощность всего комплекса на участке работ составляет 120,7 м.

Разгрузка в естественных условиях осуществляется в долину рек Елань.

Питание водоносного комплекса осуществляется за счёт инфильтрации атмосферных осадков и талых вод. Дополнительное питание происходит за счёт подтока из напорных горизонтов верхнего девона.

В основании неогеново-четвертичного комплекса залегают аргиллитоподобные глины верхнего девона.

Воды неогеново-четвертичного комплекса являются основными для эксплуатации на территории своего распространения. Наиболее водообильным является неогеновый терригенный горизонт. Водопроницаемость составляет $326 \text{ м}^3/\text{сут}$.

Водовмещающими породами являются песчаники, алевролиты, алевроиты.

Гидравлическая связь между горизонтами затруднена из-за наличия в составе водоносных комплексов и между ними водоупорных отложений – аргиллитоподобных глин.

Среди водоупорных пород имеются проницаемые «окна», через которые воды девонской системы имеют гидравлическую связь с подземными водами неогеново-четвертичного комплекса и нижележащей трещиноватой зоной кристаллических пород архей-протерозоя.

Фундамент Воронежского кристаллического массива, вмещающий Еланское и Елкинские месторождения,

нарушен многочисленными тектоническими разломами, которые играют основную роль в формировании структуры осадочного чехла и в особенностях минерализации территории. Их активность влияет на сейсмичность региона, а также на развитие экзогенных геологических процессов [24].

На современном этапе освоения месторождений прогнозная оценка геомеханических условий разработки с позиций влияния современных геодинамических движений на формирование напряженно-деформированного состояния вмещающего массива и опасность прорыва подземных вод в шахтные пространства произведена на региональном уровне, охватывающем территорию с размерами около $200 \times 250 \text{ км}$, но необходима детализация исследований на уровне района залегания месторождений и шахтных полей.

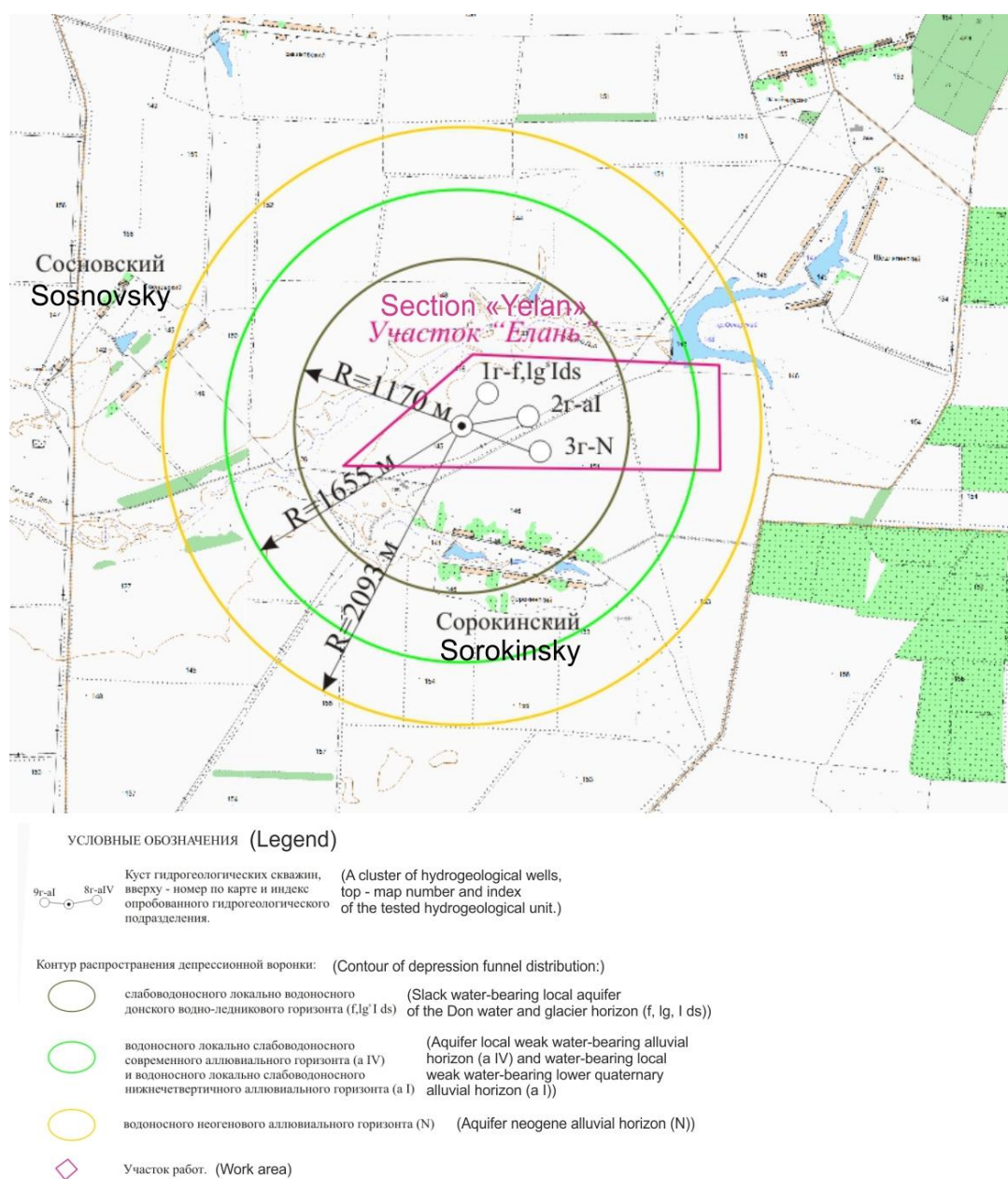


Рис. 3. Карта распространения депрессионной воронки Еланского месторождения
Fig. 3. Map of distribution of depression funnel at Elansky deposit

Результаты исследования

Исследования осуществлялись с использованием данных мониторинга деформационных процессов, проводимых действующими станциями GNSS на территории исследуемого региона (табл. 1). Для каждого пункта геодинамического полигона определены годовые современные геодинамические движения по трем направлениям – по широте, долготе и высоте. На их основе определялись полные вектора движения в горизонтальной плоскости (2D) и в пространстве (3D).

Векторы трендовых движений пунктов совместно с тектоническим строением региона представлены на рис. 4. Направления и величины векторов характеризуются однородностью и имеют преимущественно восточное направление, что соответствует смещению региона в целом.

Из общей согласованной картины смещений и по величине, и по направленности выделяются вектора смещений пунктов BTRL и KLCH, находящиеся в структурном тектоническом блоке между глубинными разломами Алексеевско-Александровским и Шулиминско-Новохоперским. В данном блоке находится эпицентр сейсмического события магнитудой 3,9 баллов, происшедшего в 2000 г., и располагаются Еланское и Ёлкинское месторождения. Также в нем зафиксированы максимальные вертикальные поднятия, составляющие более 30 мм, которые приурочены к району пункта BTRL. Исследуемые месторождения находятся в зоне, где значения вертикальных поднятий близки к максимальным и составляют около 26 мм.

Таблица 1. Координаты пунктов GNSS и результаты определения параметров современных геодинамических движений

Table 1. Coordinates of GNSS points and results of modern geodynamic movements parameters determination

Станция GNSS GNSS Station	Координаты станции Station coordinates		Геодинамические движения, мм/год Geodynamic movements, mm/year				
	B (широта) B (latitude)	L (долгота) L (longitude)	ΔB	ΔL	ΔH	2D	3D
PESK	51°15'13"	42°27'25"	41,4	8,2	29,0	42,2	51,2
MIHA	50°04'49"	43°13'53"	18,8	19,6	15,2	27,2	31,1
PAVL	50°27'39"	40°05'55"	38,4	33,0	15,2	50,7	52,9
VRN3	51°55'07"	39°17'45"	0,0	45,3	16,6	45,3	48,3
ALKS	50°17'06"	42°11'21"	-6,0	31,4	13,8	31,9	34,8
ANNA	51°29'07"	40°25'21"	5,5	16,3	80,2	17,2	82,0
BTRL	50°50'09"	40°34'41"	17,1	71,1	34,6	73,1	80,9
ERTL	51°50'24"	40°46'53"	3,0	48,9	8,3	49,0	49,7
KLCH	50°25'22"	41°01'00"	11,5	36,8	16,6	38,5	42,0
LISK	50°58'21"	39°30'22"	-9,4	32,3	22,1	33,7	40,3
PRBD	50°44'56"	43°03'21"	3,0	37,5	27,7	37,6	46,7
TRKI	51°59'33"	43°16'19"	1,3	47,3	27,7	47,3	54,8
URPN	50°47'42"	42°00'22"	4,7	48,6	26,3	48,8	55,5
USMN	52°03'29"	39°44'43"	3,8	44,7	6,9	44,9	45,4
UVAR	51°59'10"	42°15'22"	5,5	42,7	23,5	43,1	49,1
VRN1	51°40'36"	39°10'13"	-3,4	34,5	31,8	34,6	47,0

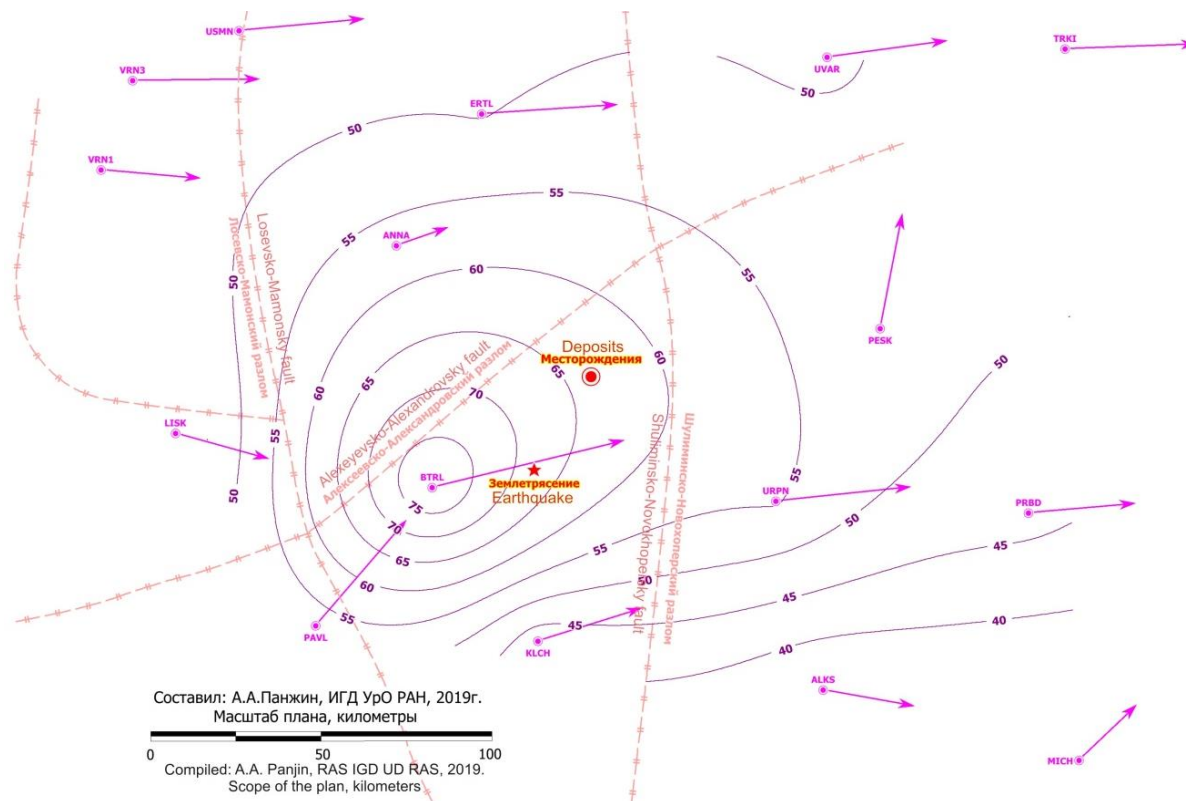


Рис. 4. Распределение векторов и изолиний полных пространственных смещений (3D) на территории исследуемого региона

Fig. 4. Distribution of vectors and isolines of full spatial displacements (3D) in the territory of the investigated region

Максимальные горизонтальные смещения в районе пункта BTRL составляют 73,1 мм, минимальные смещения зафиксированы в районе пункта ANNA со значением 17,2 мм. Район Еланского и Ёлкинского месторождений при имеющейся плотности геодезических пунктов находится в умеренной зоне с величинами горизонтальных смещений около 50 мм.

Результаты инструментальных измерений деформаций интервалов между геодезическими пунктами с использованием математического аппарата механики сплошной среды преобразованы в векторное и тензорное деформационное поле с выделением главных компонентов тензора деформаций [25]. На рис. 5 приведена совмещенная схема поля тензоров горизон-

тальных главных деформаций, показанная стрелками, а уровень сдвиговых деформаций представлен цветом.

Район размещения Еланского и Ёлкинского месторождений находится в умеренной зоне напряженно-деформированного состояния, но для него характерна разнонаправленность тензора деформаций. То есть в каждой точке действуют одновременно взаимно перпендикулярные сжимающие и растягивающие главные деформации, что приводит к развитию сдвиговых деформаций в массиве горных пород, отрицательно влияющих на устойчивость горных выработок, а также способствующих раскрытию естественных структурных нарушений массива горных пород и повышению его фильтрационных свойств [26].

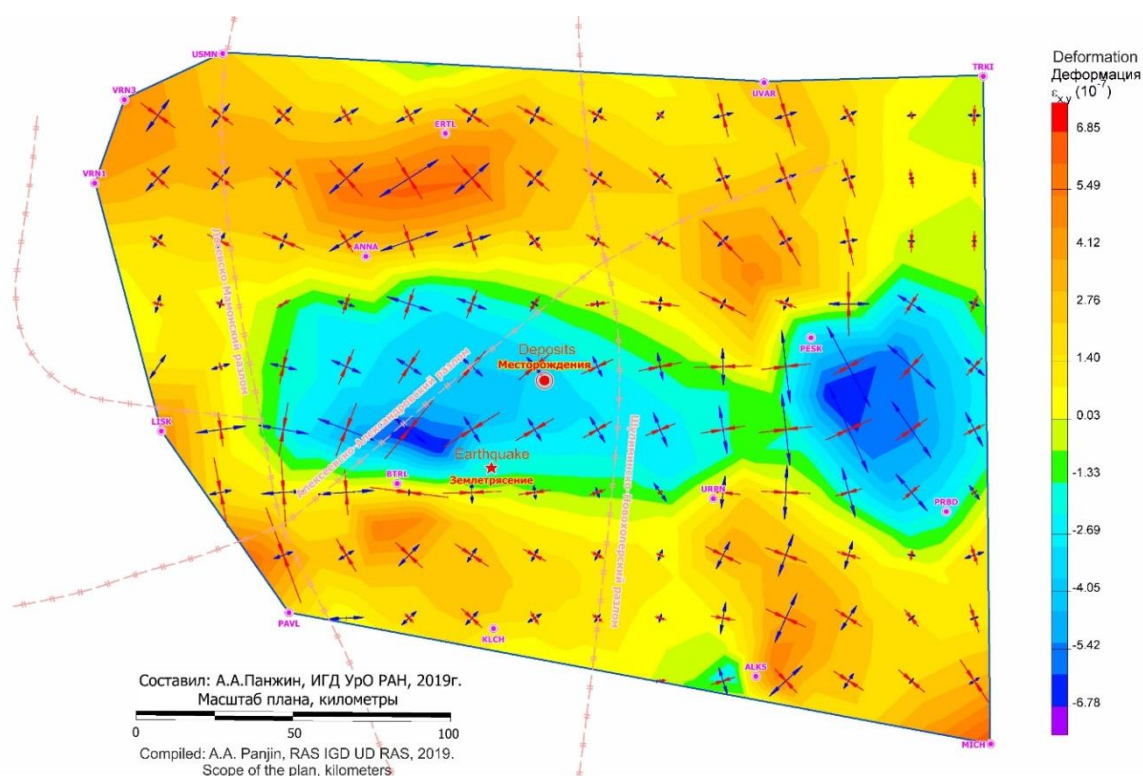


Рис. 5. Совмещенная схема поля тензоров горизонтальных главных деформаций и уровня сдвиговых деформаций
Fig. 5. Combined field diagram of horizontal main strain tensors and shear strain level

Выводы и заключение

- Результаты исследования взаимосвязи современных геодинамических движений с опасностью прорыва водных объектов в горные выработки при разработке месторождений в сложных гидрогеологических условиях свидетельствуют:
- подземная разработка месторождений в сложных гидрогеологических условиях, создающая опасность аварийных и катастрофических прорывов вод в горные выработки, весьма распространена в горной практике, и проблема их предотвращения сохраняет актуальность на протяжении всей истории горного дела;
- известные способы предотвращения опасности прорыва вод в горные выработки путем закладки выработанного пространства и поддержания налегающей толщи целиками при назначении и при-

менении параметров очистных работ без учета формирования фактического поля напряжений образованного в результате воздействия геодинамических движений, как правило, сопровождаются аварийными и, нередко катастрофическими, прорывами вод;

- повышение надежности применяемых способов предотвращения опасности прорывов вод в горные выработки, во многих случаях оправдывающих себя и не имеющих альтернативы, требует проведения специальных исследований формирования реального напряженно-деформированного состояния и учета его параметров при проектировании и ведении очистных работ, что необходимо закрепить в нормативных документах.

Работа выполнена в ходе реализации государственного задания по теме № 0405-2019-0007.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Modeling rock fracture propagation and water inrush mechanisms in underground coal mine / S. Zhang, B. Shen, Y. Li, S. Zhou // *GeoFluids*. – 2019. – V. 1. – P. 1–15.
2. Барях А.А., Красноштейн А.Е., Санфиринов И.А. Горнотехнические аварии: затопление первого Березниковского калийного рудника // *Вестник Пермского научного центра УрО РАН*. – 2009. – № 2. – С. 40–49.
3. Батрак Г.И. Закономерности формирования гидродинамического режима затопляемых шахт // *Мониторинг. Наука и технологии*. – 2018. – № 4 (37). – С. 41–46.
4. Problems with the application of hydrogeological science to regulation of Australian mining projects: Carmichael Mine and Doongmabulla Springs / M.J. Currell, A.D. Werner, C. McGrath, J.A. Webb, M. Berkman // *Journal of Hydrology*. – 2017. – V. 548. – P. 674–682.
5. Strack O.D.L. Vertically integrated flow in stratified aquifers // *Journal of Hydrology*. – 2017. – V. 548. – P. 794–800.
6. Костарев А.П., Митишова Н.А. Повышение эффективности мер предупреждения прорывов воды на угольных шахтах // *Безопасность труда в промышленности*. – 2000. – № 1. – С. 35–39.
7. Мохов А.В., Калинин В.М., Фролов А.В. Анализ причин и механизма прорыва воды в шахту «Западная» ООО Компания «Ростовуголь» // *Безопасность труда в промышленности*. – 2005. – № 11. – С. 11–16.
8. Усанов С.В., Крутиков А.В., Мельник Д.Е. Обеспечение промышленной безопасности при разработке Соколовского железорудного месторождения подземным способом в условиях обводненной налегающей толщи // *Проблемы недропользования*. – 2018. – № 4 (19). – С. 82–89.
9. Головачев Н.К. Катастрофа на руднике «Муфулира» // *Горный журнал*. – 1971. – № 11. – С. 74–76.
10. Шокин Ю.П. О нарушениях сплошности подработанной водозащитной толщи на калийных рудниках // *Горный журнал*. – 2019. – № 1. – С. 70–75.
11. Сашурин А.Д. Геомеханика в горном деле: фундаментальные и прикладные исследования // *Горный журнал*. – 2012. – № 1. – С. 29–32.
12. Садовский М.А. Иерархия от пылинок до планет // *Земля и Вселенная*. – 1984. – № 6. – С. 4–9.
13. Innovative approaches to rock mass stability in mining high-grade quartz veins / A.D. Sashurin, A.A. Panzhin, T.F. Kharisov, D.Yu. Knyazev // *Eurasian Mining*. – 2016. – V. 2. – P. 3–5.
14. Investigation of rockburst in deep underground mines, a case study of Mufulira mine, Copperbelt, Zambia / P. Sinkala, M. Nishihara, Y. Fujii, D. Fukuda, J. Kodama, E. Chanda // *53rd U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. – New York City, USA, 2019. – P. 19–26.
15. Ефремов Е.Ю. Анализ источников водного питания прорывов глинистых отложений в горные выработки Соколовского месторождения // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2020. – № 3-1. – С. 56–67.
16. Балец А.Е. Учет мозаичности напряженно-деформированного состояния массивов скальных горных пород при решении практических задач недропользования // *Проблемы недропользования*. – 2018. – № 3 (18). – С. 140–150.
17. Сашурин А.Д., Панжин А.А. Современные проблемы и задачи геомеханики // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2020. – № 3-1. – С. 188–198.
18. Risk assessment of floor water inrush in coal mines based on secondary fuzzy comprehensive evaluation / Y. Wang, W. Yang, M. Li, X. Liu // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2012. – V. 52. – P. 50–55.
19. Prokos A., Roumpos C. Ground deformation monitoring techniques at continuous surface lignite mines // *4th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM)*. – Athens, Greece, 2019. – P. 98–99.
20. Deformation monitoring and prediction for residential areas in the Panji mining area based on an InSAR time series analysis and the GM-SVR model / Jinchao Li, Fei Gao, Jiaguo Lu, Tingye Tao // *Open Geosciences*. – 2019. – V. 11 (1). – P. 738–749.
21. Huang J., Khan S.D., Ghulam A. Study of subsidence and earthquake swarms in the Western Pakistan // *Remote Sensing*. – 2016. – V. 8 (11). – P. 1–17.
22. Szczerbowski Z. Mining induced seismic events and surface deformations monitored by GPS permanent stations // *Acta Geodynamica Et Geomaterialia*. – 2015. – V. 12 (3). – P. 237–248.
23. Терентьев Р.А. Никеленосный Еланский комплекс Воронежского кристаллического массива: состав и номенклатура пород // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. – 2020. – № 2. – С. 58–68.
24. Трегуб А.И., Шевцов Д.Е. Разломы в фундаменте восточной части Воронежского кристаллического массива по морфометрическим данным // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. – 2020. – № 1. – С. 30–38.
25. Мазуров Б.Т., Панжин А.А., Силаева А.А. Структурное моделирование полученных по геодезическим данным смещений путем визуализации // *Геодезия и картография*. – 2016. – № 3. – С. 35–40.
26. Shen B., Siren T., Rinne M. Modelling fracture propagation in anisotropic rock mass // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2015. – V. 48. – № 3. – P. 1067–1081.

Поступила 19.04.2021 г.

Информация об авторах

Сашурин А.Д., доктор технических наук, ведущий научный сотрудник отдела геомеханики, Институт горного дела УрО РАН.

Панжин А.А., кандидат технических наук, ученый секретарь Института горного дела УрО РАН.

Харисов Т.Ф., кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геомеханики подземных сооружений Института горного дела УрО РАН.

UDC 622.831:622.274

ROLE OF GEODYNAMIC MOVEMENTS IN WATER BREAKTHROUGHS INTO WORKINGS AT EXPLORATION UNDER DIFFICULT HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS

Anatoliy D. Sashurin¹,
sashour@igd.uran.ru

Andrey A. Panzhin¹,
andrey.panzhin@gmail.com

Timur F. Kharisov¹,
timur-ne@mail.ru

¹ Institute of Mining of Ural Branch of RAS,
58, Mamin-Sibiryak street, Ekaterinburg, 620075, Russia.

Relevance of the study is conditioned by wide spread problem of prevention of water mass breakthroughs into underground mine workings, successful solution of which in many respects determines the efficiency and safety of exploration.

The aim of the research is to study the interrelation of modern geodynamic movements with danger of water objects breakthrough into mine workings during development of deposits in difficult hydrogeological conditions.

Object: massif of deposits in difficult hydrogeological conditions, located under a powerful sedimentary stratum containing several aquifers.

Methods: analytical, satellite positioning with dual-frequency GPS geodetic receivers, computer simulation of vector and tensor deformation field.

Results. Based on the analysis of occurred emergency situations related to water breakthroughs at the mines, their causes and methods of prevention, it was found that one of the most important factors causing a breakthrough of water bodies are modern geodynamic movements that form a heterogeneous mosaic stress-strain state in the rock mass, which prevents the preservation of the integrity of water-protective massifs. The known methods to prevent the danger of water breakthrough in the rock by laying the depleted space and maintaining the overlying thickness of the whole, the appointment and application of parameters of treatment works without taking into account the formation of real tensely-deformed state under the influence of modern geodynamic movements are usually accompanied by accidents. As recommendations for prevention of water breakthroughs into the mine workings the method of studying modern geodynamic movements and the stress-strain state formed by them was presented and tested on the example of the massif Elanskoe and Elkinskoe polymetallic deposits. The vectors of trend movements of points together with the tectonic structure of the investigated region are established. Maximum vertical rises and maximum horizontal displacements were fixed. The obtained results of measurements using mathematical apparatus of solid medium mechanics were transformed into vectorial and tensor representation of deformation field with selection of main components of deformation tensor.

Conclusions. The studied array is located in the temperate zone of stress-strain state with a characteristic multi-directionality of the deformation tensor, which leads to the development of shear deformations in an array of rocks, adversely affecting the stability of rock workings, as well as contributing to the disclosure of natural structural disorders of the array of rocks and improvement of its filtration properties. Increase of reliability of applied methods for preventing the danger of water breakthroughs into mine workings demands carrying out of special researches of formation of a real tensely-deformed condition and consideration of its parameters at designing and conducting clearing works.

Key words:

Water breakthroughs, complex hydrogeological conditions, water bodies, mine flooding, geodynamics, deformation tensor, stress-strain state.

The work was carried out in the course of the state task no. 0405-2019-0007.

REFERENCES

- Zhang S., Shen B., Li Y., Zhou S. Modeling rock fracture propagation and water inrush mechanisms in underground coal mine. *Geofluids*, 2019, vol. 1, pp. 1–15.
- Baryakh A.A., Krasnoshtein A.E., Sanfirov I.A. Gornotekhnicheskie avarii: zatoplenie pervogo Bereznikovskogo kaliynogo rudnika [Mining accidents: the flooding of the first Bereznikovskiy potash mine]. *Vestnik Permskogo nauchnogo centra UrO RAN*, 2009, no. 2, pp. 40–49.
- Batrak G.I. Regularities of formation of the hydrodynamic regime of the flooded mines. *Monitoring. Science and technologies*, 2018, vol. 4, no. 37, pp. 41–46. In Rus.
- Currell M.J., Werner A.D., McGrath C., Webb J.A., Berkman M. Problems with the application of hydrogeological science to regulation of Australian mining projects: Carmichael Mine and Doongmabulla Springs. *Journal of Hydrology*, 2017, vol. 548, pp. 674–682.
- Strack O.D.L. Vertically integrated flow in stratified aquifers. *Journal of Hydrology*, 2017, vol. 548, pp. 794–800.
- Kostarev A.P., Mitishova N.A. Povyshenie effektivnosti mer preduprezhdeniya proryvov vody na ugolnykh shakhtakh [Increase of efficiency of the water breakthrough prevention measures at the coal mines]. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*, 2000, no. 1, pp. 35–39.
- Mokhov A.V., Kalinchenko V.M., Frolov A.V. Analiz prichin i mekhanizma proryva vody v shahtu «Zapadnaya» OOO Kompaniya «Rostovugol» [The analysis of the reasons and the mechanism of the water breakthrough into the «Zapadnaya» mine, LLC Company «Rostovugol»]. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*, 2005, no. 11, pp. 11–16.
- Usanov S.V., Krutikov A.V., Mel'nik, D.E. Industrial safety maintenance at development of the Sokolovskiy iron-ore deposit by underground method in the conditions of the waterlogged imposed thickness. *Subsurface Exploitation Issues*, 2018, vol. 4, no. 19, pp. 82–89. In Rus.

9. Golovachev N.K. Katastrofa na rudnike «Mufulira» [Disaster at Mufulira mine]. *Gornyi Zhurnal*, 1971, no. 11, pp. 74–76.
10. Shokin Yu.P. About the continuity violations of the processed waterproof thickness at the potash mines. *Gornyi Zhurnal*, 2019, no. 1, pp. 70–75. In Rus.
11. Sashurin A. D. Geomechanics in mining: fundamental and applied research. *Gornyi Zhurnal*, 2012, no. 1, pp. 29–32. In Rus.
12. Sadovsky M.A. Ierarkhiya ot pylinok do planet [Hierarchy from dust to planets]. *Zemlya i Vseleennaya*, 1984, no. 6, pp. 4–9.
13. Sashurin A.D., Panzhin A.A., Kharisov T.F., Knyazev D.Yu. Innovative approaches to rock mass stability in mining high-grade quartz veins. *Eurasian Mining*, 2016, vol. 2, pp. 3–5.
14. Sinkala P., Nishihara M., Fujii Y., Fukuda D., Kodama J., Chanda E. Investigation of rockburst in deep underground mines, a case study of Mufulira mine, Copperbelt, Zambia. *53rd U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. New York City, USA, 2019. pp. 19–26.
15. Efremov E.Yu. Analysis of the water supply sources for the clay deposit breakthroughs in the Sokolovskoye deposit mining. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2020, no. 3-1, pp. 56–67. In Rus.
16. Balek A.E. Mosaic of the stress-strain state of the rock masses at solution of the practical problems of the subsoil use. *Subsurface Exploitation Issues*, 2018, vol. 3, no. 18, pp. 140–150. In Rus.
17. Sashurin A.D., Panzhin A.A. Modern problems and problems of the geomechanics. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2020, no. 3-1, pp. 188–198. In Rus.
18. Wang Y., Yang W., Li M., Liu X. Risk assessment of floor water inrush in coal mines based on secondary fuzzy comprehensive evaluation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, vol. 52, pp. 50–55.
19. Prokos A., Roumpos C. Ground deformation monitoring techniques at continuous surface lignite mines. *4th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM)*. Athens, Greece, 2019. pp. 98–99.
20. Li J., Gao F., Lu J., Tao T. Deformation monitoring and prediction for residential areas in the Panji mining area based on an InSAR time series analysis and the GM-SVR model. *Open Geosciences*, 2019, vol. 11, no. 1, pp. 738–749.
21. Huang J., Khan S.D., Ghulam A. Study of subsidence and earthquake swarms in the Western Pakistan. *Remote Sensing*, 2016, vol. 8, no. 11, pp. 1–17.
22. Szczerbowski Z. Mining induced seismic events and surface deformations monitored by GPS permanent stations. *Acta Geodynamica Et Geomaterialia*, 2015, vol. 12, no. 3, pp. 237–248.
23. Terentev R.A. The Nickeliferous Elan complex of the Voronezh crystalline massif: composition and nomenclature of the rocks. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2020, no. 2, pp. 58–68. In Rus.
24. Tregub A.I., Shevtsov D.E. Fractures in the foundation of the eastern part of the Voronezh crystalline massif on morphometric data. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2020, no. 1, pp. 30–38. In Rus.
25. Mazurov B.T., Panzhin A.A., Silayeva A.A. Structural modeling obtained by the geodesic given nym displacement by visualizing. *Geodesy and Cartography*, 2016, no. 3, pp. 35–40. In Rus.
26. Shen B., Siren T., Rinne M. Modelling fracture propagation in anisotropic rock mass. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, vol. 48, no. 3, pp. 1067–1081.

Received: 19 April 2021.

Information about the authors

Anatoliy D. Sashurin, Dr. Sc., leading researcher, Institute of Mining of Ural Branch of RAS.
Andrey A. Panzhin, Cand. Sc., scientific secretary, Institute of Mining of Ural Branch of RAS.
Timur F. Kharisov, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Mining of Ural Branch of RAS.

УДК 622.411

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТА ВОДЯНОЙ ПРОБКИ В ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СТВОЛАХ ШАХТ

Шалимов Андрей Владимирович¹,
shalimovav@mail.ru

Казаков Борис Петрович¹,
aero_kaz@mail.ru

Зайцев Артем Вячеславович¹,
aerolog.artem@gmail.com

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

Актуальность исследования обусловлена необходимостью снижения дополнительной нагрузки на главные вентиляторные установки, связанной с возникновением обратной тяги при капееже в вентиляционных стволах шахт и рудников. Наиболее остро проблема нормализации работы вентилятора возникает в случае возможного перехода его в режим неустойчивой работы, что сопряжено с необходимостью не только энергосбережения, но и предотвращения его аварийного останова.

Цель: выяснение причин и механизма возникновения эффекта «водяной пробки» в вентиляционных стволах с получением качественных и количественных оценок величины обратной тяги в зависимости от скорости движения воздуха, глубины и интенсивности источника выделения влаги.

Объекты: вентиляционные стволы шахт.

Методы: аналитическое моделирование процессов конденсации влаги и движения капель в восходящем воздушном потоке; сравнительный анализ экспериментальных и модельных данных.

Результаты. Проведён анализ экспериментальных данных по образованию и движению капельной влаги в вентиляционных стволах различных рудников. Отмечено, что эффект водяной пробки наблюдается в ограниченном диапазоне скоростей движения воздуха от 7 до 12 м/с, но в некоторых случаях эффект отсутствует, даже несмотря на наличие густого тумана и обильной конденсации влаги на поверхности крепи и армировки ствола. Рассмотрены три возможных сценария возникновения эффекта: накопление большого количества зависающих в воздухе капель определённого размера; падение капель крупных размеров по всей глубине ствола с источником выделения влаги в его верхней части и разнонаправленное движение капель в зависимости от их размера с источником влаговыделения, расположенным на произвольной глубине. Установлено, что первые две модели не позволяют получить количественную оценку величины эффекта ввиду неопределённости фракционного состава капель, критический размер зависания которых увеличивает обратную тягу до бесконечности. Этот недостаток устранён в третьей модели введением функции распределения капель по размерам, что дало возможность получить количественные результаты. Доказано, что выделение влаги из воздуха не может являться причиной возникновения эффекта «водяной пробки», а причиной являются водопритоки в ствол с интенсивностью, на порядок превышающей конденсацию. По результатам численного моделирования показано, что максимальная обратная тяга возникает при проникновении в ствол поверхностных грунтовых вод.

Ключевые слова:

Рудничная вентиляция, конденсация влаги, гидростатическое охлаждение, водопритоки, депрессия, аэродинамическое сопротивление, естественная тяга, фракционный состав.

Введение

Естественная тяга в рудниках возникает в результате действия трёх факторов – ветра, разности плотностей воздуха и капеежа в стволах, влияние которых на проветривание может быть сильным или слабым в зависимости от условий. Воздействие естественной тяги может быть положительным и улучшать вентиляцию или отрицательным и препятствовать движению воздуха через рудник под действием депрессии главной вентиляторной установки, в случае же её отклонения конвективное движение воздуха становится неустойчивым по направлению и интенсивности [1–3]. Влияние ветра на проветривание наблюдается в карьерах [4], туннелях [5] и подземных горнодобывающих предприятиях с горизонтальными стволами – штольнями. Основной, широко распространённой и хорошо изученной [6] причиной возникновения естественной тяги в рудниках с вертикальными стволами является

разность плотностей воздуха, обусловленная главным образом разными значениями его температуры в воздухоподающих и вентиляционных стволах. Явление капеежа в шахтных стволах изучено в значительно меньшей степени [7], встречается реже и, как правило, оказывает более слабое влияние на проветривание. Однако в некоторых случаях чрезмерное скопление влаги в вентиляционном стволе приводит к аварийной ситуации, связанной с возникновением сильной обратной тяги, результатом чего является выход вентилятора из-за перегрузки на режим неустойчивого проветривания в область помпажа [8], что недопустимо правилами безопасности.

В условиях высокой влажности восходящего воздушного потока может возникать такое опасное явление, как Бланкет-эффект, или эффект «водяной пробки», суть которого связывается многими авторами с водопритоками и конденсацией избыточной влаги из

воздуха с её постепенным накоплением в стволе [9–13]. На практике это выражается в появлении в вентиляционных стволах густого тумана, снижении расхода воздуха, увеличении депрессии вентилятора и последующем его аварийном отключении. В [10, 14] указывается, что обратная тяга возникает в вентиляционных стволах шахт в интервале скоростей движения воздуха 7–12 м/с. По данным [10] Бланкет-эффект впервые был обнаружен в 1950-х гг. в связи с ситуацией в вентиляционном стволе одной из шахт в г. Вал-Риф в ЮАР, которая проветривалась всасывающим способом с помощью главной вентиляторной установки, состоящей из двух вентиляторов, работающих в параллели. Вентиляционный ствол шахты имел избыточную влажность из-за наличия трещин в крепи ствола с обильными водопритоками из окружающих водоносных горизонтов вблизи дневной поверхности. В стволе была предусмотрена система от-

качки воды на поверхность по трубопроводу, и когда трубопровод или насос оказывались неисправными, вода лилась в ствол, в результате чего образовывался сильный туман и перепад давлений на вентиляторах значительно возрастал. Проблема решалась выключением одного из вентиляторов, в результате чего скорость воздуха в стволе падала до 7 м/с, туман в стволе пропадал, и, как следствие, аэродинамическое сопротивление ствола уменьшалось. Один вентилятор продолжал работать до тех пор, пока не была устранена неисправность в системе откачки воды на поверхность, после чего включался второй. В работе [9] также описываются случаи, когда поверхностные вентиляторные установки в условиях высокой влажности воздуха в вентиляционных восстающих выработках переходили в нестабильный режим работы, который приводил к усталостным повреждениям конструкций.

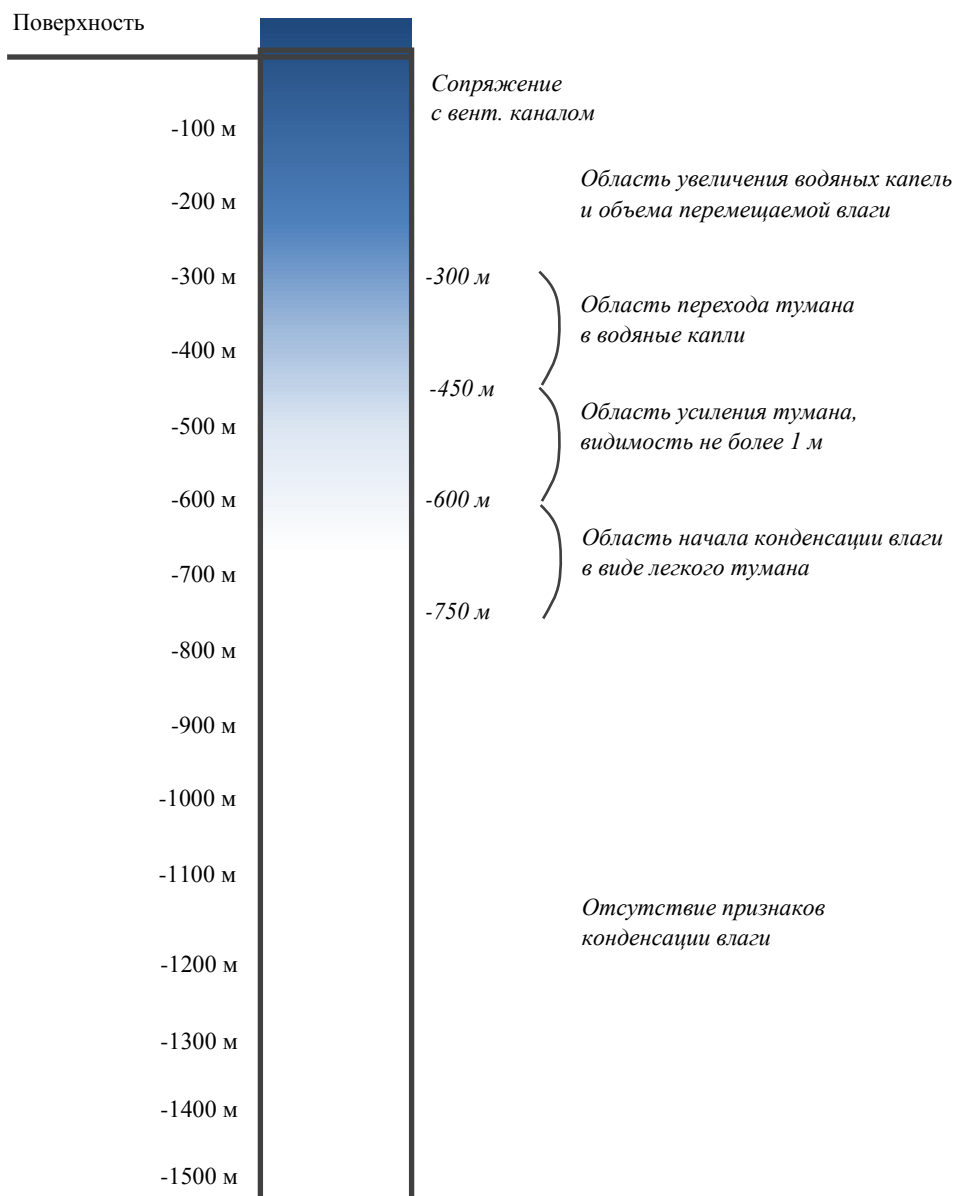


Рис. 1. Процесс конденсации влаги в стволе ВС-7
Fig. 1. Moisture condensation in the VS-7 mine shaft

Аналогичная ситуация имела место в вентиляционном стволе ВС-6 рудника Таймырский ОАО «ГМК "Норильский никель"». В 2011–2013 гг. сотрудники Горного института УрО РАН проводили исследования системы вентиляции этого рудника, по результатам которых было установлено, что во время проведения замеров расход главной вентиляционной установки ВЦД-47 «Север» снижался, а ее депрессия возрастала. Были проведены также детальные обследования вентиляционных стволов ВС-3, ВС-4, ВС-6 и ВС-7 рудников Таймырский и Октябрьский ОАО «ГМК "Норильский никель"». В ходе обследования осуществлялся спуск–подъем на бабье по стволу от надшахтного здания до основных подземных горизонтов, и было установлено, что при движении воздуха вверх в какой-то момент в стволе начинает появляться туман. По мере продвижения вверх туман становился гуще, начинал конденсироваться на армировке ствола, наиболее густой туман наблюдался вверху ствола до сопряжения с вентиляционным каналом. Наряду с туманом были отмечены также процессы падения крупных капель влаги вниз и движения мелкодисперсной капельной влаги вверх вместе с воздушным потоком с последующим выносом в вентиляционный канал. На рис. 1 представлено схематичное отображение участков ствола ВС-7 с разделением по участкам конденсации влаги.

Движущийся по стволу ВС-7 воздух на сопряжениях с горизонтами имеет высокую влажность и температуру. В процессе движения происходит постепенное охлаждение воздуха и конденсация содержащейся в нем влаги. Начало процесса конденсации влаги происходит в интервале отметок от –750 до –600 м с образованием легкой туманности. По мере движения воздуха вверх по стволу и дальнейшего охлаждения туман становится гуще, и в интервале глубин от –450 до –300 м происходит образование водяных капель. Далее каплеобразование усиливается за счет слияния более мелких капель воды, часть влаги стекает по стенкам крепи в зумпф, а часть поднимается восходящим потоком воздуха и выносится в вентиляционный канал. Но следует отметить, что в стволе ВС-7, несмотря на признаки обильной конденсации влаги, эффекта «водяной пробки» обнаружено не было, что указывает на необходимость изучения эффекта не только с качественной, но и количественной стороны с рассмотрением всевозможных сценариев эффекта и оценкой влияния всех факторов его возникновения.

Ввиду недостаточного количества экспериментальной информации по условиям возникновения этого малоизученного эффекта наиболее целесообразным является разработка комплекса оценочных аналитических моделей, которые позволили бы в упрощенной форме смоделировать исследуемый процесс и выявить основные факторы, определяющие величину обратной тяги. В работе [15] представлена одна из таких моделей зависания и накопления в стволе капель при критической скорости движения воздуха ~9 м/с без учета зависимости скорости движения капель от их размеров. Представленные ниже

модели являются продолжением этой работы по исследованию эффекта водяной пробки с учетом фракционного состава капель.

Математическое моделирование Бланкет-эффекта в вентиляционном стволе

Сначала рассматривается наиболее очевидный сценарий возникновения дополнительной нагрузки на вентилятор. Влажный воздух поднимается по вентиляционному стволу, охлаждается, достигая точки росы. Влага выпадает в виде капель, которые в зависимости от соотношения их размеров и скорости движения воздуха падают, поднимаются или зависают на месте. Фракционный состав будет разным, но интерес представляет размер тех капель, которые будут оставаться на месте, поскольку именно они будут накапливаться и, как предполагаемый результат, создавать воздушную пробку, препятствующую прохождению воздушного потока. Оценить размер «зависших» капель можно, приравняв силу их лобового сопротивления воздушному потоку к силе тяжести [16]

$$k \frac{\rho_a \omega^2}{2} f = g \rho_w V, \quad (1)$$

ρ_a и ρ_w – плотности воздуха и воды, кг/м³; g – ускорение силы тяжести, м/с²; ω – скорость движения воздуха, м/с; $V = \frac{4}{3} \pi r^3$ – объём капли, м³; $f = \pi r^2$ – сечение капли по воздуху, м²; r – радиус капли, м; $k=0,4$ – коэффициент аэродинамического сопротивления шара при числе $Re=r\omega/\nu \sim 1000$, безр.; ν – кинематическая вязкость воздуха, м²/с.

При подстановке в (1) r выражается через ω

$$r = \frac{1}{5g} \frac{\rho_a}{\rho_w} \omega^2. \quad (2)$$

В диапазоне скоростей движения воздуха от 7 до 12 м/с критический размер $2r$ «зависающих» частиц изменяется от 2 до 6 мм, что согласуется с результатами метеорологических наблюдений за скоростью падения капель дождя в зависимости от их размеров [17].

Зная количество висящей в воздухе влаги в виде таких капель, можно записать баланс направленных в разные стороны общих сил тяжести и депрессии

$$Mg = S \Delta P, \quad (3)$$

$M = N \rho_w 4\pi r^3 / 3$ – общая масса «зависшей» в стволе влаги, кг; N – общее количество капель; S – сечение ствола, м²; $\Delta P = \Delta R (\omega S)^2$ – часть депрессии вентилятора, идущая на поддержание на весу всей массы капель M , Па; ΔR – аэродинамическое сопротивление капельной взвеси, кг/м⁷. Значит

$$\Delta R = \frac{Mg}{\omega^2 S^3}. \quad (4)$$

Оценить N можно исходя из предположения стационарности Бланкет-эффекта. Если предположить, что влага в стволе не накапливается, а постоянно обновляется за счёт конденсации из воздуха, то количество конденсируемой на «пробочном» участке влаги с

размером капель r должно быть равно количеству уходящей с участка влаги вниз или вверх с другими размерами капель. Значит, число образующихся для поддержания постоянного количества капель равно избыточному влагосодержанию воздуха $\Delta\eta$, кг/м³, при подъёме по стволу, отнесённому к массе одной капли

$$m_0 = \frac{4}{3}\pi\rho_w r^3, \text{ кг},$$

$$\frac{N}{SH} \sim \frac{\Delta\eta}{m_0}, \quad (5)$$

H – высота капельной пробки, м. При остывании воздуха 100%-й влажности на 5 °С ($\Delta\eta \sim 8 \cdot 10^{-3}$ кг/м³) при подъёме с глубины в 1 км для капель размером $2r=2$ мм их стационарная концентрация составит примерно 2000 шт/м³. При $H=500$ м и $S=60$ м² $M=SH\Delta\eta$ составит около 250 кг независимо от размера капель, что соответствует потере депрессии в 40 Па, а это на порядок меньше наблюдаемых значений. Таким образом, предположение (5) количественно эффект не объясняет, и, если сценарий зависания капель верен, должно происходить накопление влаги в стволе до концентраций, в 10 превышающих оценённые по предположению (5).

Возможно другое объяснение механизма возникновения дополнительного аэродинамического сопротивления, основанное не на накоплении и зависании капель в стволе. Избыточная влага в результате гидростатического охлаждения воздуха в верхней части ствола конденсируется, коагулирует в крупные капли и падает вниз. По всей глубине ствола идёт дождь, вызывающий за счёт трения капельную естественную тягу, направленную против депрессии вентилятора.

Зависимость (2) меняется с учётом того, что капли уже не висят в воздухе на одной высотной отметке, а падают вниз

$$r = \frac{1}{5g} \frac{\rho_a}{\rho_w} (\omega + \omega')^2, \quad (6)$$

ω – скорость движения воздуха относительно ствола, м/с; ω' – скорость движения капли относительно ствола, м/с.

Падающие вниз капли из-за сопротивления воздуха быстро набирают предельную скорость и двигаются вниз без ускорения. Поэтому зависимость (3) остаётся прежней в предположении стационарности процессов конденсации и выпадения влаги внизу ствола. Предполагается, что образующиеся мелкие капли быстро коагулируют, становятся тяжёлыми и не выносятся исходящим потоком, а только падают вниз

$$Mg = S\Delta P, \quad (7)$$

$M=Nm_0$ – общая масса находящейся в стволе в каждый момент времени капельной влаги, кг; N – общее количество капель в стволе в каждый момент времени; S – сечение ствола, м²; $\Delta P=\Delta R(\omega S)^2$ – часть депрессии вентилятора, идущая на преодоление сопротивления движению воздуха падающих капель, Па; ΔR – аэродинамическое сопротивление, в отличие от (4), не зависящей в стволе, а падающей капельной взвеси, кг/м⁷.

Стационарность процесса означает, что количество выпадающей в зумпф влаги должно быть равно количеству влаги, образующейся вверху в результате конденсации

$$\omega' n = \frac{\omega \Delta \eta}{m_0}, \quad (8)$$

где n – концентрация капель в воздухе, м⁻³, может быть выражена через ΔP из (7). В результате (8) и (6) образуют систему уравнений для нахождения ω' и r

$$\begin{cases} \frac{\omega' \Delta P}{gH} = \omega \Delta \eta; \\ (\omega' + \omega)^2 = 5rg \frac{\rho_w}{\rho_a}. \end{cases} \quad (9)$$

После исключения ω' из (9)

$$r = \frac{1}{5g} \frac{\rho_a}{\rho_w} \omega^2 \left(1 + \frac{gH\Delta\eta}{\Delta P} \right)^2. \quad (10)$$

Оценка r для $\omega=10$ м/с, $H=1$ км, $\Delta\eta=10$ г/м³ (соответствует гидростатическому охлаждению воздуха 100%-й влажности на 5 °С [18]) и $\Delta P=500$ Па даёт размер $r=3$ мм, соответствующий каплям крупного дождя [17]. Таким образом, второй вариант объяснения Бланкет-эффекта предпочтительнее, т. к. проще и не содержит неизвестного параметра – количества скопившейся висячей влаги. Кроме того, водопритоки в ствол могут быть учтены простой добавкой к $\Delta\eta$: $\Delta\eta+w/(\omega S)$, где w – скорость притока воды в ствол (кг/с). Подлежащим определению параметром является ΔP , поэтому (10) лучше переписать в виде

$$\Delta P = \frac{gH\Delta\eta}{\sqrt{\frac{\rho_w}{\rho_a} \frac{5gr}{\omega^2} - 1}}. \quad (11)$$

На первый взгляд зависимость (11) выглядит нелогично, т. к. при определённом соотношении параметров знаменатель становится нулевым или отрицательным. Но если вспомнить, что в модели принято, что капли падают вниз, а это возможно лишь при соблюдении неравенства $r > \frac{1}{5g} \frac{\rho_a}{\rho_w} \omega^2$, то противоречия нет.

Однако информационная польза результата (11) второй модели невелика, т. к. искомый параметр ΔP может быть получен сколь угодно большим в зависимости от размера капель r , являющегося неопределённой величиной, и при равенстве (2) дающий $\Delta P \rightarrow \infty$.

Этот недостаток аналитического моделирования можно устранить, если учесть, что капли образуются всех возможных размеров, не превышающих максимальный устойчивый [19]. Следует учесть также, что выделение влаги может происходить не только в верхней части ствола. По-прежнему принимается упрощение сосредоточенного источника влаги, только теперь он может находиться на любой высотной отметке h , м, отсчитываемой от поверхности (от 0 до H). Считается

также, что концентрация капель во всём объёме воздуха ствола в стационарном режиме распределена равномерно по массе, т. е. на каждую фракцию приходится одинаковая масса влаги по соображениям хаотичности образования, распада и слияния капель:

$$n(r)r^3 = A = \text{const}, \quad (12)$$

$n(r)$ – функция распределения концентрации капель по размерам, м^{-4} .

Поскольку источник влаги находится теперь не в верхней точке ствола, а на глубине h , то в создании дополнительного аэродинамического сопротивления ствола будут участвовать как падающие капли, так и восходящие, и падение давления ΔP из (3) будет иметь вид

$$\Delta P = \frac{4}{3} \pi \rho_w g \left[(H-h) \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} n(r)r^3 dr + h \int_0^{r_{\min}} n(r)r^3 dr \right], \quad (13)$$

здесь

$$r_{\min} = \frac{1}{5g} \frac{\rho_a}{\rho_w} \omega^2 \quad (14)$$

– критический радиус капли для такой скорости движения воздуха ω , при которой она зависает относительно ствола (падение сменяется подъёмом); $r_{\max} \geq r_{\min}$ – максимальный радиус устойчивости капли, выше которого капля разваливается потоком воздуха, м (по метеорологическим данным $r_{\max} = 3$ мм).

При «включении» источника выделения влаги процесс сначала имеет нестационарный характер – концентрация влаги в воздухе для всех размеров капель растёт. Но с ростом концентрации интенсивности падения крупных и выноса мелких капель увеличиваются, и наступает момент, когда общий вынос влаги из ствола становится равным выделению влаги $\Delta \eta$. С этого момента процесс влагообмена становится стационарным – сколько влаги выделяется, столько и выносятся

$$\omega \Delta \eta = \frac{4}{3} \pi \rho_w \int_0^{r_{\max}} \left| \sqrt{\frac{\rho_w}{\rho_a} 5gr} - \omega \right| n(r)r^3 dr. \quad (15)$$

Система уравнений (12), (13)–(15) достаточна для определения ΔP :

$$\Delta P = \frac{\frac{2}{3} g H \Delta \eta \left[\left(1 - \frac{h}{H}\right) \left(\frac{r_{\max}}{r_{\min}} - 1\right) + \frac{h}{H} \right]}{\left(\frac{r_{\max}}{r_{\min}}\right)^{3/2} - \frac{2}{3} \frac{r_{\max}}{r_{\min}} + 1}. \quad (16)$$

Определяющей зависимость ΔP от соотношений h/H и r_{\min}/r_{\max} является функция f , играющая роль безразмерного перепада давлений с единицей измерения $\frac{2}{3} g H \Delta \eta$,

$$f\left(\frac{r_{\max}}{r_{\min}}, \frac{h}{H}\right) = \frac{\left(1 - \frac{h}{H}\right) \left(\frac{r_{\max}}{r_{\min}} - 1\right) + \frac{h}{H}}{\left(\frac{r_{\max}}{r_{\min}}\right)^{3/2} - \frac{2}{3} \frac{r_{\max}}{r_{\min}} + 1}, \quad (17)$$

из вида которой можно заключить, что при $r_{\max} > 2r_{\min}$ (малая скорость движения воздуха) ΔP падает с увеличением h , а при $r_{\max} < 2r_{\min}$ (большая скорость движения воздуха) ΔP возрастает с увеличением h . Из анализа зависимости функции f (17) от переменных r_{\max}/r_{\min} и h/H следует (рис. 2), что у неё есть максимальное значение $f_{\max} = 0,75$ при $r_{\max}/r_{\min} = 1$ и $h/H = 1$, что соответствует выделению влаги в нижней точке ствола при максимальной скорости движения воздуха, обеспечивающей подъём всей образующейся влаги. При уменьшении глубины уровня влаговыделения h f_{\max} уменьшается с сохранением максимальной ω до значения $h/H \approx 0,6$, выше которого появляется экстремальный максимум с уменьшением значения ω . С дальнейшим уменьшением h величина экстремума растёт и достигает наибольшего значения $f \approx 0,48$ на поверхности ($h=0$) при скорости движения воздуха, соответствующей $r_{\max}/r_{\min} = 3,3$, которая всё же оказывается меньше краевого максимального значения функции $f_{\max} = 0,75$ для источника выделения влаги в нижней части ствола. Оценка величины ΔP по максимуму даёт значение приблизительно 40 Па, что как минимум в 10 раз меньше ожидаемого в соответствии с опытными данными.

Из результатов проведённого анализа следует вывод, что требуемое для возникновения эффекта «водяной пробки» выделение влаги $\Delta \eta$ происходит не из воздуха путём конденсации [20], а из грунтовых или поверхностных вод, причём в количестве, превышающем на порядок конденсационное выделение. Поэтому избыточное влагосодержание воздуха $\Delta \eta$ ($\text{кг}/\text{м}^3$), приводящее к выделению влаги на глубине h , должно быть заменено на $w/(vS)$, где w – скорость водоприток на глубине h , $\text{кг}/\text{с}$; v – скорость движения воздуха (в отличие от ω не ограниченный максимальным размером капли r_{\max}), $\text{м}/\text{с}$; S – сечение ствола, м^2 . Более информативной характеристикой в данном случае является зависимость ΔP от скорости движения воздуха, которую с учётом (14) также можно привести к безразмерной форме

$$\bar{\omega}^2 = \frac{r_{\min}}{r_{\max}} = \left(\frac{\omega}{\omega'}\right)^2,$$

где $\omega' = \sqrt{5g \frac{\rho_w}{\rho_a} r_{\max}} \approx 12$ – единица измерения скорости движения воздуха, $\text{м}/\text{с}$.

В новых переменных (16) приобретает вид

$$\Delta P = \frac{\frac{2}{3} g H w \left[\left(1 - \frac{h}{H}\right) \left(\bar{\omega}^{-2} - 1\right) + \frac{h}{H} \right]}{\bar{\omega}' S v \left(\bar{\omega}^{-3} - \frac{2}{3} \bar{\omega}^{-2} + 1 \right)}, \quad (18)$$

где определяющей зависимость ΔP от h/H и $\bar{\omega}$ является функция F в качестве безразмерного перепада давлений с единицей измерения $\frac{2}{3} g H \frac{w}{\omega' S}$

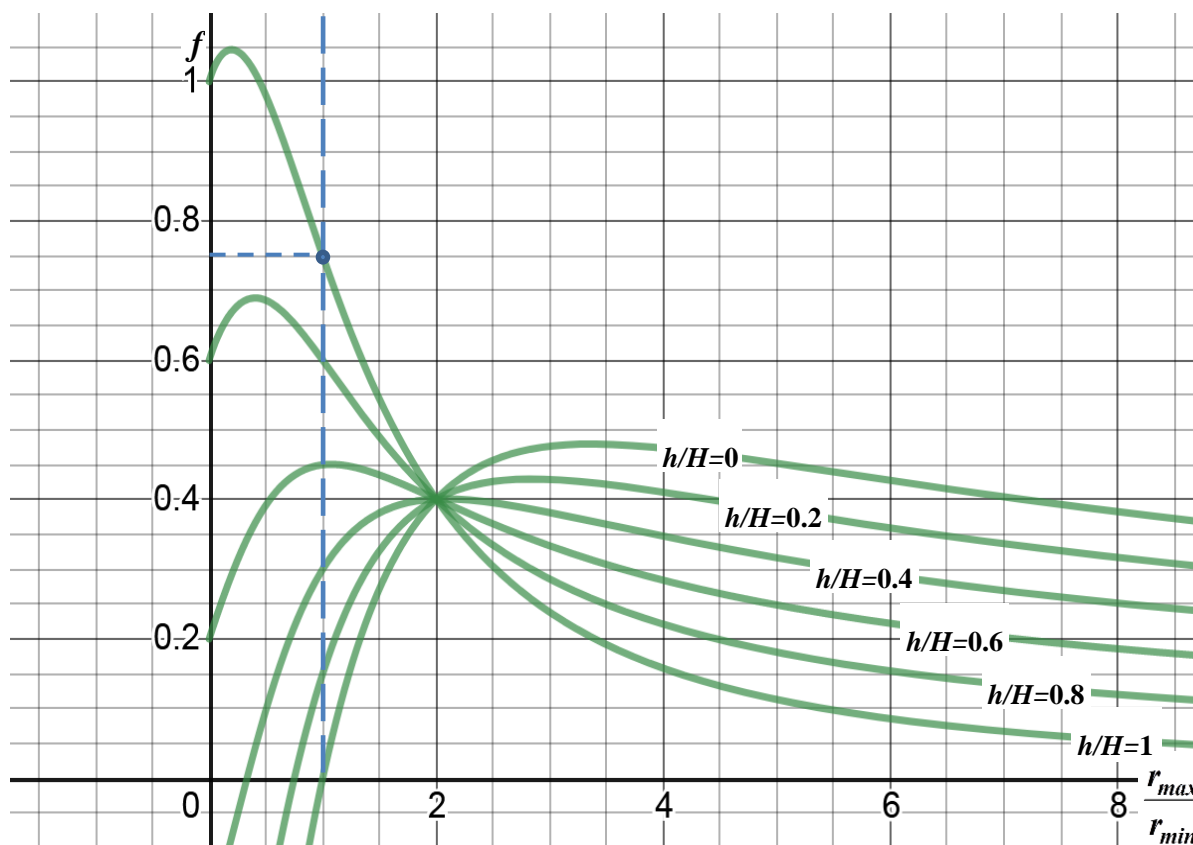


Рис. 2. Зависимость безразмерного перепада давлений f от глубины места выделения влаги $0 \leq h/H \leq 1$ и минимального размера падающих вниз капель $1 \leq r_{max}/r_{min} < \infty$

Fig. 2. Dependence of the dimensionless pressure drop f on the depth of the moisture release site $0 \leq h/H \leq 1$ and the minimum size of the drops falling down $1 \leq r_{max}/r_{min} < \infty$

$$F\left(\bar{v}, \frac{h}{H}\right) = \frac{\left[\left(1 - \frac{h}{H}\right)\left(\bar{\omega}^{-2} - 1\right) + \frac{h}{H}\right]}{\bar{v}\left(\bar{\omega}^{-3} - \frac{2}{3}\bar{\omega}^{-2} + 1\right)}$$

Здесь $\bar{\omega} = \begin{cases} \bar{v}, & 0 \leq \bar{v} \leq 1 \\ 1, & \bar{v} > 1 \end{cases}$, что означает ограничение

размера капель радиусом r_{max} , выше которого их рост прекращается ввиду потери устойчивости, соответственно $\bar{\omega}$ достигает предельного значения 1, а \bar{v} ограничений не имеет. При дальнейшем росте скорости $\bar{v} > 1$ выделяющаяся влага разбавляется нарастающим потоком воздуха, и F уменьшается обратно пропорционально \bar{v} .

Из графиков функции F (рис. 3) следует, что максимальное сопротивление воздушному потоку ($F=1,1$) оказывают грунтовые воды, проникающие в ствол с поверхности, при скорости движения воздуха порядка 3 м/с. При более глубоком попадании воды в ствол максимум F уменьшается до и возрастает после $h/H=0,5$ с увеличением v . При $h/H=0,4$ максимальный эффект достигается при $v=7$ м/с, а в нижней части ствола при $v=12$ м/с вся влага уносится вверх с $F=0,75$, что составляет примерно 70 % от эффекта «водяной пробки», вызванного падением влаги с поверхности.

Заключение

Из результатов проведённого анализа следует вывод, что основной причиной возникновения Бланкет-эффекта в вентиляционных стволах шахт являются поверхностные водопритоки в ствол, превышающие количественно на порядок конденсационное выделение влаги из воздуха при его подъёме с гидростатическим охлаждением. Несоответствие значения скорости движения воздуха $v=3$ м/с наблюдаемому на практике диапазону от 7 до 12 м/с объясняется, очевидно, грубостью модели сосредоточенного источника выделения влаги. В реальности вода стекает по крепи и расстрелам, и процесс отрыва капель от твёрдых поверхностей и попадания их в воздушный поток «растягивается» по глубине ствола, что увеличивает критическую скорость движения воздуха для достижения максимального эффекта. По экспериментальным данным величина обратной тяги порядка 500 Па, что согласно (18) соответствует водопритокам $w \sim 10$ кг/с и одновременно падающей и восходящей в стволе влаги порядка 1 т на максимум F . Снижение или увеличение скорости движения воздуха приводит к сокращению массы воды в воздухе путём падения части её вниз в первом случае или выноса вверх во втором.

Представленные в статье результаты моделирования эффекта «водяной пробки» в вентиляционных стволах могут быть использованы для профилактики

этого негативного явления, а в случае его возникновения – для принятия мер по недопущению аварийного останова вентилятора и скорейшей нормализации его работы.

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

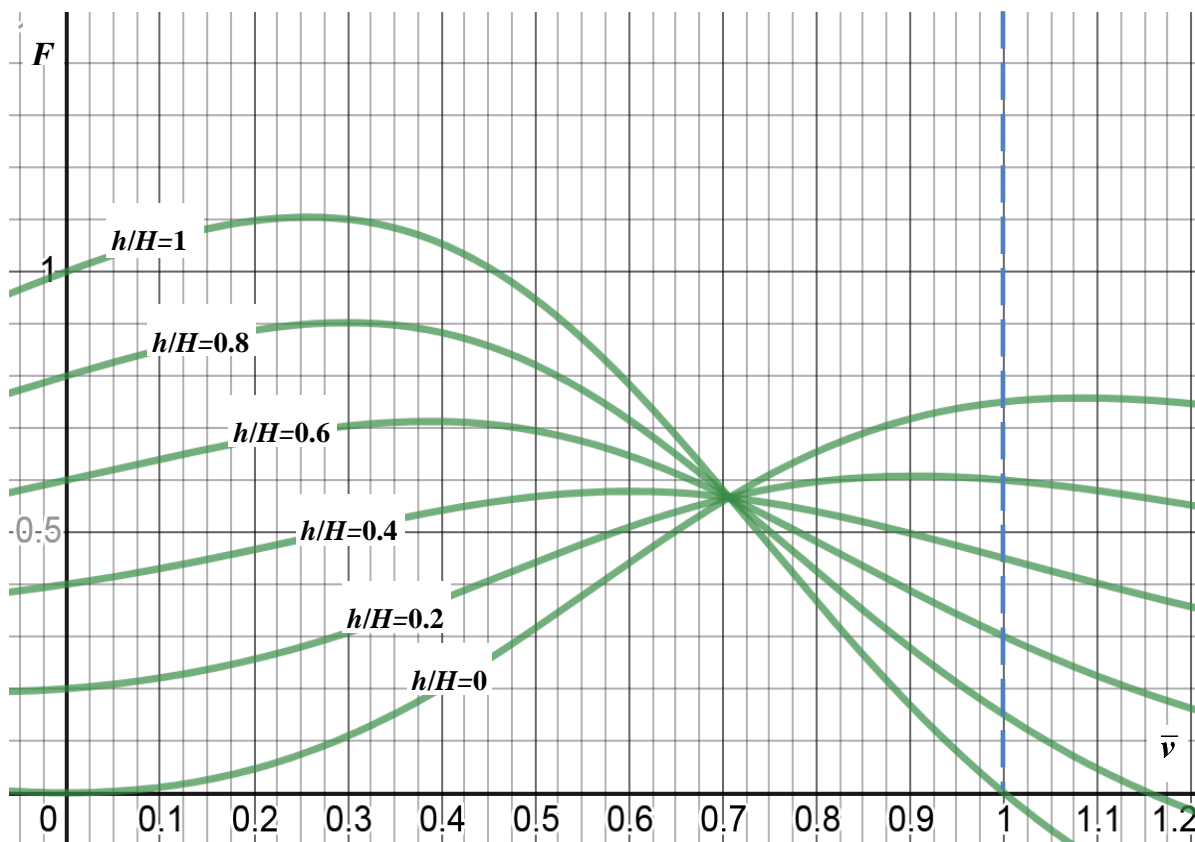


Рис. 3. Зависимость безразмерного перепада давлений F от глубины источника водопритоков $0 \leq h/H \leq 1$ и безразмерной скорости движения воздуха по стволу $0 \leq \bar{v} \leq 1$

Fig. 3. Dependence of the dimensionless pressure drop F on the depth of the source of water flows $0 \leq h/H \leq 1$ and the dimensionless air velocity along the trunk $0 \leq \bar{v} \leq 1$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kazakov B.P., Shalimov A.V., Semin M.A. Stability of natural ventilation mode after main fan stoppage // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2015. – V. 86. – P. 288–293.
2. Шалимов А.В. Устойчивость конвективного движения воздуха в шахтных стволах // Горное эхо. – 2019. – № 1 (74). – С. 83–87.
3. Казаков Б.П., Шалимов А.В. Устойчивость конвективного проветривания рудника после отключения вентилятора // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2019. – № 4. – С. 122–130.
4. Шахрай С.Г., Курчин Г.С., Сорокин А.Г. Экспериментальное исследование эффективности естественного проветривания карьера через трубопроводы // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2019. – № 1. – С. 127–133.
5. Сологуб О.В. Влияние естественной тяги на проветривание Краснополянского тоннеля // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 1. – С. 32–34.
6. Аэрология горных предприятий / К.З. Ушаков, А.С. Бурчаков, Л.А. Пучков, И.И. Медведев. – М.: Изд-во «Недра», 1987. – 421 с.
7. Денисенко Е.А. Влияние капеза в вертикальных шахтных стволах на проектирование плановых координат гравитационным способом // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – 2012. – Вып. 38. – С. 60–69.
8. Демочко С.И., Кузнецов А.В., Паршинцев В.П. Неисправности шахтных вентиляторных установок главного проветривания. – М.: Изд-во «Недра», 1990. – 188 с.
9. De Souza E. The mystery of the ventilation raises // Proc. of the 16th North American Mine Ventilation Symposium. – Golden, USA: Colorado School of Mines, 2017. – P. 135–145.
10. Brake D.J. Mine ventilation: a practitioner's manual. – Brisbane, Australia: Mine Ventilation, 2012. – 791 p.
11. Environmental discharge criteria and dispersion estimation for mine ventilation exhaust stacks / W. Harris, A. Kadiayi, K. Macdonald, D. Witow // Proc. of the First International Conference on Underground Mining Technology. – Perth, Australia: Australian Centre for Geomechanics, 2017. – P. 103–113.
12. Viljoen J., Von Glehn F. Investigation of water build-up in vertical upcast shafts through CFD analysis // Proc. of the 11th International Mine Ventilation Congress. – Singapore: Springer, 2019. – P. 1003–1014.
13. Schulz P. Problems of 'water-lock rupture' in a mine ventilation shaft. II. Stability of suspension flow // Archiwum Górnicwa, – 1985. – № 30 (2). – P. 235–241.
14. McPherson M.J. An analysis of the resistance and airflow characteristics of mine shafts // Fourth International Mine Ventilation Congress. – Brisbane–Queensland, Australia, 1988. – P. 25–33.
15. Semin M., Zaitsev A. On a possible mechanism for the water build-up formation in mine ventilation shafts // Thermal Science and Engineering Progress. – 2020. – V. 20. – P. 107–116.
16. Рогов В.П. Коэффициент сопротивления частиц и капель // Научные труды Дальрыбвтуза. – 2007. – № 19. – С. 95–105.
17. ГОСТ Р 53613-2009. Воздействие природных внешних условий на технические изделия. Общая характеристика. Осадки и ветер. – М.: Стандартинформ, 2011. – 12 с.

18. Зайцев А.В. Теоретические и технологические основы ресурсосберегающих систем нормализации теплового режима глубоких рудников // Стратегия и процессы освоения георесурсов. – 2018. – Вып. 16. – С. 257–262.
19. Hargrath T.Z. Velocity of large drops and bubbles in media of infinite or restricted extent // AIChE Journal. – 1960. – № 6 (2). – P. 281–288.
20. McPherson M.J. Subsurface ventilation and environmental engineering. – London: Chapman&Hall, 2009. – 824 p.

Поступила 19.04.2021 г.

Информация об авторах

Шалимов А.В., доктор технических наук, ведущий научный сотрудник отдела аэрологии и теплофизики Горного института УрО РАН.

Казаков Б.П., доктор технических наук, главный научный сотрудник отдела аэрологии и теплофизики Горного института УрО РАН.

Зайцев А.В., доктор технических наук, заведующий сектором математического моделирования и информационных технологий, отдел аэрологии и теплофизики Горного института УрО РАН.

UDC 622.411

ANALYTICAL APPROACH TO ESTIMATION OF WATER BUILD-UP EFFECT IN MINE VENTILATION SHAFTS

Andrey V. Shalimov¹,
shalimovav@mail.ru

Boris P. Kazakov¹,
aero_kaz@mail.ru

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

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

The relevance of the study is caused by the need to reduce the additional aerodynamic load on the main fans associated with the occurrence of pressure drop caused by water build-up effect in mine ventilation shafts. This negative effect can lead to significant increase in the air resistance of the mine and to subsequent unstable operation mode of main fan. Avoiding this effect is important not only for energy save mine ventilation, but also for preventing emergency stop of the main fan.

Purpose: finding out the causes and mechanism of the water build-up effect with obtaining qualitative and quantitative estimates of the pressure drop value depending on the air velocity, shaft depth and intensity of the groundwater inflows.

Objects: ventilation shafts.

Methods: analytical modeling of moisture condensation and droplet movement in an ascending air flow in ventilation shaft; comparative analysis of experimental and model data.

Results. The authors have analyzed the experimental data on formation and movement of droplet moisture in the ventilation shafts of various mines. It is noted that the water build-up effect is observed in the range of air velocities from 7 to 12 m/s, but in some cases the effect is absent even despite the presence of thick fog and abundant condensation of moisture on the surface of the shaft lining and other equipment. Three possible scenarios of the effect are considered: accumulation of a large number of drops of a certain size hanging in the air; drops of large size fall along the entire depth of the shaft with a source of moisture release in its upper part and multidirectional movement of drops depending on their size with a source of moisture release located at arbitrary depth. It is established that the first two models do not allow us to obtain a quantitative estimate of the water build-up effect value due to the uncertainty of the fractional composition of drops, the critical size of which increases the pressure drop to infinity. This drawback was eliminated in the third model by introducing the droplet size distribution function, which made it possible to obtain quantitative results. It is proved that the release of moisture from the air cannot be the cause of the water build-up effect, and the cause is the ground water flows into the shaft with intensity of an order of magnitude higher than moisture condensation. Based on the results of numerical modeling, it is shown that the maximum pressure drop occurs when surface groundwater enters the shaft.

Key words:

Mine ventilation, moisture condensation, hydrostatic cooling, water flows, pressure loss, aerodynamic drag, natural draft, fractional composition.

The study was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Education of the Russian Federation under the agreement on state task no. 075-03-2021-374 of December 29, 2020.

REFERENCES

1. Kazakov B.P., Shalimov A.V., Semin M.A. Stability of natural ventilation mode after main fan stoppage. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, vol. 86, pp. 288–293.
2. Shalimov A.V. Ustoychivost konvektivnogo dvizheniya vozdukh v shakhtnykh stvolakh [Stability of convective air movement in mine shafts]. *Mountain echo*, 2019, no. 1 (74), pp. 83–87.
3. Kazakov B.P., Shalimov A.V. Stability of convective ventilation of the mine after switching off the fan. *Journal of Mining Science*, 2019, no. 4, pp. 122–130. In Rus.
4. Shaxray S.G., Kurchin G.S., Sorokin A.G. Experimental study of the effectiveness of natural ventilation of a quarry through pipelines. *News of higher educational institutions. Mining journal*, 2019, no. 1, pp. 127–133. In Rus.
5. Sologub O.V. Influence of natural draft on airing of the Krasnopolyansky tunnel. *Mining informational and analytical bulletin*, 2009, no. 1, pp. 32–34. In Rus.
6. Ushakov K.Z., Burchakov A.S., Puchkov L.A., Medvedev I.I. *Aerologiya gornyykh predpriyatiy* [Aerology of mining enterprises]. Moscow, Nedra Publ., 1987. 421 p.
7. Denisenko E.A. Influence of drop in vertical mine shafts on the design of planned coordinates by gravity method. *Collection of scientific papers of the Donbass state technical University*, 2012, Iss. 38, pp. 60–69. In Rus.
8. Demochko S.I., Kuznecov A.V., Parshincev V.P. *Neispravnosti shakhtnykh ventilyatormykh ustanovok glavnogo provetrivaniya. Spravochnoe posobie* [Malfunctions of main ventilation shaft fan installations. Reference book]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 188 p.
9. De Souza E. The mystery of the ventilation raises. *Proceedings of the 16th North American Mine Ventilation Symposium*, Golden, USA, Colorado School of Mines, 2017. pp. 135–145.
10. Brake D.J. *Mine ventilation: a practitioner's manual*. Brisbane, Australia, Mine Ventilation Publ., 2012. 791 p.
11. Harris W., Kadiyi A., Macdonald K., Witow D. Environmental discharge criteria and dispersion estimation for mine ventilation exhaust stacks. *Proc. of the First International Conference on Underground Mining Technology*. Perth, Australia, Australian Centre for Geomechanics, 2017. pp. 103–113.
12. Viljoen J., Von Glehn F. Investigation of water build-up in vertical upcast shafts through CFD analysis. *Proc. of the 11th Interna-*

- tional Mine Ventilation Congress*. Singapore, Springer Publ., 2019. pp. 1003–1014.
13. Schulz P. Problems of ‘water–lock rupture’ in a mine ventilation shaft. II. Stability of suspension flow. *Archivum Górnictwa*, 1985, no. 30 (2), pp. 235–241.
 14. McPherson M.J. An analysis of the resistance and airflow characteristics of mine shafts. *Fourth International Mine Ventilation Congress*. Brisbane–Queensland, Australia, 1988, pp. 25–33.
 15. Semin M., Zaitsev A. On a possible mechanism for the water build–up formation in mine ventilation shafts. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2020, vol. 20, pp. 107–116.
 16. Rogov V.P. Coefficient of resistance of particles and drops. *Scientific works of Dalrybvtuz*, 2007, no. 19, pp. 95–105. In Rus.
 17. GOST R 53613-2009. *Vozdeystvie prirodnykh vneshnikh usloviy na tekhnicheskie izdeliya. Obshhaya kharakteristika. Osadki i veter* [Impact of natural external conditions on technical products. General characteristic. Precipitation and wind]. Moscow, Standartinform Publ., 2011. 12 p.
 18. Zaytsev A.V. Teoreticheskie i tekhnologicheskie osnovy resursos-beregayushchikh sistem normalizatsii teplovogo rezhima glubokikh rudnikov [Theoretical and technological bases of resource-saving systems for normalization of the thermal regime of deep mines]. *Strategy and processes of geo–resource development. Collection of proceedings*, 2018, Iss. 16, pp. 257–262.
 19. Harmathy T.Z. Velocity of large drops and bubbles in media of infinite or restricted extent. *AIChE Journal*, 1960, no. 6 (2), pp. 281–288.
 20. McPherson M.J. *Subsurface ventilation and environmental engineering*. London, Chapman & Hall Publ., 2009. 824 p.

Received: 19 April 2021.

Information about the authors

Andrey V. Shalimov, Dr. Sc., leading researcher, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Boris P. Kazakov, Dr. Sc., chief researcher, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

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

УДК 622.279, 620.193

НОВЫЙ МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ПОДВЕРЖЕННОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗОКОНДЕНСАТНЫХ СКВАЖИН УГЛЕКИСЛОТНОЙ КОРРОЗИИ

Пономарев Александр Иосифович¹,
pnmrv@mail.ru

Иванов Николай Валерьевич²,
inv1412@yandex.ru

Юсупов Александр Дамирович¹,
aleksandr_yusupov@list.ru

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

² Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина,
Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр., 65.

Актуальность. Перспективы увеличения добычи газового конденсата – ценного сырья для нефтепереработки и нефтехимии – в значительной мере связаны с дальнейшим освоением ресурсов газоконденсатных залежей в ачимовских отложениях севера Западной Сибири. Большие глубины, аномально высокое пластовое давление и высокая температура низкопродуктивных пластов наряду с присутствием в составе пластового газоконденсатного флюида диоксида углерода выдвигают, в первую очередь, повышенные требования к качеству заканчивания скважин и операций гидроразрыва пласта, надежности конструкций и материалов подземного оборудования скважин. Этими факторами обусловлены высокая стоимость реализации проектов и эксплуатационные риски добычи газа и конденсата, в связи с чем обоснование безопасных условий эксплуатации скважин в ачимовских отложениях является актуальной научно-технической задачей.

Цель: определить предельные значения термобарических параметров технологических режимов эксплуатации ачимовских газоконденсатных скважин с содержанием в добываемой продукции диоксида углерода, обеспечивающих физико-химические условия отсутствия электрохимической коррозии забойного оборудования – хвостовиков на длительный (20-летний) период.

Объект: пластовый газоконденсатный флюид и забойное оборудование трех ачимовских газоконденсатных скважин с хвостовиками из углеродистой стали, нестойкой к углекислотной коррозии.

Метод: моделирование фазового поведения добываемого пластового флюида в скважинных условиях в среде программного обеспечения ГазКондНефть.

Результаты. Термодинамическими расчетами фазового поведения пластовой газоконденсатной смеси с учетом ее влагосодержания показано, что снижение пластового давления в зоне расположения трех рассматриваемых скважин при разработке участка ачимовской залежи на протяжении 20 лет при проектных технологических режимах их эксплуатации со временем приводит к образованию двухфазной смеси «газ – нестабильный конденсат» в забойных термобарических условиях скважин. При этом водная жидкая фаза вследствие высокой температуры потока на забое скважин не образуется в течение всего расчетного периода. Гидродинамические расчеты параметров восходящего потока газожидкостной смеси показали, что высокие скорости потока скважинной продукции обеспечивают условия полного и непрерывного выноса нестабильного конденсата потоком газа с забоя на поверхность по каждой из рассматриваемых скважин в течение всего 20-летнего периода, тем самым предотвращаются физико-химические условия образования на поверхности хвостовиков электролита и протекания углекислотной коррозии.

Ключевые слова:

Газоконденсатная смесь, диоксид углерода, хвостовик скважины, параметры технологического режима эксплуатации скважины, симулятор, фазовые диаграммы, линии точек росы воды и углеводородов, режим течения многофазного потока, углекислотная коррозия, антикоррозионный режим эксплуатации скважины.

Введение

Вопросы углекислотной коррозии как подземного, так и наземного оборудования и промышленных трубопроводов были актуальны в 60-е гг. прошлого столетия при разработке газоконденсатных месторождений Краснодарского и Ставропольского краев [1]. Тогда отмечалась неравномерность коррозии насосно-компрессорных труб (НКТ) на некоторых скважинах. Чаще всего фиксировалась коррозия большей интенсивности в приустьевой зоне, чем в забойной, а на некоторых скважинах коррозия башмака и нижних НКТ не отмечалась вовсе. Наблюдаемые коррозионные поражения НКТ рядом исследователей [2, 3] объяснялись тем, что в стволе сква-

жин при снижении температуры и давления имеет место выделение из добываемого газа свободной водной жидкой фазы, присутствие которой инициирует процесс коррозии. При этом известно, что конденсационные воды сами по себе обладают небольшой коррозионной агрессивностью по отношению к металлу, но разрушительное действие этих вод многократно увеличивается при насыщении их углекислым газом. Ввиду отсутствия в тот период времени адекватных средств моделирования фазового поведения газоконденсатных смесей с учетом их влагосодержания, а также гидродинамических методов расчета многофазных вертикальных и горизонтальных потоков, исследования по определению гра-

нических термодинамических условий существования антикоррозионного режима эксплуатации скважинного и поверхностного оборудования не проводились.

Ачимовские отложения в настоящее время являются основным ресурсом прироста запасов и добычи углеводородного сырья (УВС) и, в первую очередь, газового конденсата в Западной Сибири [4]. Один из крупнейших – Уренгойский лицензионный участок – в свою очередь поделен на шесть эксплуатационных участков [5, 6].

Подземная конструкция большинства скважин на одном из эксплуатационных участков Уренгойского лицензионного участка (эксплуатационная колонна, хвостовик, насосно-компрессорные трубы с комплексом подземного оборудования) имеет коррозионно-стойкое исполнение. Такое проектное техническое решение обусловлено потенциальной коррозионной агрессивностью пластового флюида из-за содержания в его составе диоксида углерода. Также известно, что на Уренгойском лицензионном участке существует проблема углекислотной коррозии наземного оборудования. Так, элементы устьевой обвязки скважин и отдельные участки газосборных трубопроводов, выполненных в некоррозионно-стойком исполнении, за десятилетний период эксплуатации подверглись воздействию углекислотной коррозии [7–9].

Вместе с тем определение предельных значений термодинамических параметров технологических режимов эксплуатации ачимовских газоконденсатных скважин, обеспечивающих физико-химические условия отсутствия электрохимической коррозии забойного оборудования – хвостовиков, представляет большой практический интерес. При существовании таких режимов в течение длительного периода эксплуатации (несколько десятилетий) можно рассматривать вопрос о внесении изменений в проектную конструкцию новых скважин с применением хвостовиков в некоррозионно-стойком исполнении, что позволит частично снизить стоимость скважин.

Методика проведения исследования

Типовая конструкция скважин одного из эксплуатационных участков Уренгойского лицензионного участка [10] приведена на рис. 1 и включает:

- кондуктор ($D=324$ мм), перекрывающий многолетнемерзлые породы и неустойчивые четвертичные отложения;
- техническую (промежуточную) колонну ($D=245$ мм), перекрывающую сеноманский горизонт с аномально низкими пластовыми давлениями;
- эксплуатационную колонну ($D=178$ мм), перекрывающую пласты с нормальными и аномально низкими пластовыми давлениями с установкой башмака колонны на 20 м выше продуктивного пласта ачимовских отложений;
- хвостовик ($D=114$ мм), расположенный в интервале продуктивных пластов;
- лифтовую колонну ($D=89$ мм), на которой установлен комплекс подземного оборудования (пакер, клапан-отсекатель, датчики давления и температуры и др.).

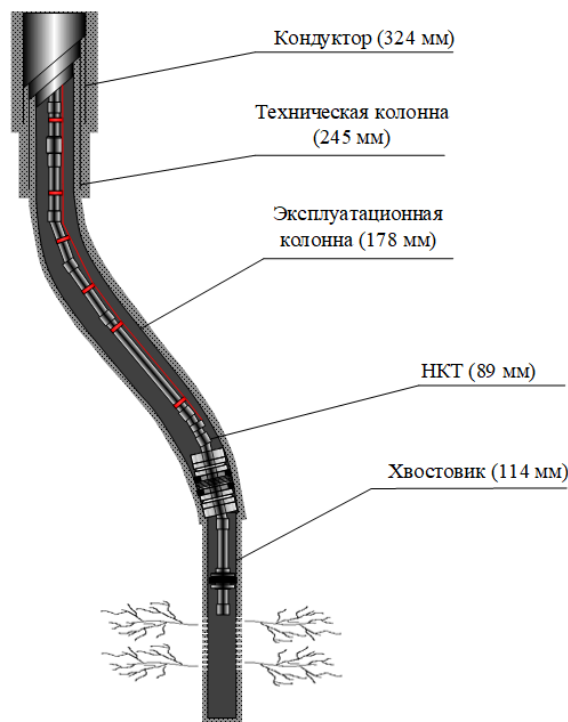


Рис. 1. Типовая конструкция ачимовских скважин
Fig. 1. Typical well design for the achimov deposits

В 2020 г. в рамках программы исследовательских работ в эксплуатацию были введены три скважины, конструкция которых предусматривает хвостовики, выполненные в нестойком к коррозии исполнении – из углеродистой стали группы прочности Р110. При поверхностном анализе потенциальных рисков, связанных с процессами коррозии хвостовиков, напрашивался вывод о протекании более интенсивной углекислотной коррозии металла хвостовиков в сравнении с коррозией металла поверхностного оборудования ввиду более высоких температур и парциальных давлений углекислого газа, наблюдаемых на забое.

Однако электрохимия углекислотной коррозии такова, что для протекания процесса коррозии металла необходимым условием является наличие на поверхности металла водной жидкой фазы. Считается, что пленка воды на поверхности металла толщиной 20–30 молекул является достаточной для протекания электрохимической коррозии [11], к которой относится углекислотная коррозия, наблюдаемая на наземных объектах добычи УВС ачимовских отложений. Поэтому присутствие воды на забое скважины только в паровой фазе исключает коррозию хвостовиков, несмотря на более высокие температуры и парциальное давление углекислого газа по сравнению с условиями устья скважины, где наблюдаются интенсивные коррозионные процессы.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи исследования:

- для трех опытных скважин определить фазовое состояние воды на забое и устье при составах скважинной продукции, изменяющихся в течение разработки участка залежи по мере снижения пластового и забойного давлений на 20-летний период;

- предложить рекомендации по противокоррозионной защите и коррозионному мониторингу скважин, оборудованных хвостовиками из углеродистой стали.

Математическое моделирование фазового равновесия для систем природных углеводородов заключается в использовании различных уравнений состояния многокомпонентных систем, описывающих соотношения между параметрами углеводородной смеси в состоянии парожидкостного равновесия [12]. Уравнение состояния Ван-дер-Ваальса послужило основой для всех существующих уравнений и их модификаций, таких как: Редлиха–Квонга [13], Ли–Кеслера [14], Пенга–Робинсона [15, 16] и других. Выбор определенного уравнения для расчета фазового равновесия обусловлен диапазонами давления и температуры, а также составом природных газоконденсатных смесей, в который входят углеводороды различного строения (парафиновые, нафтеновые, ароматические) и неуглеводородные вещества (сероводород, диоксид углерода, азот и др.). Все современные программные комплексы, предназначенные для моделирования технологии добычи и подготовки углеводородного сырья, включают уравнение состояния Пенга–Робинсона в той или иной модификации. Адекватность уравнения состояния Пенга–Робинсона применительно к расчету процессов добычи и подготовки углеводородного сырья подтверждается работами [17]. Кроме того, в работах [18–22] дается рекомендация к использованию уравнения состояния Пенга–Робинсона для моделирования фазового поведения многокомпонентных углеводородных смесей, в т. ч. при пластовых условиях. По этой причине все выполненные технологические расчеты проводились с использованием уравнения состояния Пенга–Робинсона.

В качестве инструментария исследования требовалось определить программный комплекс технологического моделирования, адекватно описывающий фазовое поведение добываемой из ачимовских скважин

углеводородной смеси с учетом ее влагосодержания. Проведя анализ применения различных комплексов, описанных в работе [23], для расчетов была выбрана компьютерная программа ГазКондНефть.

В технологической модели «забой – устье скважины» производились расчеты фазового состояния пластового флюида, для чего использовались следующие исходные данные по исследуемым скважинам на 20-летний прогнозный период:

- компонентно-фракционные составы добываемой углеводородной смеси по состоянию на 2020 г.;
- проектные значения технологических режимов эксплуатации скважин: депрессии на пласт, дебиты газоконденсатной смеси и воды.

Методика исследования заключается в последовательном решении следующих задач:

- определение термобарических условий выделения жидкой углеводородной фазы при изменении состава добываемого пластового флюида и параметров технологических режимов скважин в процессе истощения залежи;
- определение фазового состояния воды и возможности ее существования в забойных и устьевых условиях в водной жидкой фазе;
- определение гидродинамических условий полного и непрерывного выноса жидкости с забоя скважины на поверхность.

По результатам решения этих задач проводится анализ фазового состояния добываемого флюида на забое и устье каждой из скважин с точки зрения возможности формирования пленки или слоя водного раствора электролита на внутренней поверхности хвостовика и устьевой обвязки.

Полный состав газоконденсатной смеси для расчета фазового состояния добываемого пластового флюида и проектные параметры технологического режима скважины № 1 на 2020 г. приведены соответственно в табл. 1, 2.

Таблица 1. Компонентно-фракционный состав углеводородной смеси по скважине № 1 на 2020 г.

Table 1. Component-fractional composition of the hydrocarbon fluid for well no. 1 in 2020

Компоненты и фракции Components and fractions	Содержание, % мас. Content, wt. %	Фракции Fractions	Содержание, % мас. Content, wt. %	Фракции Fractions	Содержание, % мас. Content, wt. %
Азот/Nitrogen	0,1590	F ₉ (130–140 °C)	1,7182	F ₂₆ (300–310 °C)	2,39·10 ⁻³
Диоксид углерода Carbon dioxide	1,3544	F ₁₀ (140–150 °C)	0,6482	F ₂₇ (310–320 °C)	1,57·10 ⁻³
Метан/Methane	42,4308	F ₁₁ (150–160 °C)	1,0133	F ₂₈ (320–330 °C)	1,03·10 ⁻³
Этан/Ethane	8,9696	F ₁₂ (160–170 °C)	0,3451	F ₂₉ (330–340 °C)	6,01·10 ⁻⁴
Пропан/Propane	8,6921	F ₁₃ (170–180 °C)	0,3794	F ₃₀ (340–350 °C)	3,22·10 ⁻⁴
Изобутан/Isobutane	3,3817	F ₁₄ (180–190 °C)	0,2779	F ₃₁ (350–360 °C)	1,63·10 ⁻⁴
Норм. бутан/n-butane	5,1723	F ₁₅ (190–200 °C)	0,1469	F ₃₂ (360–370 °C)	8,68·10 ⁻⁵
Изопентан/i-pentane	2,6813	F ₁₆ (200–210 °C)	0,1100	F ₃₃ (370–380 °C)	3,81·10 ⁻⁵
Норм. пентан/n-pentane	3,1376	F ₁₇ (210–220 °C)	0,0899	F ₃₄ (380–390 °C)	1,91·10 ⁻⁵
F ₁ (45–60 °C)	1,6847	F ₁₈ (220–230 °C)	0,0443	F ₃₅ (390–400 °C)	9,62·10 ⁻⁶
F ₂ (60–70 °C)	2,7769	F ₁₉ (230–240 °C)	0,0334	F ₃₆ (400–410 °C)	5,15·10 ⁻⁶
F ₃ (70–80 °C)	1,3186	F ₂₀ (240–250 °C)	0,0277	F ₃₇ (410–420 °C)	2,62·10 ⁻⁶
F ₄ (80–90 °C)	2,2671	F ₂₁ (250–260 °C)	0,0173	F ₃₈ (420–430 °C)	1,46·10 ⁻⁶
F ₅ (90–100 °C)	3,0199	F ₂₂ (260–270 °C)	0,0132	F ₃₉ (430–440 °C)	6,52·10 ⁻⁷
F ₆ (100–110 °C)	4,2434	F ₂₃ (270–280 °C)	0,0095	F ₄₀ (440–450 °C)	2,28·10 ⁻⁷
F ₇ (110–120 °C)	2,6816	F ₂₄ (280–290 °C)	0,0063	F ₄₁ (450–460 °C)	1,14·10 ⁻⁷
F ₈ (120–130 °C)	1,1382	F ₂₅ (290–300 °C)	0,0041	F ₄₂ (460–470 °C)	4,65·10 ⁻⁸

Таблица 2. Параметры проектного технологического режима скважины № 1 в 2020 г.

Table 2. Parameters of the design technological regime of well no. 1 in 2020

Параметр Parameter	Значение Value
Расход углеводородной смеси, тыс. м ³ /ч (тыс. м ³ /сутки) Hydrocarbon fluid consumption, thousand m ³ /hour (thousand m ³ /day)	9,59 (230,16)
Расход пластовой воды, м ³ /сут Formation water consumption, m ³ /day	1,05
Забойное давление, МПа Bottomhole pressure, MPa	38,72
Температура на забое Bottomhole temperature, °C	108,00
Устьевое давление, МПа Wellhead pressure, MPa	28,35
Температура на устье Wellhead temperature, °C	45,76

Результаты расчетов

Данные табл. 1, 2 были экспортированы в симулятор для решения двух первых задач моделирования

фазовых превращений добываемого из скважины № 1 флюида. Изменение компонентно-фракционного состава добываемой газоконденсатной смеси с укрупненными фракциями по скважинам № 1–3 по годам разработки приведено в табл. 3.

По результатам расчетов также определены области двухфазного состояния воды и углеводородов в газоконденсатной смеси, ограниченные соответствующими линиями точек росы (нулевыми изоплерами), для изменяющихся в процессе разработки компонентно-фракционных составов добываемого пластового флюида. При этом следует отметить, что в расчетах на симуляторе использовались полные составы углеводородной смеси, аналогичные приведенным в табл. 1. Смещение границ двухфазной области для воды и углеводородов по состоянию на 2020, 2030 и 2040 гг. по скважинам № 1–3 представлены на диаграммах рис. 2–4, соответственно. На диаграммах также указаны термобарические условия на забое и устье в соответствии с проектными технологическими режимами эксплуатации скважин на вышеупомянутые годы разработки участка ачимовской залежи.

Таблица 3. Изменение компонентно-фракционного состава добываемой газоконденсатной смеси с укрупненными фракциями по скважинам № 1–3 (2020, 2030, 2040 гг.)

Table 3. Change in the component-fractional composition of the produced gas-condensate mixture with enlarged fractions for wells no. 1–3 (in 2020, 2030, 2040)

Компонент Component	Содержание компонента/фракции, % масс. (кроме воды) Component/fraction content, wt. % (except water)								
	Скважина № 1 Well no. 1			Скважина № 2 Well no. 2			Скважина № 3 Well no. 3		
	2020	2030	2040	2020	2030	2040	2020	2030	2040
Метан/Methane	42,43	51,29	54,87	47,13	54,77	58,13	45,90	52,18	57,93
Этан/Ethane	8,97	10,28	10,67	8,57	9,75	10,32	8,38	9,35	10,28
Пропан/Propane	8,69	9,11	9,03	6,80	7,55	7,90	6,67	7,31	7,87
Изобутан/Isobutane	3,38	3,26	3,10	2,27	2,48	2,56	2,23	2,42	2,55
Норм. Бутан/n-butane	5,17	4,73	4,39	3,18	3,42	3,49	3,13	3,35	3,49
Изопентан/i-pentane	2,68	2,18	1,92	1,42	1,48	1,48	1,40	1,47	1,48
Норм. пентан/n-pentane	3,14	2,46	2,13	1,59	1,65	1,63	1,57	1,65	1,63
Ф ₁ (фракция 45–100 °C) F ₁ (fraction 45–100 °C)	11,07	7,21	5,86	5,62	5,27	4,74	5,61	5,49	4,78
Ф ₂ (фракция 100–200 °C) F ₂ (fraction 100–200 °C)	12,59	7,45	5,93	12,25	9,41	6,94	12,41	10,79	7,11
Ф ₃ (фракция 200–300 °C) F ₃ (fraction 200–300 °C)	0,36	0,22	0,19	5,38	1,96	0,79	5,77	3,15	0,85
Ф ₄ (фракция 300–470 °C) F ₄ (fraction 300–470 °C)	0,01	0,00	0,00	4,19	0,42	0,09	5,38	1,08	0,10
Азот/Nitrogen	0,16	0,20	0,21	0,19	0,22	0,23	0,18	0,21	0,23
Углекислый газ/Carbon dioxide	1,35	1,60	1,69	1,40	1,61	1,71	1,37	1,54	1,71
Вода, г/м ³ флюида Water, g/m ³ of fluid	4,58	6,50	8,45	4,62	6,44	8,55	4,80	6,24	8,07

Для протекания углекислотной коррозии необходимо наличие на поверхностях хвостовика и некоррозионно-стойкого внутрискважинного оборудования, контактирующего с восходящим потоком добываемого флюида, электролита за счет образования слоя или пленки водной жидкой фазы, насыщаемой диоксидом углерода. Поэтому важно определить: а) в какой фазе (паровой или жидкой) находится вода в потоке газоконденсатной смеси; б) в какой фазе (газовой или жидкой) находятся углеводороды; в) если имеет место образование водной и углеводородной жидких фаз, то в каком количественном соотношении они находятся, какого типа эмульсии они образуют «вода в масле» или

«масло в воде»; г) какой режим восходящего многофазного потока обеспечивается в хвостовике, лифтовых трубах и на устье скважин при выполнении проектных технологических параметрах их эксплуатации.

Анализ результатов расчетов фазового поведения добываемого пластового флюида (газоконденсатной смеси с учетом влагосодержания) показал, что жидкая водная фаза из-за высокой температуры в пласте и скважинах не образуется ни в одной из исследуемых скважин в течение ближайшего 20-летнего периода их эксплуатации (рис. 2–4, табл. 4). Жидкая углеводородная фаза с незначительным содержанием растворенной в ней воды (0,461...0,754 % мольн.) появ-

ляется на забое скважин № 1 и № 3 через 20 лет – к 2040 г., а в скважине № 2 уже через 10 лет – к 2030 г. При таких низких концентрациях в жидкой углеводородной фазе вода находится в молекулярно-растворенном состоянии и не образует с диоксидом углерода электролит. При этом избыточная масса воды находится в паровой фазе в составе газа.

Теперь важно выяснить, каковы гидродинамические условия течения восходящего потока газоконденсатной смеси в скважине при соблюдении проектного технологического режима эксплуатации: не происходит ли накопление жидкости на забое в хвостовике, в котором объемные скорости потока характерны

наименьшими значениями в скважине из-за наибольшего давления и большим по сравнению с лифтовой колонной диаметром. При скоплении углеводородной жидкости на забое пусть с небольшим содержанием воды, растворенной в жидкой углеводородной фазе, со временем может образоваться сначала эмульсия типа «вода в масле», частичный объем которой при дальнейшем накоплении может подвергнуться инверсии со сменой на тип «масло в воде». В этом случае неизбежно образование электролита с протеканием углекислой коррозии незащищенного металла скважинного оборудования, в рассматриваемом здесь случае – хвостовика.

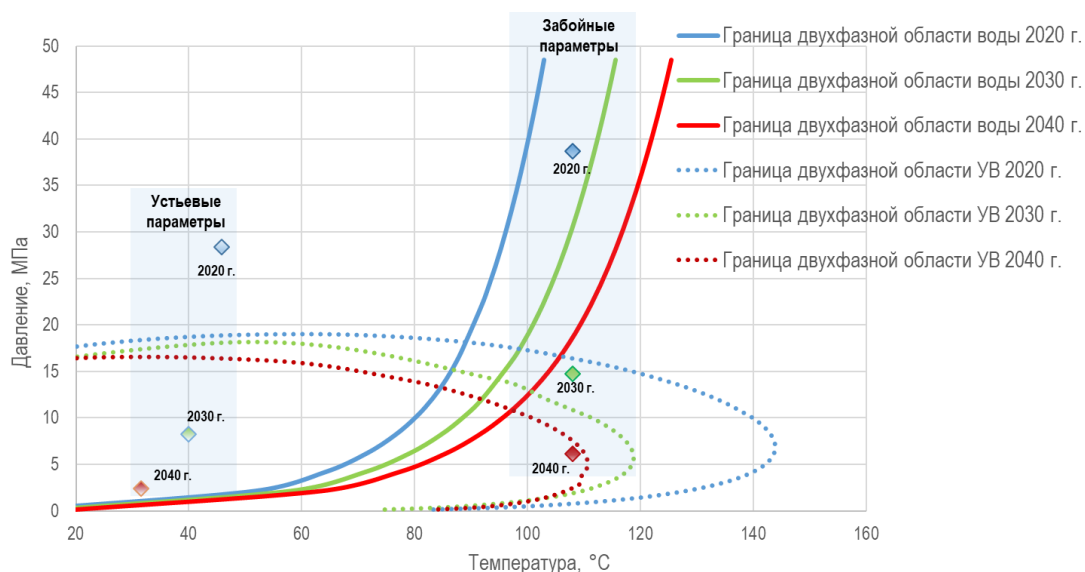


Рис. 2. Границы двухфазной области для воды и УВ и термобарические условия на забое и устье скважины № 1 по состоянию на 2020, 2030 и 2040 гг.

Fig. 2. Boundaries of the two-phase region for water and hydrocarbons (HC) and thermobaric conditions at the bottomhole and wellhead of well no. 1 as of 2020, 2030 and 2040

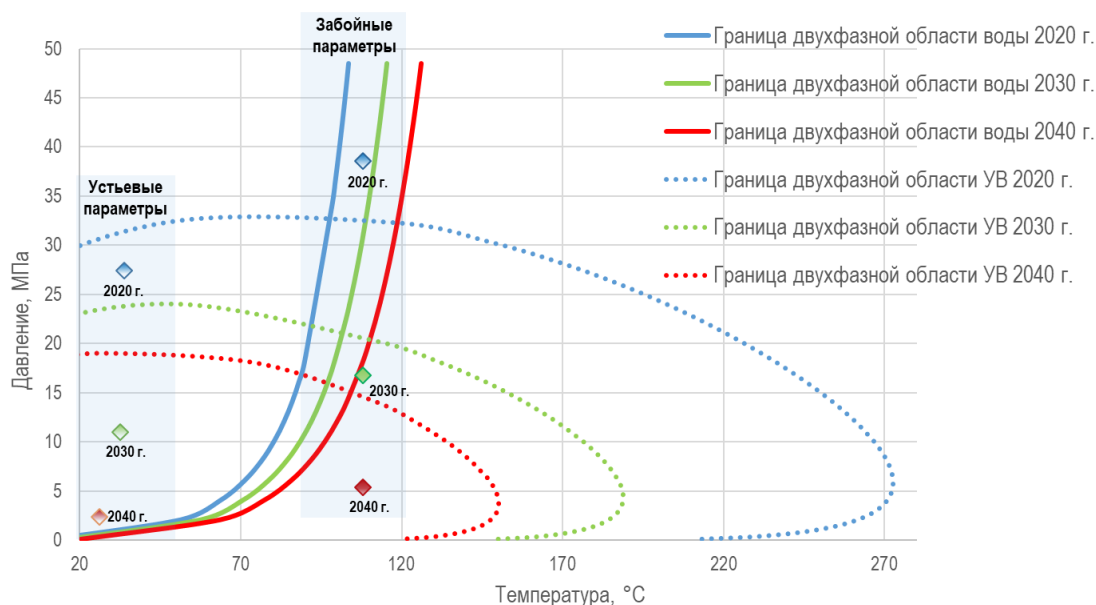


Рис. 3. Границы двухфазной области для воды и УВ и термобарические условия на забое и устье скважины № 2 по состоянию на 2020, 2030 и 2040 гг.

Fig. 3. Boundaries of the two-phase region for water and HC and thermobaric conditions at the bottomhole and wellhead of well no. 2 as of 2020, 2030 and 2040

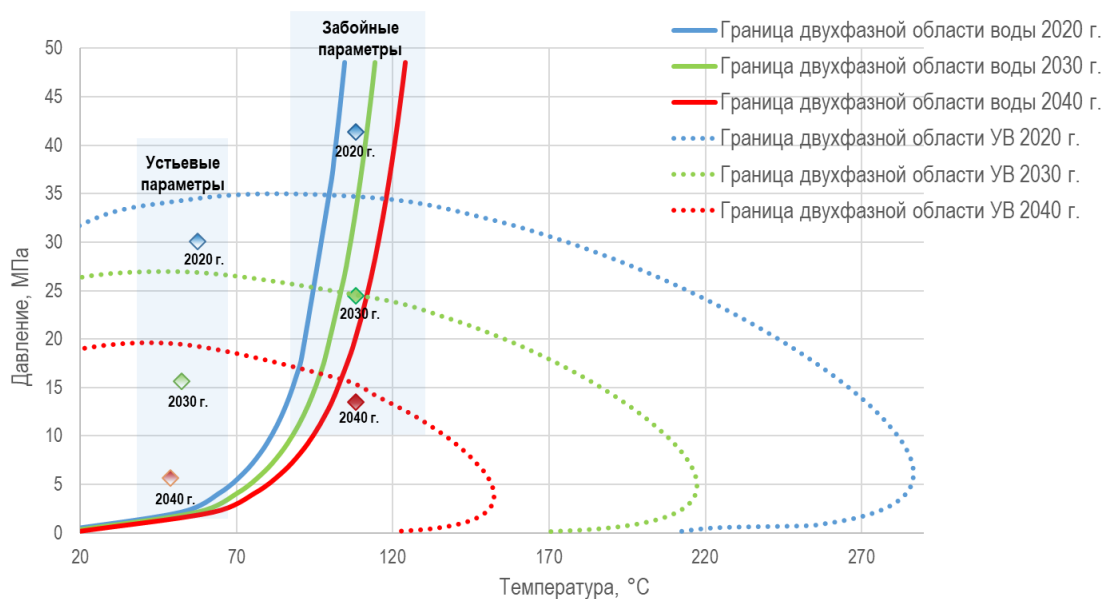


Рис. 4. Границы двухфазной области для воды и УВ и термобарические условия на забое и устье скважины № 3 по состоянию на 2020, 2030 и 2040 гг.

Fig. 4. Boundaries of the two-phase area for water and HC and thermobaric conditions at the bottomhole and wellhead of well № 3 as of 2020, 2030 and 2040

Таблица 4. Расчетные физико-химические свойства скважиной продукции (2020, 2030, 2040 гг.)

Table 4. Estimated physical and chemical properties of the well production (in 2020, 2030, 2040)

Физические свойства Physical properties	Скважина/Well								
	1			2			3		
	2020	2030	2040	2020	2030	2040	2020	2030	2040
Наличие жидкой углеводородной фазы на забое скважины Presence of liquid hydrocarbon phase at the bottomhole	нет no	нет no	да yes	нет no	да yes	да yes	нет no	нет no	да yes
Наличие жидкой водной фазы на забое скважины Presence of liquid aqueous phase at the bottomhole	нет no	нет no	нет no	нет no	нет no	нет no	нет no	нет no	нет no
Плотность смеси, кг/м ³ Mixture density, kg/m ³	340,25	142,65	51,74	325,23	155,30	57,74	345,20	228,87	112,59
Плотность газовой фазы, кг/м ³ Gas phase density, kg/m ³	340,25	142,65	51,30	325,23	151,44	55,95	345,20	228,87	111,43
Плотность жидкой фазы, кг/м ³ Liquid phase density, kg/m ³	–	–	612,35	–	557,74	630,89	–	–	583,14
Молекулярная масса смеси, г/моль Mixture molecular weight, g/mol	27,44	24,12	23,05	26,59	23,50	22,40	27,18	24,44	22,46
Молекулярная масса газовой фазы, г/моль Gas phase molecular weight, g/mol	27,44	24,12	22,89	26,59	22,96	21,82	27,18	24,44	22,26
Молекулярная масса жидкой фазы, г/моль Liquid phase molecular weight, g/mol	–	–	86,35	–	71,20	92,11	–	–	77,57
Мольная доля растворенной воды во всем объеме жидкости Dissolved water mole fraction in the entire volume of liquid	–	–	4,63·10 ⁻³	–	6,96·10 ⁻³	4,61·10 ⁻³	–	–	7,54·10 ⁻³

Для оценки режима течения газожидкостного потока из симулятора фазового поведения газоконденсатной смеси были выгружены значения вязкостей газа и конденсата, поверхностного натяжения на границе газ–конденсат, коэффициента сверхсжимаемости газа, плотностей газовой и жидкой фаз для термобарических условий на забое и устье каждой из трех скважин для составов и проектных технологических режимов на 2020, 2030 и 2040 гг. Режим течения определялся по результату сравнения значения безразмерной скорости смеси [24]:

$$w_* = \frac{4(q_l + q_g^{wc})}{\pi d^2} \left(\frac{\rho_l - \rho_g}{g\sigma} \right)^{0,25} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0,5}$$

со значением скорости нижней границы существования кольцевого режима:

$$w_b = (0,82 - 0,0017\mu^{-0,6}) \cdot 10^{((5,3+115\mu)(1-\beta))},$$

где q_l и q_g^{wc} – дебиты конденсата и газа, приведенные к скважинным термобарическим условиям, м³/сутки; ρ_l и ρ_g – плотности конденсата и газа в скважинных термобарических условиях, кг/м³; d – диаметр хвостовика или лифтовых труб, м; σ – поверхностное

натяжение на границе газ–конденсат, Н/м; $\mu = \frac{\mu_g}{\mu_l}$ –

соотношение динамической вязкости газа и конденсата в скважинных термобарических условиях;

$\beta = \frac{q_g^{wc}}{q_g^{wc} + q_l}$ – расходное объемное газосодержание.

Таблица 5. Значения расходного газосодержания, безразмерной скорости нижней границы существования кольцевого режима и безразмерной скорости потока газоконденсатной смеси в хвостовике (2020, 2030, 2040 гг.)

Table 5. Values of the flow rate gas content, dimensionless velocity of the lower boundary of the existence of the annular regime and dimensionless flow rate of the gas-condensate liquid in the tailpipe (in 2020, 2030, 2040)

Год разработки Development year	Скважина/Well								
	1			2			3		
	β	w_b	w^*	β	w_b	w^*	β	w_b	w^*
2020	1,0000	–	–	1,0000	–	–	1,0000	–	–
2030	1,0000	–	–	0,9905	1,239	8,848	1,0000	–	–
2040	0,9992	0,834	15,635	0,9970	0,890	9,235	0,9975	0,892	29,568

Кроме того, для определения гидродинамических условий полного и непрерывного выноса жидкой фазы с забоя на поверхность размерные скорости потока газа в хвостовике и башмаке лифтовых труб

$$W = \frac{4q_g^{wc}}{\pi d^2 \beta}$$

сравнивались с критической скоростью газа опрокидывания жидкой пленки, или скоростью реверса, при которой газ с дисперсной фазой жидкости в ядре потока движется вверх, а масса жидкости в кольцевой пленке, условно говоря, зависает, вычисляемой по формуле А.А. Точигина [24]

$$W_{rev} = 3,3 \left(\frac{g \sigma \rho_l^2}{\rho_l - \rho_g} \right)^{0,25} \rho_g^{-0,5}.$$

Результаты расчетов показали, что для всех трех скважин в течение рассматриваемого периода разработки до 2040 г. выполняется неравенство

$$W > W_{rev},$$

т. е. проектные режимы эксплуатации скважин обеспечивают полный и непрерывный вынос жидкой фазы и из хвостовика, и из башмака лифтовой колонны (табл. 6), т. к. скорость взвешивания частиц жидкости, диспергированной в ядре потока, всегда меньше скорости реверса пленки жидкости при дисперсно-кольцевом режиме течения вертикального потока.

Поскольку нестабильный конденсат не обладает электропроводимостью, пленка на внутренней поверхности хвостовика и лифтовых труб не является электролитом, и при непрерывной эксплуатации скважин в период до 2040 г. углекислотная коррозия хвостовиков исключается. При остановках скважин возможно стекание конденсата на забой, однако и в этом случае из-за незначительного содержания водной фазы в газоконденсатной смеси может образоваться эмульсия типа «вода в масле», что также не приведет к протеканию процесса коррозии.

В рамках данного исследования также был проведен анализ влияния количества воды конденсационного происхождения в составе добываемого флюида

Результаты расчета скоростей w^* и w_b показали, что в хвостовике, а тем более в лифтовых трубах на забое каждой из скважин, газожидкостный поток в рассматриваемый период разработки (до 2040 г.) движется в дисперсно-кольцевом режиме с превышением скорости w_b более чем на порядок (табл. 5).

на смещение границы перехода воды в двухфазное состояние. Моделирование фазового поведения газоконденсатной смеси осуществлялось для компонентно-фракционного состава, приведенного в табл. 1, для которого изменялось удельное содержание конденсационной воды. Результаты расчетов приведены на рис. 5, на котором также показаны термобарические параметры на забое и устье скважины № 1 в 2020 г.

Таблица 6. Сравнение скоростей потока газа в хвостовике со скоростью опрокидывания кольцевой пленки конденсата при двухфазном течении газоконденсатной смеси

Table 6. Comparison of the gas flow rates in the tailpipe with the overturning rate of the annular condensate film in the two-phase flow of the gas-condensate fluid

Год разработки Development year	Скважина/Well					
	1		2		3	
	W_{rev}	W	W_{rev}	W	W_{rev}	W
2020	–	–	–	–	–	–
2030	–	–	0,72	1,17	–	–
2040	1,32	3,75	1,29	2,17	0,86	4,66

Из рис. 5 следует, что увеличение удельного содержания воды смещает границу ее фазового состояния в сторону более высоких температур. При удельном содержании воды свыше $5,7 \text{ г/м}^3$ уже в 2020 г. не исключается появление жидкой водной фазы с образованием эмульсий типа «вода в масле» и возникновение рисков углекислотной коррозии хвостовика из-за возможной инверсии эмульсии при дальнейшем росте содержания воды в продукции и проявлении ее электрической проводимости.

Поэтому мониторинг добычи воды отдельно по рассматриваемым скважинам составляет обязательную часть программы исследовательских работ, а в случае отклонения от проектных значений с резким ростом дебита воды потребуются техническая диагностика состояния хвостовика и проведение повторного моделирования фазового поведения газоконденсатной смеси с учетом актуализированных показателей.

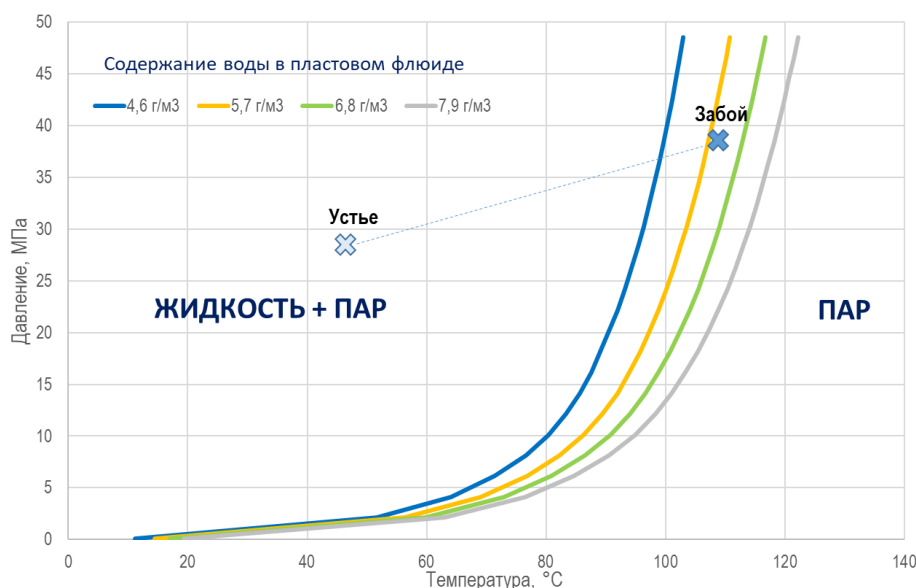


Рис. 5. Смещение границ двухфазной области воды, содержащейся в газоконденсатной смеси скважины № 1 с компонентно-фракционным составом (табл. 1), при разных удельных содержаниях воды

Fig. 5. Displacement of the two-phase water region boundaries contained in the gas-condensate fluid of well no. 1 with a component-fractional composition (table 1), at different specific water contents

Заключение

Для определения предельных значений термобарических параметров технологических режимов эксплуатации высокотемпературных ачимовских газоконденсатных скважин с содержанием в добываемой продукции диоксида углерода, обеспечивающих физико-химические условия отсутствия электрохимической коррозии забойного оборудования – хвостовиков из углеродистой стали на длительную перспективу, предложен комплексный методический подход, включающий моделирование фазового поведения влажной газоконденсатной смеси на забое и устье скважин и гидродинамический расчет многофазного потока в скважине.

На основе предлагаемого подхода изучено влияние изменения термобарических условий эксплуатации трех опытных скважинах на проектных технологических режимах в процессе разработки газоконденсатной залежи на фазовое поведение пластового флюида в интервале установки незащищенных от углекислотной коррозии хвостовиков с учетом влагосодержания добываемой продукции. Расчеты показали, что в двух из трех скважин из-за некоторого различия исходных составов газа и технологических режимов жидкая углеводородная фаза – нестабильный конденсат начинает выделяться только к двадцатому году эксплуатации, а по одной – к десятому году; при этом формирования жидкой водной фазы в забойных условиях не наблюдается ни по одной из скважин в течение всего прогнозного периода.

Учитывая, что вода не образует химических соединений с углеводородами, и при низкой концентрации в нестабильном конденсате (порядка 0,6 % мольн.) она находится в молекулярно-растворенном состоянии, сконденсированная жидкость не обладает электрической проводимостью. С другой стороны, продуктивные характеристики рассматриваемых трех скважин при проектных технологических режимах и диаметрах

хвостовиков и лифтовых колонн обеспечивают в течение всего прогнозного периода значения скорости восходящего потока пластового флюида, превосходящие критические для полного и непрерывного выноса жидкости (в случае ее образования) на поверхность, т. е. накопления ее на забое не происходит. Физико-химические свойства пластового флюида при высокой температуре пласта и гидродинамические условия на забое и устье каждой из скважин позволяют прийти к заключению о невозможности протекания электрохимической коррозии хвостовиков в течение 20-летнего периода во всех трех скважинах.

Однако в случае значительного превышения удельного содержания конденсационной или иной воды в продукции скважин необходимо предусмотреть проведение мероприятий по технической диагностики состояния хвостовиков и повторное моделирование с учетом отклонений от проектных технологических режимов эксплуатации скважин. Поэтому освоение скважин с хвостовиками из углеродистой стали после операции ГРП необходимо проводить в сжатые сроки, а в процессе ГРП использовать водные растворы с добавкой ингибиторов коррозии либо иные реагенты, не обладающие коррозионной агрессивностью.

Таким образом, предлагаемый подход позволяет:

- обосновывать антикоррозионные режимы на стадии проектирования скважин, когда в проектных решениях возможна замена части подземного оборудования из дорогих коррозионноустойчивых сталей на более дешевые углеродистые стали без снижения уровня надежности и безопасности;
- прогнозировать возможность протекания процессов углекислотной коррозии не только подземного оборудования, но и трубопроводов обвязки скважин и системы сбора газа, выполненных из углеродистой стали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маркин А.Н., Низамов Р.Э. CO₂-коррозия нефтепромыслового оборудования. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2003. – 187 с.
2. Кузнецов В.П. Основные факторы углекислотной коррозии газоконденсатных скважин и их изменение в процессе эксплуатации месторождений: дис. ... канд. техн. наук. – Краснодар, 1974. – 143 с.
3. Легезин Н.Е. Противокоррозионная защита систем добычи, сбора и транспорта природного газа с применением ингибиторов: дис. ... д-ра техн. наук. – М, 1988. – 284 с.
4. Освоение участков ачимовских отложений ООО «Газпром добыча Уренгой» / А.Ю. Корякин, И.В. Игнатов, А.Ю. Неудахин, М.Г. Жариков, С.А. Скрылев, А.Н. Нестеренко, В.П. Тюрин // Научный журнал российского газового общества. – 2017. – № 3. – С. 21–28.
5. Курчиков А.Р., Бородкин В.Н., Хромцова А.В. Условия формирования и атлас текстур пород ачимовского комплекса севера Западной Сибири. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, Зап.-Сиб. фил. ин-та нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 2010. – 130 с.
6. Корякин А.Ю., Кобычев В.Ф. Перспективные направления развития Уренгойского комплекса // Сборник научных трудов ООО «Газпром добыча Уренгой». – М.: ООО «ИД Недр», 2018. – С. 350–355.
7. Yusupov A. Mathematical simulation of the rate of carbon dioxide corrosion at the facilities of Gazpromdobycha Urengoy LLC // E3S Web of Conferences. – 2019. – V. 121. – P. 1–5.
8. Koriakin A. Carbon dioxide corrosion at the objects of the second district of Achimovsk deposits of Urengoy oil and gas bearing complex // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. – 2018. – V. 9. – P. 1073–1080.
9. Опыт подбора ингибиторов коррозии для защиты от углекислотной коррозии объектов второго участка ачимовских отложений Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения / А.Ю. Корякин, Д.В. Дикамов, И.В. Колинченко, А.Д. Юсупов, Д.Н. Запелов, Р.К. Вагалов // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2018. – № 6. – С. 48–55.
10. Совершенствование конструкций скважин на ачимовские залежи Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения / А.Ю. Корякин, М.Г. Жариков, И.А. Яскин, С.А. Скрылев, Р.П. Гресько // Газовая промышленность. – 2017. – № 9. – С. 76–79.
11. Скорчеллетти В.В. Теоретическая электрохимия. – Л.: Госхимиздат, 1963. – 609 с.
12. Modeling binary mixtures of water + light hydrocarbon using the perturbed-chain statistical associating fluid theory with induced association: improvement in describing all equilibrium phases / P.T. Sugata, S.K. Jeffrey, D.V. Steven, M.L. Rosaly // ACS Earth and Space Chemistry. – 2019. – V. 3. – Iss. 11. – P. 2569–2581.
13. Soave G. Equilibrium constants from a modified Redlich–Kwong equation of state // Chemical Engineering Science. – 1972. – V. 27. – P. 1197–1203.
14. Li C., Jia W., Wu X. Application of Lee–Kesler equation of state to calculating compressibility factors of high pressure condensate gas // Energy Procedia. – 2012. – V. 14. – P. 115–120.
15. Peng D.Y., Robinson D.B. A new two-constant equation of state // Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals. – 1976. – V. 15. – P. 59–64.
16. Robinson D.B., Peng D.Y., Chung S.Y. The development of the Peng–Robinson equation and its application to phase equilibrium in a system containing methanol // Fluid Phase Equilibria. – 1985. – V. 24. – P. 25–41.
17. Модификация кубических уравнений Пенга–Робинсона и Брусилковского для описания поведения воды и метанола / Ю.В. Калиновский, А.В. Минеев, А.И. Пономарев // Нефтегазовое дело. – 2006. – Т. 4. – № 1. – С. 293–297.
18. Пономарев А.И., Калиновский Ю.В. Комплексообразование газоконденсатных и гидродинамических исследований скважин для определения характеристик многофазного потока // Наука и техника в газовой промышленности. – 2017. – № 2 (70). – С. 7–16.
19. High pressure phase behavior modeling of asymmetric alkane + alkane binary systems with the RKPR EOS / M.D. Cismondi, M.V. Galdo, M.J. Gomez, N.G. Tassin, M. Yanes // Fluid Phase Equilibria. – 2014. – V. 362. – P. 125–135.
20. Калашников О.В. Моделирование фазового поведения углеводородов: выбор уравнения состояния // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2003. – № 1. – С. 22–30.
21. Lopez-Echeverry J., Reif-Acherman S., Araujo-Lopez E. Peng–Robinson equation of state: 40 years through cubics // Fluid Phase Equilibria. – 2017. – V. 447. – P. 39–71.
22. Peng D.Y., Robinson D.B., Bishnoi P.R. The use of the Soave–Redlich–Kwong equation of state for predicting condensate fluid behavior // 9th World Petroleum Congress. – Tokyo, 1975. – P. 1–12.
23. Literature review on modeling and simulation of energy infrastructures from a resilience perspective / J. Wanga, W. Zuo, L. Barbarigos, X. Lu, J. Wang, Y. Lind // Reliability Engineering & System Safety. – 2019. – V. 183. – P. 360–373.
24. Движение газоидкостных смесей в трубах / В.А. Мамаев, Г.Э. Одишария, О.В. Клапчук, А.А. Точивин, Н.И. Семенов. – М.: Недра, 1978. – 270 с.

Поступила: 29.07.2020 г.

Информация об авторах

Пономарев А.И., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой разработки и эксплуатации газовых и нефтегазоконденсатных месторождений Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Иванов Н.В., аспирант кафедры машин и оборудования нефтяной и газовой промышленности Российского государственного университета нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина.

Юсупов А.Д., аспирант кафедры разработки и эксплуатации газовых и нефтегазоконденсатных месторождений Уфимского государственного нефтяного технического университета.

UDC 622.279, 620.193

NEW METHODOLOGICAL APPROACH TO THE CO₂-CORROSION ESTIMATION OF HIGH-TEMPERATURE GAS-CONDENSATE WELLS EQUIPMENT

Alexander I. Ponomarev¹,
pnmrv@mail.ru

Nikolay V. Ivanov²,
inv1412@yandex.ru

Alexander D. Yusupov¹,
aleksandr_yusupov@list.ru

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

² Gubkin Russian State University of Oil and Gas,
65, Leninsky avenue, Moscow, 119991, Russia.

The relevance. The prospects for increasing gas condensate – valuable raw material for oil refining and petrochemicals, are largely associated with the further development of the achimov gas condensate deposits in the north of Western Siberia. Large depths, abnormally high reservoir pressure and high temperature of low-productivity formations, along with the presence of carbon dioxide in the gas-condensate formation fluid, put forward, first of all, increased demands on the quality of well completion and hydraulic fracturing operations, the reliability of structures and materials of underground well equipment. These factors are responsible for the high cost of project implementation and operational risks of gas and condensate production, and therefore justification of safe operating conditions for achimov is an urgent scientific and technical task.

The main aim of the research is the limiting thermobaric parameters determination of the technological operating modes of the achimov gas condensate wells, taking into account the production of CO₂ in products.

Objects: reservoir gas-condensate fluid and bottomhole equipment of three achimov gas-condensate wells with carbon steel tailpipes, unstable to CO₂-corrosion.

Methods: modeling the phase behavior of the produced reservoir fluid in bottomhole conditions by the GasCondNefit software.

Results. Phase behavior thermodynamic calculations of the reservoir fluid, taking into account its moisture content, showed that a reservoir pressure decrease at the location of the three considered wells during the development of the achimov deposits for 20 years under project operation modes leads to the formation of a two-phase fluid (gas-unstable condensate) in bottomhole thermobaric conditions. Moreover, the aqueous liquid phase due to the high temperature of the flow at the well bottomhole is not formed during the entire calculation period. Hydrodynamic parameters calculations of the gas-liquid upward flow showed that high flow rates of well products provide conditions for the complete and continuous removal of unstable condensate by the gas flow from the bottom to the surface of all considered wells for the entire 20-year period, thereby preventing the physical and chemical conditions of electrolyte formation on tailpipes surface and carbon dioxide corrosion.

Key words:

Gas condensate fluid, carbon dioxide, tailpipe, well operation parameters, simulator, phase diagrams, water and hydrocarbon dew point lines, multiphase flow regime, carbon dioxide corrosion, anticorrosive well operation.

REFERENCES

- Markin A.N., Nizamov R.E. *CO₂-korroziya neftepromyslovogo oborudovaniya* [CO₂-corrosion of oilfield equipment]. Moscow, VNIIOENG Publ., 2003. 187 p.
- Kuznetsov V.P. *Osnovnye factory uglekislotnoy korrozii gazokondensatnykh skvazhin i ilh izmenenie v protsesse ekspluatatsii mestorozhdeniy* Dis. Kand. nauk [Main factors of carbon dioxide corrosion of gas condensate wells and their changes during field operation. Cand. Diss.]. Krasnodar, 1974. 143 p.
- Legezin N.E. *Protivokorroziionnaya zashchita sistem dobychi, sbora i transporta prirodnogo gaza s primeneniem ingibitorov*. Dis. Dokt. nauk [Corrosion protection of natural gas production, gathering and transportation systems using inhibitors. Dr. Diss.]. Moscow, 1988. 284 p.
- Koryakin A.Yu., Ignatov I.V., Neudakhin A.Yu., Zharikov M.G., Skrylev S.A., Nesterenko A.N., Tyurin V.P. Development of blocks of achimov deposits Gazprom dobycha Urengoy LLC. *Nauchny zhurnal rossiysskogo gazovogo obshchestva*, 2017, no. 3, pp. 21–28. In Rus.
- Kurchikov A.R., Borodkin V.N., Khromctsova A.V. *Usloviya formirovaniya i atlas tekstur porod achimovskogo kompleksa severa Zapadnoy Sibiri* [Formation conditions and atlas of rocks of the Achimov complex textures in the north of Western Siberia]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2010. 130 p.
- Koryakin A.Yu., Kobychev V.F. Perspektivnye napravleniya razvitiya Urengoysskogo kompleksa [Prospective directions of development of the Urengoy oil and gas complex]. *Sbornik nauchnykh trudov OOO «Gazprom dobycha Urengoy»* [Collection of research papers of Gazprom dobycha Urengoy LLC]. Moscow, Nedra Publ., 2018. pp. 350–355.
- Yusupov A. Mathematical simulation of the rate of carbon dioxide corrosion at the facilities of Gazprom dobycha Urengoy LLC. *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 121, pp. 1–5.
- Koriakin A. Carbon dioxide corrosion at the objects of the second district of Achimovsk deposits of Urengoy oil and gas bearing complex. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2018, vol. 9, pp. 1073–1080.
- Koryakin A.Yu., Dikamov D.V., Kolinchenko I.V., Yusupov A.D., Zapevalov D.N., Vagapov R.K. Experience of corrosion inhibitors selection to protect the objects of the second site of achimovsk deposits of Urengoy oil and gas-condensate field from carbon acid corrosion. *Equipment and technologies for oil and gas complex*, 2018, no 6, pp. 48–55. In Rus.
- Koryakin A.Yu., Zharikov M.G., Yaskin I.A., Skrylev S.A., Gresko R.P. Improving the well design of the Achimovsk deposit of the

- Urengoy oil and gas condensate field. *Gas Industry*, 2017, no. 9, pp. 76–79. In Rus.
11. Skorochelletti V.V. *Teoreticheskaya elektrokimiya* [Theoretical electrochemistry]. Leningrad, Goskhimizdat Publ., 1963. 609 p.
 12. Sugata P.T., Jeffrey S.K., Steven D.V., Rosaly M.L. Modeling binary mixtures of water + light hydrocarbon using the perturbed-chain statistical associating fluid theory with induced association: improvement in describing all equilibrium phases. *ACS Earth and Space Chemistry*, 2019, vol. 3, pp. 2569–2581.
 13. Soave G. Equilibrium constants from a modified Redlich–Kwong equation of state. *Chemical Engineering Science*, 1972, vol. 9, pp. 1197–1203.
 14. Li C., Jia W., Wu X. Application of Lee–Kesler equation of state to calculating compressibility factors of high-pressure condensate gas. *Energy Procedia*, 2012, vol. 14, pp. 115–120.
 15. Peng D.Y., Robinson D.B. A new two-constant equation of state. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1976, vol. 15, pp. 59–64.
 16. Robinson D.B., Peng D.Y., Chung S.Y. The development of the Peng–Robinson equation and its application to phase equilibrium in a system containing methanol. *Fluid Phase Equilibria*, 1985, vol. 24, pp. 25–41.
 17. Kalinovskiy Yu.V., Mineev A.V., Ponomarev A.I. Modification of the Peng–Robinson and Brusilovsky cubic equations to describe the behavior of water and methanol. *Oil and gas business*, 2006, vol. 1, pp. 293–297. In Rus.
 18. Ponomarev A.I., Kalinovskiy Yu.V. Integration of gas condensate and hydrodynamic studies of wells to determine the characteristics of multiphase flow. *Science and Technology in the Gas Industry*, 2017, no. 2, pp. 7–16. In Rus.
 19. Cismondi M.D., Galdo M.V., Gomez M.J., Tassin N.G., Yanes M. High pressure phase behavior modeling of asymmetric alkane + alkane binary systems with the RKPR EOS. *Fluid Phase Equilibria*, 2014, vol. 362, pp. 125–135.
 20. Kalashnikov O.V. Modeling the phase behavior of hydrocarbons: the choice of the equation of state. *Ecotechnology and resource saving*, 2003, vol. 1, pp. 22–30. In Rus.
 21. Lopez-Echeverry J., Reif-Acherman S., Araujo-Lopez E. Peng–Robinson equation of state: 40 years through cubics. *Fluid Phase Equilibria*, 2017, vol. 447, pp. 39–71.
 22. Peng D.Y., Robinson D.B., Bishnoi P.R. The use of the Soave–Redlich–Kwong equation of state for predicting condensate fluid behavior. *IX World Petroleum Congress*. Tokyo, 1975. pp. 1–12.
 23. Wanga J., Zuo W., Barbarigos L., Lu X., Wang J., Lind Y. Literature review on modeling and simulation of energy infrastructures from a resilience perspective. *Reliability Engineering & System Safety*, 2019, vol. 183, pp. 360–373.
 24. Mamaev V.A., Odishariya G.E., Klapchuk O.V., Tochivin A.A., Semenov N.I. *Dvizhenie gazozhidkostnykh smesey v trubakh* [The movement of gas-liquid mixtures in pipes]. Moscow, Nedra Publ., 1978. 270 p.

Received 29 July 2020.

Information about the authors

Alexandr I. Ponomarev, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University.

Nikolay V. Ivanov, postgraduate student, Gubkin Russian State University of Oil and Gas.

Alexandr D. Yusupov, postgraduate student, Ufa State Petroleum Technological University.

УДК 622.276:681.5

РЕСУРСНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБУСТРОЙСТВА СКВАЖИН С ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОЙ ПОДАЧЕЙ НАСОСА

Соловьев Илья Георгиевич^{1,2},
solovyev@ikz.ru

Константинов Иван Владимирович¹,
ivkonstantinov95@yandex.ru

Говорков Денис Александрович¹,
dagovorkov@mail.ru

¹ Тюменский Индустриальный университет,
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

² Федеральный исследовательский центр «Тюменский научный центр» СО РАН,
Россия, 625026, г. Тюмень, ул. Малыгина, 86.

Актуальность исследования связана с вопросами повышения эффективности процессов эксплуатации скважин, обустроенных электроцентробежным насосом, на основе оптимального выбора технического режима, частотного режима и параметров обустройства подъемника силовой установкой по критерию прибыли, доставляемой парой «насос–двигатель» на полном жизненном цикле ее эксплуатации. Учет возможной изменчивости условий эксплуатации осуществляется регулировкой критерия по показателю горизонта планирования.

Цель: формализация задачи оптимального выбора технологического режима, частоты питающего напряжения и параметров обустройства скважины с электроцентробежным насосом с одновременным учётом прямых энергетических затрат и косвенных факторов ускоренного износа в стационарных условиях работы с регулируемым горизонтом планирования.

Объекты: скважина, оборудованная электроцентробежным насосом.

Методы: материального и теплового балансов, гидростатики, линеаризованной кинетики потерь напора в сегментах подъемника, численного интегрирования и анализа нелинейных систем, типовой формализации задач оптимизации принятия решений.

Результаты и выводы. Учет главных факторов ускоренного износа в критерии прибыли расширяет круг определенных оптимальных решений, упреждая завышенные выборы начальной производительности фактом сокращения суммарной прибыли полного жизненного цикла эксплуатации электроцентробежного насоса. Проблема возможной изменчивости условий эксплуатации в схеме вывода стационарных оптимальных решений частично учитывается введением в критерий показателя горизонта планирования. Снижение энергоэффективности работы электроцентробежного насоса на смещённых частотах указывает, что «видимые свободы» частотной регулировки имеют цену своего использования, вследствие чего выбираемые частоты оптимальных решений длительных периодов эксплуатации приближаются к синхронной частоте с максимальным коэффициентом полезного действия работы центробежного насоса. Предложенное термобарическое и энергетическое описание равновесных состояний системы с учётом факторов динамики освоения ресурса электроцентробежного насоса позволяет использовать упрощенные модельные решения как первичную основу последующего построения адаптивных автоматизированных регламентов операционного контроля и управления в условиях неопределённости.

Ключевые слова:

Модели, цели, алгоритмы, осложняющие факторы, темпоральная иерархия управления, гидростатика, электроцентробежный насос, эксплуатационный ресурс.

Введение

Назначение технологических режимов эксплуатации скважин и их обеспечение посредством выбора параметров обустройства погружными электроцентробежными насосами (ЭЦН) – одна из важнейших задач управления процессами нефтедобычи [1–5]. Именно данный вопрос на практике реализует связь между заложенными показателями проекта разработки, т. е. «желаниями» и ресурсно-технологическими «возможностями» действующих производств. Задача выбора проста: из упорядоченного по мощности ряда $j \in J$ производимых погружных асинхронных электродвигателей [6, 7] (ПЭД) и центробежных насосов (ЦН) необходимо скомплектовать пару (типоразмер ЭЦН) по номинальной производительности q^0 , [м³/сут],

напору h^0 [м] (метры водяного столба) и мощности на валу $P_2^0(j)$, [кВт] такую, что в условиях данной скважины выбранная силовая установка обеспечит желаемый (чаще максимальный) уровень производительности q на возможно большем периоде времени эксплуатации $t \in [0, T]$. Длительность периода наработки на отказ T зависит от комфортных условий работы ЭЦН, что при выбранном q регулируется глубиной подвески H_N и условием $q^0 \approx q$, когда достигается максимальный коэффициент полезного действия (КПД) ЦН. Решение данной задачи для разных конструкций ствола, пластово-скважинных условий неоднозначно и в значительной степени осложнено факторами изменчивости и неопределённости условий эксплуатации, что может оцениваться по разным критериям эффективности.

Главные ограничения в ныне действующих методиках выбора технологического режима, а по сути, начальной производительности $q(0)$, и параметров обустройства – $\langle h^0, q^0, P_2^0(j), H_N \rangle$ с целевой уставкой достижения максимальной продуктивности [8, 9] связываются с конструктивными характеристиками ствола скважины (диаметр, прочность, кривизна), ограничениями на нагрев ПЭД и сверхлимитным проявлением свободного газа на первой ступени насоса. Однако в рамках такого подхода не учитывается влияние режимных условий эксплуатации на динамику освоения эксплуатационного ресурса и, как следствие, на период наработки на отказ T . В длительной перспективе результат выбора с обеспечением максимума начальной производительности не видится столь убедительным. Задача оптимального выбора ещё более усугубляется в условиях действий осложняющих факторов (износы, засорения, снижение продуктивности притока и в целом изменчивость пластовых условий), приводящих к падению производительности и скоротечным отказам ЭЦН. Учёт осложнений особенно важен, если их интенсивность есть прямое следствие выбора завышенной начальной производительности $q(0)$. Результаты оптимального выбора по критерию прибыли на полном жизненном цикле работы ЭЦН в условиях осложнений, изложенные в [10], подтверждают, что обоснованность и качество обновлённого подхода заметно выше.

В то же время при изменчивости характеристик пласта, производственных условий и в целом конъюнктуры рынка нефтепродуктов однократный выбор параметров обустройства на длительные горизонты планирования не столь эффективен. Результаты планирования по данным начала эксплуатации при наличии нестационарностей со временем теряют актуальность. В этой связи горизонт планирования T_p следует также переводить в разряд регулируемых параметров. Учёт периода наработки, его зависимость от искомым параметров обустройства обобщает схему оптимального выбора с разными горизонтами планирования.

Оснащение ЭЦН средствами частотного регулирования подачи [11–13] существенно расширяет потенциалы управляемости процессов добычи в условиях неопределённости. Арсенал методов частотного управления, стабилизирующего режимные условия эксплуатации погружного оборудования, широк и напрямую связан с многообразием первопричин действующих осложнений. Однако удобная и актуальная для предприятий нефтепрома технология частотно-регулируемых отборов имеет свои ограничения и «цену» использования. Речь идёт о снижении показателей надёжности и энергоэффективности работы ЭЦН на смещённых частотах [14–16]. Кроме того, введение частотного регулирования никак не снимает проблему оптимизации начального выбора параметров обустройства, что обсуждается далее.

Цели исследования

- Формализация задачи оптимального выбора технологического режима q , частотного режима ω и

параметров обустройства – $\langle h^0, q^0, P_2^0(j), H_N \rangle$ скважины с ЭЦН с одновременным учётом прямых энергетических затрат и косвенных факторов ускоренного износа в стационарных условиях эксплуатации с регулируемым горизонтом планирования.

- Сравнительный анализ экономических показателей и результатов оптимального синтеза для кратковременных и длительных периодов планирования.
- Представление минимального состава моделей ресурсно-энергетического описания равновесных частотно-регулируемых термобарических процессов скважины с ЭЦН, адаптированных под широкий круг операционных задач контроля и регулирования в режиме реального времени.

Целевое условие

В основу анализа положена следующая задача.

Для заданного параметрического описания термобарометрической модели скважины [17, 18], работающей в стационарных условиях эксплуатации (т. е. при отсутствии дрейфующих осложнений), определить тех. режим q , параметры типоразмера насоса – $\langle h^0, q^0 \rangle$, двигателя $P_2^0(j)$ глубину подвески ЭЦН H_N и частотный режим $\omega(k)$, при которых достигается максимальная ресурсно-энергетическая эффективность эксплуатации, что отражается записью (1):

$$x_* = \arg \max J(x), \quad x \in X, \quad (1)$$

где $x = [j \ k \ q \ H_N]^T$ – искомый вектор настроек с областью допустимых значений X , которая определяется следующим образом:

- $j \in J = \{1, \dots, m\}$ – номера типоразмеров ПЭД, индексированных в порядке возрастания номинальной мощности на валу $P_2^0(j) < P_2^0(j+1)$;
- $k \in K = \{0, 1, 2, \dots, 400\}$ – номера узлов дискретной сетки относительных частот $\omega(k+1) = \omega(k) + k\Delta\omega$, т. е. $\omega(k) = \Omega(k)/\Omega_0$, где $\omega(0) = 0,5$, $\Delta\omega(0) = 0,002$, что эквивалентно шагу в 0,1 Гц [19]; $\Omega_0 = 50$ [Гц] – несущая частота питающего напряжения в линии, а $\Omega(k) \in [25; 65]$ [Гц] – регулируемое множество значений частот питающего двигателя напряжения. Отметим, что для несущей частоты, в рамках введённых определений, выполнено: $k = \arg\{\omega(k) = 1\} = 250$;
- $H_N \in [\underline{H}_N(q), \overline{H}_N]$, где минимальный уровень заглубления для заданной производительности q определяется условием:

$$\underline{H}_N(q) = \arg \left\{ \left(\beta_{GN} \leq \beta^{LM} \right) \wedge \left(h(4) \geq h^{LM} \right) \right\}, \quad (2)$$

в котором β_{GN} – объёмная доля свободного газа у первой ступени насоса, а $h(4)$ – уровень столба жидкости над приёмом насоса в затрубном пространстве [20]; $\beta^{LM} \approx 0,25$, $h^{LM} \approx 100$ м – используемые в расчётах ограничения [10]. Максимально-допустимое заглубление $\overline{H}_N < H_R$ определяется конструктивными параметрами ствола скважины по диаметру и кривизне.

Как следует из (1), последующий анализ сводится к решению четырёхмерной задачи на максимум.

Формализация целевого условия [21–23] в задачах оптимального конструирования есть попытка сведения многоаспектных и значимых факторов поведения синтезируемой системы к единой ценностной шкале. Решение подобных вопросов не всегда однозначно, но всегда актуально при определении наилучшего технического решения. Введение целевого показателя имеет важное предназначение, т. к. позволяет сопоставлять любые конкурентные решения и вычислять наилучшие (оптимальные) решения, которые по смыслу построения в рамках принятых моделей и ограничений уже не могут быть улучшены.

Конструкция целевого показателя $J(x)$ должна быть универсальной по построению и отражать принятые в предметной области организационные, экономические, технологические и прочие эффекты принимаемых решений. Широко используемая на практике схема построения критерия прибыли вполне соответствует смыслу оптимального выбора при разной детализации учёта факторов доходности и затрат на разных этапах и уровнях управления. Именно по такой схеме выделена главная часть суточной прибыли:

$$\Delta J(x) = c_1(1 - \beta)q - c_2q - c_3P_1(x) \quad (3)$$

в общем показателе суммарной прибыли полного жизненного цикла работы ЭЦН T

$$J(x) = T\Delta J(x) - c_4E_N^0(x) - (c_{50} + c_{51}H_N). \quad (4)$$

Единственная доходная часть бюджета в (3) определяется сниженной для каждого предприятия за счет акцизов, налогов и прочих отчислений ценою c_1 продажи суточного объёма добычи нефти $(1 - \beta)q$, где β – показатель обводнённости.

Прямые капитальные и эксплуатационные затраты учитываются следующими показателями:

- c_2 – средняя для предприятия цена эксплуатационных затрат на добычу суточного объёма жидкости q за вычетом индивидуального энергопотребления ЭЦН;
- c_3 – цена энергетических затрат ЭЦН на суточный объём добычи жидкости;
- $c_4E_N^0(x)$ – стоимость приобретаемого полезного энергетического ресурса $E_N^0(j) = q^0 h^0 T^0$, где T^0 – прогноз периода наработки в номинальных условиях эксплуатации, что в совокупности определяет стоимость владения силовой установкой;
- $c_{50} + c_{51}H_N$ – стоимость работ на демонтаж откатившей и монтаж новой установки.

Косвенные затраты, отражающие динамику ускоренного механического износа и старения изоляции ЭЦН, учитываются снижением периода наработки. Соответствующую модель риска отказа введём равенством

$$T(x) = \frac{T^0}{1 + E_\Sigma(x)}, \quad (5)$$

где T^0 – потенциальный период наработки в номинальных условиях эксплуатации ЭЦН, а долевой показатель ускоренного старения есть суммарное действие нормированных режимных факторов износа

$$E_\Sigma(x) = a_1E_p(x) + a_2E_\theta(x) + a_3E_U(j, k) + a_4\frac{q}{q^0}E_H(H_N) \quad (6)$$

с ранжированными настройками долей влияния – a_1, a_2, a_3, a_4 .

Учитывая изменчивость условий эксплуатации, актуальность стратегии управления с длительным горизонтом полного жизненного цикла ЭЦН (1)–(5) со временем снижается. Поэтому наряду с критерием (3), (4) введём целевой показатель для укороченного горизонта планирования:

$$J(x | \tau_p) = \frac{\tau_p}{\left(1 + \frac{\tau_p}{T^0} E_\Sigma(x)\right)} \Delta J(x) - \frac{\tau_p}{T^0} c_0(x), \quad (7)$$

где регулируемый параметр $\tau_p \in [0, T^0]$ пропорционален периоду планирования T_p , но не равен ему. Введение

характеристики $\frac{\tau_p}{T^0}$ снижает в целевом показателе долю учёта факторов ускоренного износа и затрат на подземный ремонт $c_0(x) = c_4E_N^0(x) + (c_{50} + c_{51}H_N(x))$ при переходе на укороченные сроки планирования. Заметим, что при $\tau_p = T^0$ показатель (7) совпадает с исходным критерием оптимальности (4) полного жизненного цикла (ПЖЦ) с горизонтом планирования T_p , равным периоду наработки (5).

Наряду с показателями (4), (7) введём показатель прибыли на заданном укороченном периоде планирования T_p следующим соотношением:

$$J_p(x) = T_p \Delta J(x) - \frac{T_p(1 + E_\Sigma(x))}{T^0} c_0(x), \quad (8)$$

на множестве решений $X(T_p) \subset X$ определённых условием

$$X(T_p) = \left\{ x : T_p \leq T^0 / (1 + E_\Sigma(x)) \right\},$$

то есть выделяются только те допустимые точки решений $x \in X$, на которых прогнозируемый период наработки не ниже заявленного периода планирования T_p .

Согласно (6) выделяются четыре главных режимных фактора динамики ускоренного освоения ресурса ЭЦН.

- Фактор ускоренного механического износа ЭЦН на повышенных оборотах и нагрузках будем оценивать по выражению:

$$E_p(x) = \left(\frac{P_2(x)}{P_2^0(j)} - 1 \right)_+ + \left(\frac{N_1(x)}{N_1^0(x)} - 1 \right)_+,$$

где $P_2^0(j)$ – номинал полезной нагрузки для j -го типоразмера ПЭД; $N_1^0(x)$ – номинал потребления выбранного типоразмера ЦН при частоте вращения вала $\omega_N(j, k) = 1$; $P_2(x) = N_1(x)$ – мощность на валу двигателя, равная нагрузке, создаваемой ЦН с производительностью q при чуть сниженной частоте вращения вала:

$$\omega_N(j, k) = (1 - s(j, k))\omega(k) \quad (9)$$

вследствие скольжения $s(j, k)$ для двигателя j -го типоразмера.

- Фактор ускоренного старения изоляции ПЭД из-за перегрева [9, 24, 25] будем оценивать по выражению

$$E_{\theta}(\theta_p(x)) = \left[(\theta_p(x) - \theta_{p1})_+ + \alpha_{\theta 1} (\theta_p(x) - \theta_{p2})_+ \right] / \theta_{p+},$$

где $\theta_{p1}, \theta_{p2}, \alpha_{\theta 1}$ – настроечные параметр.

В интервале теплообмена ПЭД $\Delta H_p(j)$ на глубине подвески ЭЦН H_N модель тепловых балансов [17] между ПЭД, омывающим потоком газожидкостной смеси (ГЖС) и окаймляющими горными породами может быть представлена системой уравнений вида

$$\begin{aligned} (1 + \alpha_1 q) \theta(2) &= \theta_H(3) + \alpha_1 q \cdot \theta_R, \\ \left(1 + \alpha_3 \frac{q}{\Delta H_p} \right) \theta(3) &= \theta_H(3) + \alpha_3 \frac{q}{\Delta H_p} \theta(2) + b_p \frac{\delta P_p}{\Delta H_p}, \\ \theta_p &= \theta(3) + \frac{b_D}{v_D} \frac{\delta P_p}{\Delta H_p}, \end{aligned}$$

где θ_R – температура жидкости на забое скважины; $\theta_H(3) \approx \alpha_N H_N$ – температура горных пород по геотермали на глубине подвески; $\theta(2), \theta(3)$ – температуры жидкости ниже ПЭД и в интервале его теплообмена ΔH_p ; $\theta_p = \theta_p(x)$ – искомая температура нагрева ПЭД. Энергетические потери ПЭД – $\delta P_p = \delta P_p(x) = P_1(x) - P_2(x)$, и доля, идущая на нагрев, – $\mu_p \delta P_p(x)$, где $P_1(x)$ – активная мощность потребления двигателем j -го типоразмера на частоте $\omega(k)$ под нагрузкой насоса с производительностью q .

В приведённых выражениях принято:

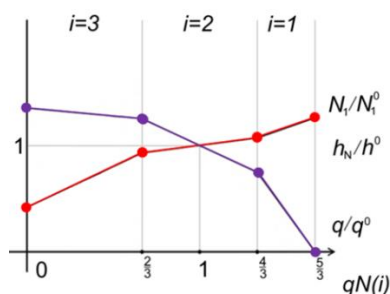
$$\begin{aligned} \alpha_3 &= c_{\beta} / \lambda_G, \quad \alpha_1 = \alpha_3 / (H_R - H_N), \\ b_p &= \mu_p / \lambda_G, \quad b_D = \mu_p / \lambda_D, \end{aligned}$$

где c_{β} – теплоёмкость восходящего потока ГЖС; λ_G – теплопередача пары «горные породы – жидкость»; λ_D – теплопередача пары «омывающая жидкость – корпус ПЭД»; $\lambda_{DG} = \lambda_D v_D$ – та же теплопередача, но сниженная в $v_D = 1 - a_{D1}(\beta_G(3) - \beta_{D1})_+$ раз вследствие разгазирования нефти с объёмной долей газа у приёма $\beta_G(3)$. Здесь a_{D1} и β_{D1} – параметрические настройки функции снижения.

- Фактор риска пробоя изоляции от перенапряжения частотно управляемого ПЭД с пропорциональным законом регулирования входного напряжения

$$U_1(j, k) = \omega(k) U_1^0(j) \quad (10)$$

будем учитывать выражением



i	1	2	3
qN	5/3	4/3	2/3
λ_0	10/3	2	3/2
λ_1	2	1	1/4
λ_2	0,0087	0,82	0,74
λ_3	0,79	0,18	0,3

Рис. 1. Нормированные кусочно-линейные графики механических характеристик насоса по напору и потребляемой мощности

Fig. 1. Normalized piecewise linear charts of pump's mechanical characteristics of head and power consumption

$$E_U(j, \omega(k)) =$$

$$= \frac{1}{\omega_+} (1 + \alpha_{U0}(j - j_U)_+) (\omega(k) - 1)_+ + \alpha_{U1} (\omega(k) - \omega_U)_+,$$

где настраиваемые коэффициенты $\alpha_{U0}, \alpha_{U1}, j_U, \omega_U, \omega_+$ связаны с классом изоляции [26] исполнения ПЭД. Здесь $U_1^0(j)$ – номинальное для j -го типоразмера напряжение питания при $\omega(k)=1$, а $U_1(j, k)$ – фазное питающее напряжение ПЭД на смещённой частоте $\omega(k) = \Omega(k) / \Omega_0 \neq 1$.

- Фактор ускоренного износа от заглубления отражает последствия упруго-пластичных изгибов силового агрегата плюс механические повреждения изоляции силового кабеля при спуске в зависимости от набора угла кривизны ствола скважины. Упрощённое описание модели фактора заглубления вводится выражением:

$$E_H(H_N) = \frac{1}{H_+} \sum_i \alpha_{H1} (H_N - H_i)_+,$$

где α_{H1} – меры приращения угла кривизны ствола скважины с дискретными отметками возрастающих глубин H_i .

Модели

Поиск оптимального решения в задаче (1), (4)–(10) основан на введении

- \mathcal{P}_1 – барометрической модели скважины;
- \mathcal{P}_2 – энергетической модели насоса;
- \mathcal{P}_3 – энергетической модели частотно управляемого ПЭД с пропорциональным законом регулирования (9) фазного напряжения.

Воспользуемся упрощённым описанием комплексной барометрической модели скважины \mathcal{P}_1 [10, 11], объединяющей модель подъёмника и притока:

$$\begin{cases} q = \frac{h^0 \omega_N^2 \lambda_0(i) - H_R + (p(1) - p_L) / \gamma}{\omega_N \frac{h^0}{q^0} \lambda_1(i) + r_U + r_N + r_K}; \\ q = w_R \frac{p(1)(p_R - p(1))}{p(1) + \mu_R(1)(p_{GO} - p(1))_+}, \end{cases} \quad (11)$$

включая нормированную кусочно-линейную аппроксимацию напорной характеристики насоса (рис. 1)

$$\frac{h_N}{h^0} = \omega_N \left(\omega_N \lambda_0(i) - \frac{q}{q^0} \lambda_1(i) \right). \quad (12)$$

В условиях (11) давление и доля свободного газа у приёма насоса оцениваются выражениями

$$p(3) = p(1) - \gamma(H_R - H_N + r_K q),$$

$$\beta_G(3) = \frac{\mu_R(3)(p_{GO} - p(3))_+}{p(3) + \mu_R(3)(p_{GO} - p(3))_+},$$

где $p_R, p(1), p(3), p_L$ – распределение давлений [МПа] по вертикали подъёмника, начиная от пластового, забойного на уровне H_R [м], давления у приёма насоса на уровне подвески H_N и в устьевом нефтесборнике; γ – удельный вес ГЖС, средний по стволу подъёмника [МПа/м]; h_N – напор, создаваемый насосом [м]; $w_R=1/r_R$ – коэффициент продуктивности притока [м³/МПа сут]; r_R – гидросопротивление притока; $r_1=r_K+r_N+r_U$ – суммарное гидросопротивление линеаризованной модели подъёмника, эквивалентное потерям напора в его сегментах, включая низ обсадной колонны, НКТ, устьевой штуцер, [сут/м²]; i – номер сегмента ломаной напорной характеристики определяемый условием

$$i = \arg \left\{ \frac{q}{q^0} \in \omega_N[qN(i+1), qN(i)] \right\},$$

где $q_N(i), \lambda_0(i), \lambda_1(i), \lambda_2(i), \lambda_3(i)$ – параметры модели нормированных напорной и мощностной характеристик (сведены в таблицу на рис. 1). Комплексный параметр модели разгазирования на уровне забоя и приёма насоса оцениваются выражением

$$\mu_R(i) = (1 - \beta)G \frac{\alpha_G(i)p_0}{p_{GO} - p_0}, \quad i \in \{1, 3\},$$

где G – газовый фактор нефти; p_{GO} – давление насыщения; $p_0 \approx 0,1$ МПа – давление атмосферное; $\alpha_G(i)$ – настроечные параметры доли разгазирования.

Энергетическая модель насоса \mathcal{P}_2 по аналогии с напорной характеристикой насоса (12) аппроксимируется нормированным кусочно-линейным графиком потребляемой мощности (рис. 1)

$$N_1(x) = \omega_N^2 N_1^0(\omega_N)(1 + \Delta\eta_N(j, k)) \times \left(\omega_N \lambda_2(i) + \frac{q}{q^0(\omega_N)} \lambda_3(i) \right) \quad (13)$$

и отдаваемой, рассчитываемой, согласно (12), (13), по выражению

$$N_2(x) = \gamma q h_N(\omega_N) = \gamma \omega_N q h^0(\omega_N) \left(\omega_N \lambda_0(i) - \frac{q}{q^0(\omega_N)} \lambda_1(i) \right),$$

где режим номинального потребления вводится условием

$$N_1^0(x) = \frac{\gamma}{\eta_N^0} q^0(\omega_N) \cdot h^0(\omega_N).$$

Оценочная модель снижения КПД ЦН на смещённых частотах [27] вводится выражением:

$$\begin{cases} \eta_N(j, k) = \eta_N^0 / (1 + \Delta\eta_N(j, k)), \\ \Delta\eta_N(j, k) = \alpha_{\eta_L}(\omega_{\eta_L} - \omega_N(j, k))_+ + \alpha_{\eta_R}(\omega_N(j, k) - \omega_{\eta_R})_+. \end{cases}$$

Здесь $\alpha_{\eta_L}, \alpha_{\eta_R}$ – настройки, отражающие интенсивность снижения КПД ЦН от номинала η_N^0 за границами зоны «нечувствительности», смещённой под номинал скольжения, например,

$$\partial\omega_\eta = [\omega_{\eta_L}, \omega_{\eta_R}] \approx [0,9, 0,98].$$

Для заданной пары $\langle q, \omega_N \rangle$, согласно (9), выбор параметров типоразмера насоса производится по соотношениям

$$q^0(\omega_N) = \frac{q}{\omega_N}, \quad h^0(\omega_N) = \frac{1}{\omega_N^2} h^0(1),$$

$$h^0(1) = r_1 q + H_R - \frac{1}{\gamma} (p(1) - p_L), \quad (14)$$

где

$$p(1) = \begin{cases} p_R - r_R q, & \text{при } p(1) \geq p_{GO}, \\ 0,5 p_\mu + \sqrt{0,25 p_\mu^2 - \mu_R(1) p_{GO} r_R q}, & \text{иначе,} \end{cases}$$

$$p_\mu = p_R - (1 - \mu_R(1)) r_R q,$$

что обеспечивает КПД ЦН близким к максимуму.

В условиях эксплуатации насоса вблизи номинального режима, в диапазоне сегмента $i=2$ по механическим характеристикам (рис. 1) выполнено условие $\lambda_0(2) - \lambda_1(2) = \lambda_2(2) - \lambda_3(2) = 1$. Тогда определённые выше выражения для мощностей в условиях квазиоптимального выбора (14) принимают более простой вид:

$$N_2(x) = \gamma q h^0(1), \quad N_1(x) = \frac{N_2(x)}{\eta_N(\omega_N)},$$

$$N_1^0(x) = \frac{N_1(x)}{\omega_N^3}. \quad (15)$$

Энергетическая модель ПЭД \mathcal{P}_3 в условиях пропорциональной регулировки напряжения (9), построенная по T-образной схеме замещения [28] асинхронного двигателя (рис. 2), вводится следующими расчётными соотношениями, представленными в комплексной форме.

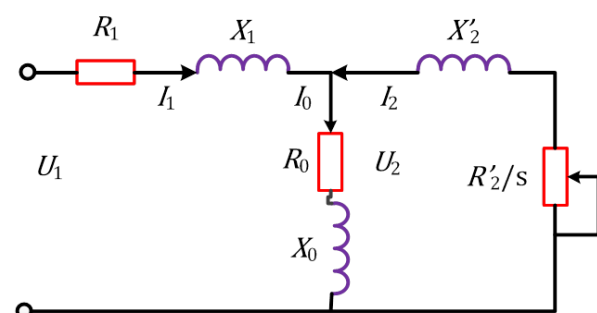


Рис. 2. T-образная схема замещения асинхронного двигателя

Fig. 2. T-shaped equivalent circuit of an induction motor

Активная мощность, потребляемая ПЭД j -го типоразмера $P_1(j, k)$ при заданной тройке $\langle \omega(k), U_1^0(j), s \rangle$, рассчитывается, согласно (9), по формуле:

$$P_1(j, k) = 3\omega(k)U_1^0(j) \operatorname{Re} \dot{I}_1(j, k),$$

где $\dot{I}_1(j,k)$ – ток цепи статора. Полезная мощность на валу двигателя оценивается по выражению [28]:

$$P_2(j,k) = 3(\operatorname{Re} \dot{I}_2(j,k))^2 R'_2(j) \frac{1-s}{s},$$

где $\dot{I}_2(j,k)$ – ток в цепи ротора. Оценки $\dot{I}_1(j,k)$ и $\dot{I}_2(j,k)$ рассчитываются по заданным параметрам схемы замещения: активному и реактивному сопротивлениям статора R_1, X_1 , приведенным сопротивлениям ротора R'_2, X'_2 и сопротивлениям цепи намагничивания R_0, X_0 . Реактивные сопротивления вычисляются при относительной частоте $\omega(k)$ и скольжении s , определяемом по балансу мощностей: отдаваемой на валу двигателя и потребляемой насосом. Согласно (8) и (15), имеем:

$$s(j,k) = \arg \left\{ \begin{array}{l} P_2(x) = P_2(j,k) = \\ = N_1(\omega(k)(1-s)) = \frac{\gamma q h^0(1)}{\eta_N(\omega(k)(1-s))} \end{array} \right\}.$$

Вычислительный анализ

На основании показателей (5)–(8) проведём сравнительный анализ трёх решений.

Первое – оптимальное обустройство на полном жизненном цикле (5), когда параметр τ_p критерия (7) приравнивается потенциалу наработки T^0

$$x_0 = \arg \max J(x | T^0) = \arg \max J(x), \quad x \in X. \quad (16)$$

Прогноз периода наработки в этом случае оценивается, согласно (6), выражением

$$T(x_0) = \frac{T^0}{1 + E_\Sigma(x_0)}.$$

Второе – оптимальное решение для $\tau_p \in (0, T^0)$

$$x_\tau = \arg \max J(x | \tau_p), \quad x \in X, \quad (17)$$

с периодами планирования и наработки

$$T_p = \frac{\tau_p}{1 + E_\Sigma(x_\tau)},$$

$$T(x_\tau) = \frac{T^0}{1 + E_\Sigma(x_\tau)}. \quad (18)$$

Третье решение определяется условием (8)

$$x_p = \arg \max J_p(x), \quad x \in X(T_p) \subset X, \quad (19)$$

когда точка максимума прибыли (8) на заданном горизонте планирования T_p принадлежит множеству

$$X(T_p) = \left\{ x : E_\Sigma(x) \leq \frac{T^0}{T_p} - 1 \right\}.$$

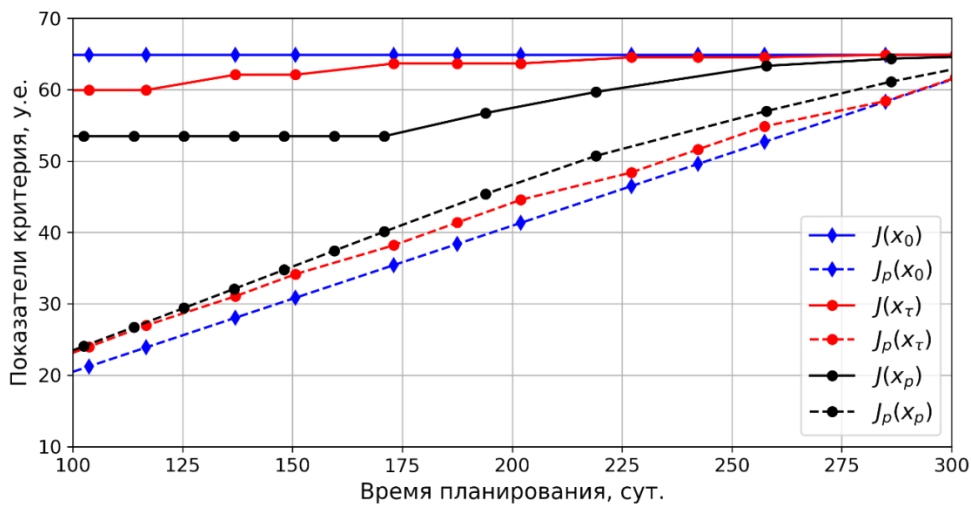


Рис. 3. Графики критериев прибыли полного жизненного цикла $J(x_0), J(x_\tau), J(x_p)$ и на укороченных периодах планирования $J_p(x_0), J_p(x_\tau), J_p(x_p)$

Fig. 3. Charts of profit criteria on full lifetime cycle $J(x_0), J(x_\tau), J(x_p)$ and on shorter planning periods $J_p(x_0), J_p(x_\tau), J_p(x_p)$

Введённые выше решения x_0, x_τ и x_p определяют пять графиков критерия прибыли по варьируемой координате $T_p \in \left[0, \frac{T^0}{1 + E_\Sigma(x)} \right]$ (рис. 3): $J(x_0)$ – максимально-достижимый уровень прибыли (4), (16) на ПЖЦ работы ЭЦН, (прямая, параллельная отрезку $T_p \in \left[0, \frac{T^0}{1 + E_\Sigma(x)} \right]$);

$$J(x_\tau) = \Delta J(x_\tau) \frac{T^0}{1 + E_\Sigma(x_\tau)} - c_0(x_\tau)$$

– прибыль полного жизненного цикла с наработкой $T(x_\tau) = \frac{T^0}{1 + E_\Sigma(x_\tau)}$ на оптимальных решениях $x_\tau = \arg \max J(x | \tau_p), x \in X$ (6), (17), полученных на укороченных (18) горизонтах планирования;

$$J_p(x_\tau) = T_p \Delta J(x_\tau) - c_0(x_\tau) \frac{T_p(1 + E_\Sigma(x_\tau))}{T^0}$$

– прибыль, доставляемая решением x_τ (17) за период работы $T_p = \frac{\tau_p}{1 + E_\Sigma(x_\tau)}$, что после подстановки в исходный критерий соответствует выражению

$$J_p(x_\tau) = \left(\Delta J(x_\tau) \frac{\tau_p}{1 + E_\Sigma(x_\tau)} \right) - c_0(x_\tau) \tau_p / T^0;$$

$$J_p(x_0) = T_p \Delta J(x_0) - \frac{T_p(1 + E_\Sigma(x_0))}{T^0} c_0(x_0) =$$

$$= \left(\frac{\Delta J(x_0) \tau_p}{1 + E_\Sigma(x_0)} \right) - c_0(x_0) \tau_p / T^0$$

– прибыль, доставляемая решением x_0 (16) за время эксплуатации $T_p = \frac{\tau_p}{1 + E_\Sigma(x_0)}$; $J_p(x_p)$ – максимально достижимая прибыль, доставляемая решением (19) на горизонте планирования T_p .

Графики оптимальных решений и основных переменных состояния изображены на рис. 4.

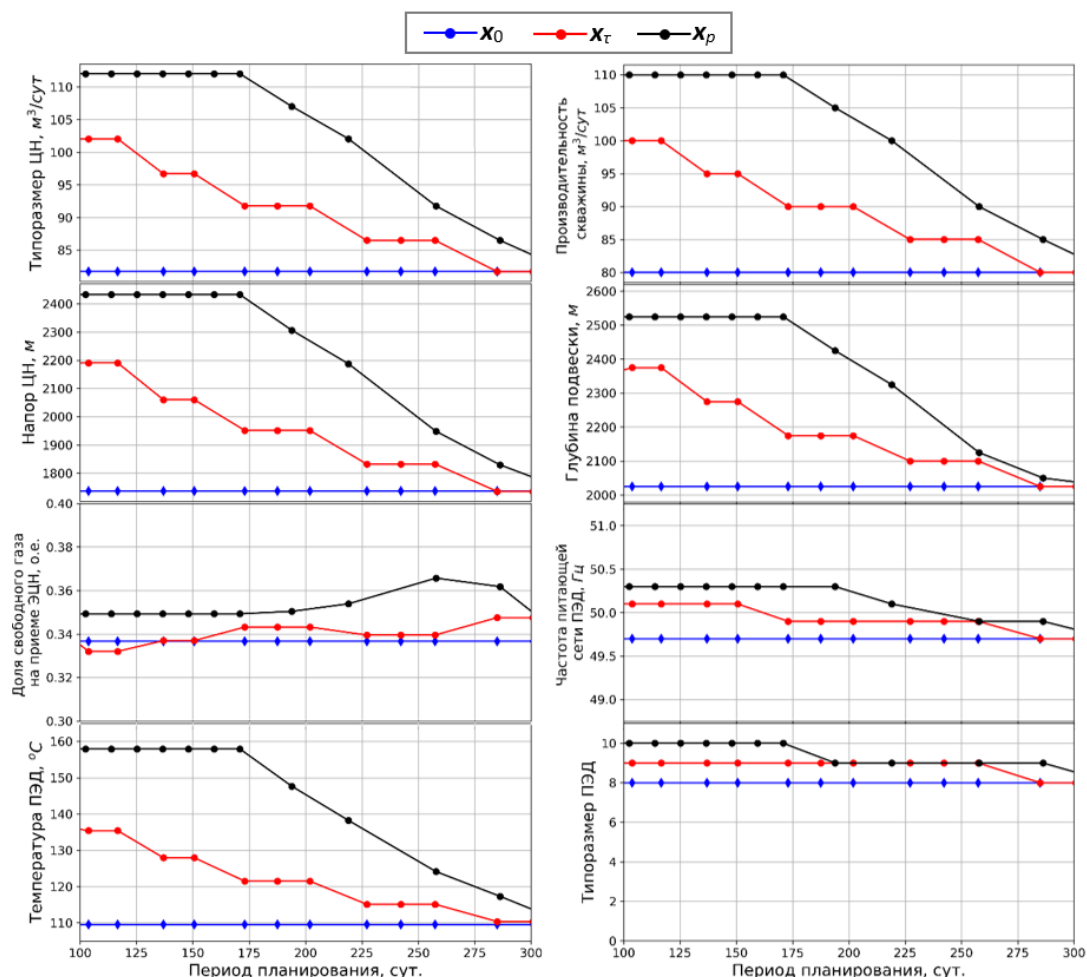


Рис. 4. Графики оптимальных решений и основных переменных состояния

Fig. 4. Charts of optimal solutions and main state variables

На рис. 5 представлены графики факторов ресурсно-временных затрат $E_\Sigma(x_p)$ (18) и соответствующих долей снижения прибыли для горизонтов планирования T_p .

Представленные выше результаты были получены для типовой барометрической модели скважины, приближенной по условиям залегания и режимам эксплуатации к объектам среднего Приобья. Термометрическая модель системы с повышенным уровнем нагрева ПЭД была настроена с использованием данных работы [24]. Основные параметры модели скважины, настройки факторов ускоренного износа, настройки критерия и справочные данные используемых типоразмеров ПЭД представлены в табл. 1. Параметры схемы замещения восстанавливаются по методике [28] и в таблице не представлены.

Расчёты критериев рис. 3, оптимальных решений и соответствующих состояний системы рис. 4, а также диаграммы распределения долевых ресурсно-экономических затрат рис. 5 показывают, что

- прибыли оптимальных решений для укороченных периодов планирования с более интенсивными показателями ускоренного износа заметно ниже стратегий оптимального управления на ПЖЦ;
- эффекты кратковременных периодов планирования обеспечиваются большими ресурсными затратами с большей производительностью заглаблениями и нагревами ПЭД;
- балансы между производительностью и заглаблениями ЭЦН регулируются ограничениями по газу у первой ступени насоса, что отражается квазистабильным уровнем графика доли свободного газа у приёма насоса.

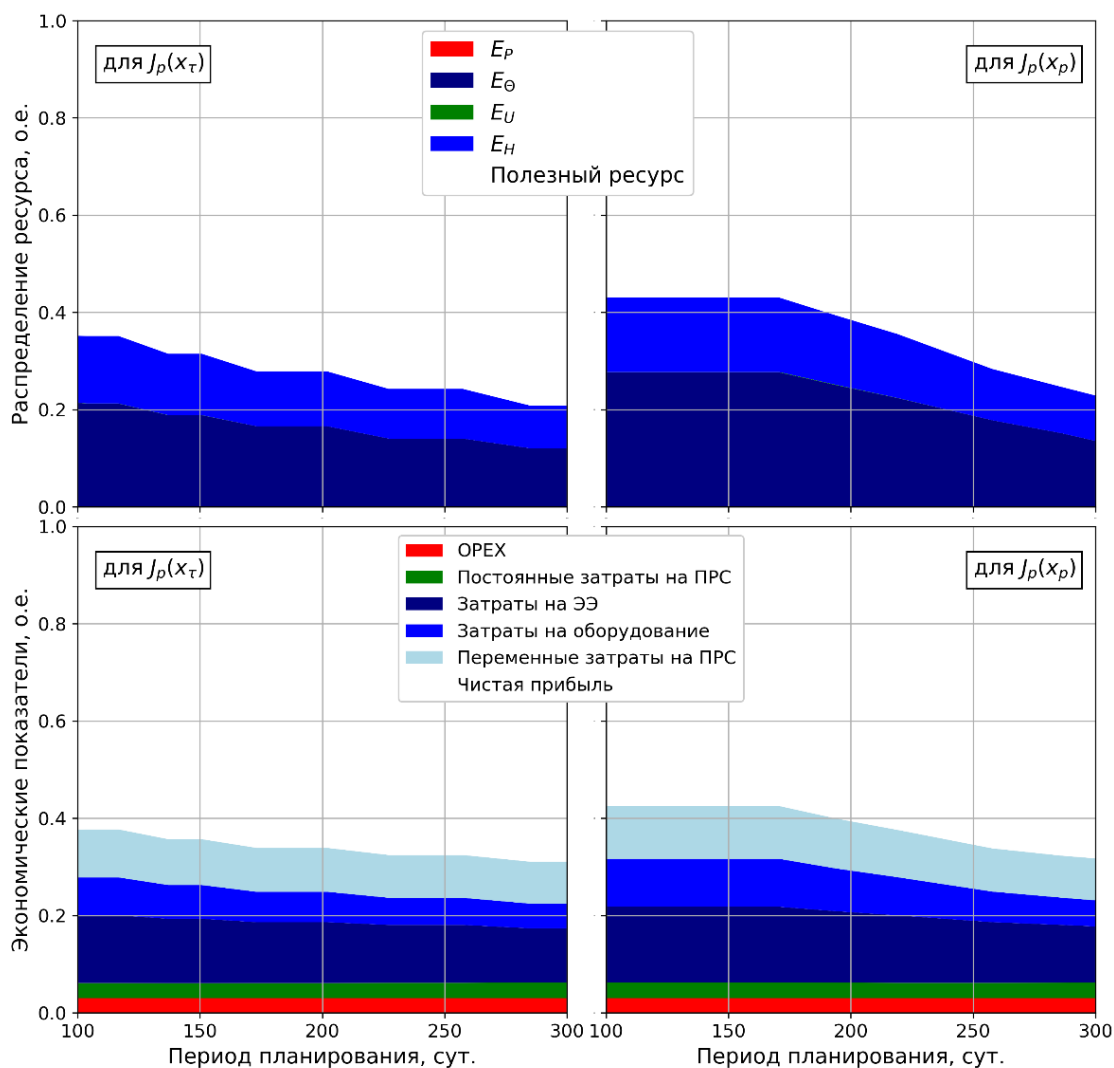


Рис. 5. Графики распределения ресурса и экономических затрат для оптимальных решений

Fig. 5. Charts of resource distribution and economic costs for optimal solutions

Таблица 1. Параметры и настройки моделей

Table 1. Model parameters and setting

Параметры модели скважины/Well model parameters										
Параметр Parameter	H_R	p_R	p_L	w_R	β	G	θ_R	θ_H	α_3	
Значение Value	3000	26	1,5	8	0,3	200	95	63,3	3,33	
Ед. изм-ия Units	м m	МПа MPa	МПа MPa	м ³ /(МПа·сут) m ³ /(MPa·day)	ед. units	м ³ /м ³ m ³ /m ³	°C	°C	ед. units	
Настройки целевого критерия и интенсивности влияния факторов Target criteria and factors intensity settings										
Параметр Parameter	c_1	c_2	c_3	c_4	c_{50}	c_{51}	a_1	a_2	a_3	a_4
Значение Value	0,005299	0,000111	0,001039	$8,4 \cdot 10^{-8}$	3	0,004	1,11	0,8	0,1	1,2
Основные характеристики ПЭД Main parameters of submersible electrical motor										
Номер, ед. Number, unit	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Номинальная мощность, Вт Power, W	22000	28000	32000	40000	45000	50000	56000	63000	70000	80000
Номинальное напряжение, В Voltage, V	750	900	1000	1250	1400	1550	1400	2000	2000	1700
Длина, мм Length, mm	3238	3618	3998	4758	5138	5518	5989	6658	7038	7038

Как видно из графиков, в спектре факторов, снижающих срок службы ЭЦН, в оптимальных точках отсутствует фактор ускоренного механического износа ЭЦН E_p , а также фактор риска пробоя изоляции от перенапряжения E_U . Несмотря на то, что в множестве оптимальных решений данные факторы не проявляются, они оказывают существенное влияние на выбор

оптимальной точки. Явно выражено влияние факторов при частотном управлении для некоторого ЭЦН, заданного q^0, h^0 . На рис. 6 показано семейство характеристик факторов $E_p(x)$ и $E_U(x)$ для разных частот питающего напряжения $\omega(k)$ и разных типоразмеров ПЭД j .

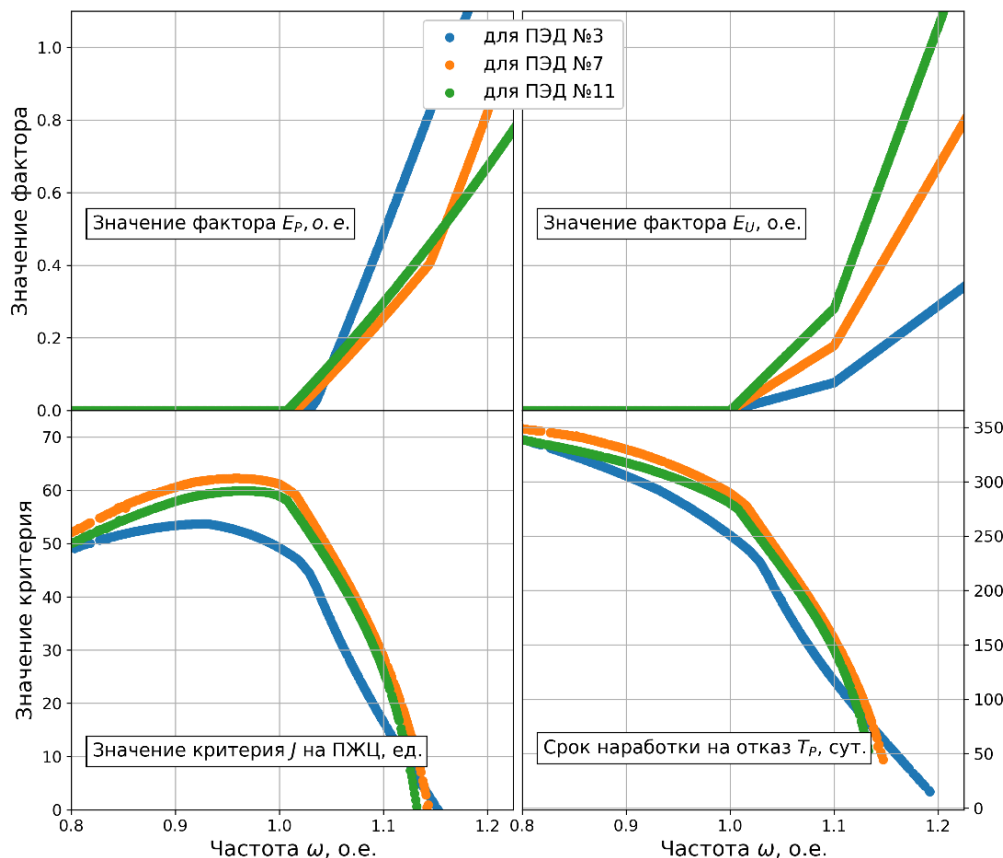


Рис. 6. Графики изменения факторов $E_p(x)$ и $E_U(x)$ при частотном управлении ЭЦН с фиксированными q^0, h^0
Fig. 6. Charts of changes in $E_p(x)$ and $E_U(x)$ factors for frequency control of ESP with fixed q^0, h^0

Из графика рис. 4 следует, что для всякого оптимального решения режим по частоте приближен к синхронному (не возмущённому) значению $\Omega(k) \in [49,7; 50,3]$. Переход на смещённые частоты (рис. 6) снижает прибыль, а с увеличением частоты интенсифицируется механический износ и риск пробоя изоляции.

Выводы

1. Рассмотренная схема формализации задачи оптимизации режима и параметров обустройства на основе явного учёта главных показателей ускоренного износа и старения в сравнении с действующими регламентами выбора, где основное внимание обращено на обеспечение потенциала производительности [8], существенно расширяет круг определений оптимальных решений. Вполне очевидно, что начальный выбор режима и параметров обустройства должен учитывать последствия принятых решений на полном жизненном цикле работы ЭЦН до момента, когда реализуется возможность нового выбора.

2. Приведённые результаты вычислительного анализа с явным учётом факторной модели риска отказа свидетельствуют, что в условиях стационарности выбор по максимуму производительности, когда факторы ускоренного износа учитываются, в лучшем случае, как предельные ограничения на работоспособность ЭЦН, экономически менее эффективны (на 10–15 %) по сравнению с максимально достижимой прибылью полного жизненного цикла.

3. Оптимизация на укороченных горизонтах планирования, связанная с плохо предсказуемой изменчивостью условий эксплуатации, предполагает дальнейшее развитие подхода по оптимальному конструированию на смещённых частотах. Заметим, что в точках оптимума действие факторов ускоренного механического износа $E_p(x)$ и перенапряжения $E_U(j, \Omega(k))$ остаются непроявленными. Однако именно эти факторы износа оказываются значимыми в условиях повышения частоты или нагрузки на валу. И именно с учётом данных фак-

торов оптимальный частотный режим длительных периодов работы соответствует стандарту несущей частоты в 50 Гц. И только в условиях пренебрежения ресурсными факторами износа – при малых горизонтах планирования, оптимум сдвигается в сторону повышенных частот $\Omega(k) > 50$ Гц, как это следует из приведённых примеров (рис. 4).

4. Практическая реализация предложенной схемы оптимального выбора связана с построением факторной модели риска отказа в виде (5), что предполагает решение задачи идентификации подобного класса моделей на основе данных промышленного контроля за режимами эксплуатации погружного оборудования на полном жизненном цикле для возможно большего числа скважин месторождения. Оценочная настройка модели в расчётных примерах демонстрирует качественные свойства обновлённых решений задачи оптимального синтеза. Отметим, что уровни прибыли $J(x_*)$ и $J_p(x_*)$ пропорциональны потенциалу наработки T^0 , в то время как оптимальные настройки x_* регулируются,

прежде всего, отношением $\frac{\tau_p}{T^0} \in (0, 1)$. Сравнительно низкая корреляция x_* от T^0 важна, так как

потенциальные диапазоны наработки T^0 плохо предсказуемы. Показатели T^0 изделий разных типоразмеров и изготовителей на практике значительно различаются. Вопросы построения и настройки модели риска отказа, как в [10], или по типу (5), есть тема отдельного исследования.

5. Факторная полнота и комплексность описания термобарических и энергетических процессов работы скважин (на основе явных корреляций между параметрами обустройства, режимными состояниями и показателями динамики освоения ресурса ЭЦН) позволяют использовать упрощённые модельные решения как первичную основу последующего построения адаптивных автоматизированных регламентов операционного контроля и управления в условиях неопределённости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Artificial lift selection using machine learning / T. Ounsakul, T. Sirirattanachatchawan, W. Pattarachupong, Y. Yokrat, P. Ekkawong // International petroleum technology conference. – Beijing, 2019. URL: <https://doi.org/10.2523/IPTC-19423-MS> (дата обращения 11.03.2021).
2. Verifying feasibility of artificial lift methods in rapid selection tool / J. Chow, J. Gamboa, G.A. Garcia, T. Price, C. Hall // SPE artificial lift conference and exhibition. – Americas, 2020. URL: <https://doi.org/10.2118/201129-MS>
3. Denney D. Offshore ESP-selection criteria: an industry study // Journal of petroleum technology. – 2012. – V. 64. URL: <https://doi.org/10.2118/0712-0088-JPT> (дата обращения 11.03.2021).
4. Data management for appropriate ESP selection, procedures and operation results in a significant reduction of early failures / J. Villalobos Leon, A. Correal, J. Pancho, C. Reyes, B. Fun Sang, L. Enriquez, R. Torres // SPE Middle East artificial lift conference and exhibition. – Manama, 2018. URL: <https://doi.org/10.2118/192507-MS> (дата обращения 11.03.2021).
5. Cardona A., Kadio-Morokro B., Knight J. Probabilistic production data analysis applied to ESP selection // SPE North America artificial lift conference and exhibition. – The Woodlands, 2016. URL: <https://doi.org/10.2118/181222-MS> (дата обращения 11.03.2021).
6. Takacs G. Electrical submersible pumps manual. 2nd ed. – Cambridge: Gulf Professional Publ. Elsevier, 2017. – 578 p.
7. Handbook for electrical submersible pumping systems: fundamental design and data for use in the solution of pump applications and operations. 4th ed. – Cambridge: Centrilift Publ., 1987. – 199 p.
8. «ЭРА:Добыча» – интегрированная платформа для повышения эффективности эксплуатации механизированного фонда скважин / А.А. Шушаков, А.В. Билинчук, Н.М. Павлечко, Ф.Н. Халиков, А.Г. Сулейманов, А.Н. Ситников, А.А. Слабечкий, Н.Ф. Тепляков, Н.П. Сарапулов, Д.А. Шестаков, Р.Ю. Мансафов // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 12. – С. 60–63. URL: https://oil-industry.net/Journal/archive_detail.php?ID=11205&art=230937 (дата обращения 11.03.2021).
9. Методика подбора установок погружных центробежных насосов к нефтяным скважинам. URL: <http://autotechnologist.com/menu-styles/metodiki> (дата обращения 11.03.2021).
10. Соловьев И.Г., Константинов И.В., Говорков Д.А. Оптимизация параметров обустройства и режима эксплуатации скважины с ЭЦН в условиях осложнений // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2019. – № 9. – С. 28–35. URL: [https://doi.org/10.33285/0132-2222-2019-9\(554\)-28-35](https://doi.org/10.33285/0132-2222-2019-9(554)-28-35) (дата обращения 11.03.2021).
11. Соловьёв И.Г., Субарев Д.Н., Кожин А.Г. Оптимизация обустройства скважины с электронасосом при воздействии мехпримесей в процессе эксплуатации // XII всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. – С. 4666–4675.
12. Частотно-регулируемый электропривод центробежных насосных установок добычи нефти / Т.А. Чернышева, В.В. Аникин, И.А. Чернышев, А.Ю. Чернышев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 12. – С. 168–178. URL: <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/12/2417> (дата обращения 11.03.2021).
13. Elmer W.G., Elmer J.B. Pump-stroke optimization: case study of twenty-well pilot // SPE production & operations. – 2018. – V. 33. URL: <https://doi.org/10.2118/181228-PA> (дата обращения 11.03.2021).
14. Zabala Garces W.A., Martinez Rodriguez G. Power consumption measurements & optimization automated with null electrical risk in ESP systems // SPE Middle East artificial lift conference and exhibition. – Manama, 2018. URL: <https://doi.org/10.2118/192466-MS> (дата обращения 11.03.2021).
15. Electrical cost optimization for electric submersible pumps: systematic integration of current conditions and future expectations / A. Nieto, D. Brinez, J.E. Lopez, P. Marin, S. Cabrera, D. Paya, E. Cifuentes // SPE Middle East oil & gas show and conference. – Manama, 2017. URL: <https://doi.org/10.2118/184006-MS> (дата обращения 11.03.2021).
16. Electrical submersible pumps condition monitoring using motor current signature analysis / P. Popaleny, A. Duya, C. Ozel, Y. Erdogan // Abu Dhabi international petroleum exhibition & conference. – Abu Dhabi, 2018. URL: <https://doi.org/10.2118/193081-MS> (дата обращения 11.03.2021).
17. Соловьёв И.Г., Белашевский С.С. Операционная модель динамики сорбции и растворения солей осложнённого фонда скважин // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2017. – № 3. – С. 35–41.
18. Соловьёв И.Г., Константинов И.В. Графоаналитический конструктор модели скважины с ЭЦН // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2019. – № 5. – С. 33–37. URL: [https://doi.org/10.33285/0132-2222-2019-5\(550\)-33-37](https://doi.org/10.33285/0132-2222-2019-5(550)-33-37) (дата обращения 11.03.2021).
19. Станции управления (ПЭД) серии «ЭЛЕКТОН», сопутствующие приборы и оборудование. URL: <https://www.elekton.ru/catalog.shtml> (дата обращения 11.03.2021).
20. Мищенко И.Т. Скважинная добыча нефти. Нефть и газ. – М.: Нефть и Газ, 2003. – 816 с.
21. Растрингин Л.А. Современные принципы управления сложными объектами. – М.: Сов. радио, 1980. – 232 с.

22. Application of mathematical optimization techniques for well pattern selection / M.M. Khasanov, V.M. Babin, O.U. Melchaeva, O.S. Ushmaev, D.E. Ciaurri, A.S. Semenikhin // SPE Russian oil and gas exploration & production technical conference and exhibition. – Moscow, 2014. URL: <https://doi.org/10.2118/171163-MS> (дата обращения 11.03.2021).
23. Первозванский А.А. Курс теории автоматического управления. – М.: Наука, 1986. – 615 с.
24. Сарачева Д.А., Вахитова Р.И., Уразаков К.Р. Зависимость теплового состояния электроцентробежного насоса от частоты вращения двигателя // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 12. – С. 103–110. URL: <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/12/2406> (дата обращения 11.03.2021).
25. Мельниченко В.Е. Оценка влияния основных технологических характеристик добывающих скважин на ресурс погруженных электроцентробежных насосов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2018. – 24 с.
26. ГОСТ 8865-93 (МЭК 85-84) Системы электрической изоляции. Оценка нагревостойкости и классификации. – М.: Изд-во стандартов, 1995. – 10 с.
27. Михайлов А.К., Малюшенко В.В. Лопастные насосы. Теория, расчёт и конструирование. – М.: Машиностроение, 1977. – 288 с.
28. Хитров А.И., Хитров А.А. Определение параметров электро-механической модели асинхронного двигателя // Вестник Псковского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2019. – № 9. – С. 31–39.

Поступила 19.04.2021 г.

Информация об авторах

Соловьев И.Г., кандидат технических наук, доцент кафедры кибернетических систем Тюменского Индустриального университета; старший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Тюменский научный центр» СО РАН.

Константинов И.В., аспирант кафедры кибернетических систем Тюменского Индустриального университета.

Говорков Д.А., кандидат технических наук, доцент кафедры кибернетических систем Тюменского Индустриального университета.

UDC 622.279:681.5

RESOURCE-ENERGY EFFICIENCY OF ARTIFICIAL LIFT SELECTION FOR WELLS WITH FREQUENCY CONTROLLED PUMP

Ilya G. Solovyev^{1,2},
solovyev@ikz.ru

Ivan V. Konstantinov¹,
ivkonstantinov95@yandex.ru

Denis A. Govorkov¹,
dagovorkov@mail.ru

¹ Tyumen Industrial University,
38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russia.

² Tyumen Scientific Centre SB RAS,
86, Malygin street, Tyumen, 625000, Russia.

The relevance of the research is related to the issues of increasing the operation efficiency of wells equipped with an electric submersible pump, based on the optimal choice of operating mode, frequency and parameters of power equipment according to the profit criterion delivered by a «pump–motor» pair during the full life cycle of its operation. The possible variability of operating conditions is taken into account by adjusting the planning horizon of the criterion.

The main scope: formalization of the optimal choice of operation mode, input power frequency and parameters of electric submersible pump equipment, while taking into account direct energy costs and indirect factors of accelerated wear in stationary operating conditions with an adjustable planning horizon

Methods: material and heat balances, hydrostatics, linearized kinetics of head losses in lift segments, numerical integration and analysis of nonlinear systems, typical formalization of optimization problems.

Results and summary. Taking into account the main factors of accelerated wear in the profit criterion expands the range of definitions of optimal solutions, anticipating the overestimated choices of initial productivity by the fact of reducing the total profit on complete life cycle of the electric submersible pump operation. The problem of possible variability of operating conditions is partially taken into account in the scheme for estimating stationary optimal solutions by introducing the planning horizon indicator into the criterion. The decrease in the energy efficiency of the electric submersible pump operation at shifted frequencies indicates that the «visible freedoms» of frequency regulation have a price to use and chosen frequencies in the optimal solutions with long operation periods approaches synchronous value with the maximum electric submersible pump efficiency. The proposed thermobaric and energy description of the system equilibrium states, taking into account the factors of the dynamics of electric submersible pump resource consumption, allows using simplified model solutions as the primary basis for the subsequent construction of adaptive automated regulations for operational control and management under conditions of uncertainty.

Key words:

Models, goals, algorithms, complicating factors, temporal hierarchy of control, hydrostatics, electric centrifugal pump, service resource.

REFERENCES

- Ounsakul T., Siirattanachatchawan T., Pattarachupong W., Yokrat Y., Ekkawong P. Artificial lift selection using machine learning. *International petroleum technology conference*. Beijing, 2019. Available at: <https://doi.org/10.2523/IPTC-19423-MS> (accessed 11 March 2021).
- Chow J., Gamboa J., Garcia G.A., Price T., Hall C. Verifying feasibility of artificial lift methods in rapid selection tool. *SPE artificial lift conference and exhibition*. Americas, 2020. Available at: <https://doi.org/10.2118/201129-MS> (accessed 11 March 2021).
- Denney D. Offshore ESP-selection criteria: an industry study. *Journal of petroleum technology*, 2012, vol. 64. Available at: <https://doi.org/10.2118/0712-0088-IPT> (accessed 11 March 2021).
- Villalobos Leon J., Correal A., Pancho J., Reyes C., Fun Sang B., Enriquez L., Gallegos J., Torres R. Data management for appropriate ESP selection, procedures and operation results in a significant reduction of early failures. *SPE Middle East artificial lift conference and exhibition*. Manama, 2018. Available at: <https://doi.org/10.2118/192507-MS> (accessed 11 March 2021).
- Cardona A., Kadio-Morokro B., Knight J. Probabilistic production data analysis applied to ESP selection. *SPE North America artificial lift conference and exhibition*. The Woodlands, 2016. Available at: <https://doi.org/10.2118/181222-MS> (accessed 11 March 2021).
- Takacs G. *Electrical submersible pumps manual*. 2nd ed. Cambridge, Gulf Professional Publishing, Elsevier, 2017. 578 p.
- Handbook for electrical submersible pumping systems: fundamental design and data for use in the solution of pump applications and operations. 4th ed. Cambridge, Centrilift Publication, 1987. 199 p.
- Shushakov A.A., Bilinchuk A.V., Pavlechko N.M., Khalikov F.N., Suleymanov A.G., Sitnikov A.N., Slabetski A.A., Teplyakov N.F., Sarapulov N.P., Shestakov D.A., Mansafov R.Yu. ERA:Production – an integrated platform for increasing the efficiency of the operation of the artificial lift and oil fields. *Oil industry*, 2017, no. 12, pp. 60–63. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2017-12-60-63> (accessed 11 March 2021).
- Metodika podbora ustanovok pogruzhnykh tsentroběžnykh nasosov k neftyanym skvazhinam* [Methodology for selecting installations of submersible centrifugal pumps for oil wells]. Available at: <http://autotechnologist.com/menu-styles/metodiki> (accessed 11 March 2021).
- Solovyev I.G., Konstantinov I.V., Govorkov D.A. Optimization of equipment parameters and a well operational mode with ESP under conditions of complications. *Scientific-Technical Journal «Automation, telemechanization and communication in oil industry*, 2019, no. 9, pp. 28–35. In Rus. Available at: [https://doi.org/10.33285/0132-2222-2019-9\(554\)-28-35](https://doi.org/10.33285/0132-2222-2019-9(554)-28-35) (accessed 11 March 2021).
- Solovyev I.G., Subarev D.N., Kozhin A.G. Optimizatsiya obustroystva skvazhiny s elektronasosom pri vozdeystvii mekhpriimesey v protsesse ekspluatatsii [Optimization of the arrangement of a well with an electric pump when exposed to me-

- chancial impurities during operation]. *XII vserossiyskoe soveshchanie po problemam upravleniya VSPU* [XII All-Russian meeting on the problems of controlling VSPU]. Moscow, Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN, 2014. pp. 4666–4675.
12. Chernysheva T.A., Anikin V.V., Chernyshev I.A., Chernyshev A.Yu. Variable speed electric drive of centrifugal pump in oil lifting plants. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 12, pp. 168–178. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/12/2417> (accessed 11 March 2021).
 13. Elmer W.G., Elmer J.B. Pump-stroke optimization: case study of twenty-well pilot. *SPE production & operations*, 2018, vol. 33. Available at: <https://doi.org/10.2118/181228-PA> (accessed 11 March 2021).
 14. Zabala Garces W.A., Martinez Rodriguez G. Power consumption measurements & optimization automated with null electrical risk in ESP systems. *SPE Middle East artificial lift conference and exhibition*. Manama, 2018. Available at: <https://doi.org/10.2118/192466-MS> (accessed 11 March 2021).
 15. Nieto A., Brinez D., Lopez J.E., Marin P., Cabrera S., Paya D., Cifuentes E. Electrical cost optimization for electric submersible pumps: systematic integration of current conditions and future expectations. *SPE Middle East oil & gas show and conference*. Manama, 2017. Available at: <https://doi.org/10.2118/184006-MS> (accessed 11 March 2021).
 16. Popaleny P., Duyar A., Ozel C., Erdogan Y. Electrical submersible pumps condition monitoring using motor current signature analysis. *Abu Dhabi international petroleum exhibition & conference*. Abu Dhabi, 2018. Available at: <https://doi.org/10.2118/193081-MS> (accessed 11 March 2021).
 17. Solovyev I.G., Belashevskiy S.S. Operational model of salts sorption and dissolution dynamics for the complicated fund of wells. *Scientific-Technical Journal «Automation, telemechanization and communication in oil industry*, 2017, no. 3, pp. 35–41. In Rus.
 18. Solovyev I.G., Konstantinov I.V. Graphical-analytical designer of a well model with ESP. *Scientific-Technical Journal «Automation, telemechanization and communication in oil industry*, 2019, no. 5, pp. 33–37. In Rus. Available at: [https://doi.org/10.33285/0132-2222-2019-5\(550\)-33-37](https://doi.org/10.33285/0132-2222-2019-5(550)-33-37) (accessed 11 March 2021).
 19. *Stantsii upravleniya (PED) serii «Electon», sopustvuyushchie pribory i oborudovanie* [Control stations (PED) of the «Electon» series, related devices and equipment]. Available at: <https://www.elektion.ru/catalog.shtml> (accessed 11 March 2021).
 20. Mishhenko I.T. *Skvazhinnaya dobycha nefi. Neft i gaz* [Downhole oil production. Oil and gas]. Moscow, Neft i Gaz Publ., 2003. 816 p.
 21. Rastrigin L.A. *Sovremennye printsipy upravleniya slozhnymi obyektami* [Modern principles of managing complex objects]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1980. 232 p.
 22. Khasanov M.M., Babin V.M., Melchaeva O.U., Ushmaev O.S., Echeverria Ciaurri D., Semenikhin A.S. Application of mathematical optimization techniques for well pattern selection. *SPE Russian oil and gas exploration & production technical conference and exhibition*. Moscow, 2014. Available at: <https://doi.org/10.2118/171163-MS> (accessed 11 March 2021).
 23. Pervozvanskiy A.A. *Kurs teorii avtomaticheskogo upravleniya* [Course of the theory of automatic control]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 615 p.
 24. Saracheva D.A., Vakhitova R.I., Urazakov K.R. Dependence of an electric-centrifugal pump heat state on engine rotation frequency. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 12, pp. 103–110. Available at: <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/12/2406> (accessed 11 March 2021).
 25. Melnichenko V.E. *Otsenka vliyaniya osnovnykh tekhnologicheskikh kharakteristik dobyvayushchikh skvazhin na resurs pogruzhnykh elektrosentrobezhnykh nasosov*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Assessment of the influence of the main technological characteristics of producing wells on the resource of submersible electric centrifugal pumps. Cand. Diss. Abstract]. Moscow, 2018. 24 p.
 26. *GOST 8865-93 (MEK 85-84) Sistemy elektricheskoy izolyatsii. Otsenka nagrevostoykosti i klassifikatsii* [Electrical insulation systems. Heat resistance assessment and classification]. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 1995. 10 p.
 27. Mikhaylov A.K., Malyushenko V.V. *Lopastnye nasosy. Teoriya, raschet i konstruirovaniye* [Vane pumps. Theory, calculation and design]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 288 p.
 28. Khitrov A.I., Khitrov A.A. *Opredeleniye parametrov elektromekhanicheskoy modeli asinkhronnogo dvigatelya* [Determination of the parameters of an electromechanical model of an induction motor]. *Vestnik Pskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tehnicheskie nauki*, 2019, no. 9, pp. 31–39.

Received: 19 April 2021.

Information about the authors

Ilya G. Solovyev, Cand. Sc., associate professor, Tyumen Industrial University; senior researcher, Tyumen Scientific Centre SB RAS.

Ivan V. Konstantinov, graduate student, Tyumen Industrial University.

Denis A. Govorkov, Cand. Sc., associate professor, Tyumen Industrial University.

УДК 552.525

КЛАССИФИКАЦИЯ ФОРМ СВЯЗАННОЙ ВОДЫ В КАОЛИНОВЫХ ГЛИНАХ

Середин Валерий Викторович¹,
seredin@nedra.perm.ru

Ядзинская Марина Радиковна¹,
marinayadzinskaya@mail.ru

Андрианов Андрей Владимирович²,
andrianov@nedra.perm.ru

¹ Пермский национальный исследовательский университет,
Россия, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15.

² ООО НИПППД «Недра»,
Россия, 614064, г. Пермь, ул. Льва Шатрова, 13а.

Актуальность. Вода является важнейшей компонентой грунтов, так как оказывает влияние на основные геологические процессы. Это объясняется особенностями ее состава и строения. Многие ученые занимались изучением содержания связанной воды в глинах. Однако экспериментов по данному вопросу недостаточно.

Целью данной работы является изучение форм связанной воды в каолиновых глинах, отжимаемых при высоких давлениях, а также выявление связи между потерями масс воды под давлением и термодинамическими параметрами.

Объект исследования – каолиновые глины.

Метод. Для достижения цели были подготовлены образцы каолиновой глины с различной степенью обжатия под давлением. Затем проводился термогравиметрический анализ, в ходе которого измерялись потери массы связанной воды при нагревании до 1000 °С. С помощью атомно-силового микроскопа изучалось влияние шероховатости на количество отжимаемой связанной воды из образцов каолиновой глины.

Результаты опытных данных и анализ термограмм позволили выделить четыре пика потери массы воды, в соответствии с этим предложена классификация связанной воды в глине: рыхлосвязанная вода поверхности коллоидов; прочносвязанная вода поверхности коллоидов; вода поверхности минералов; вода кристаллической решетки. Воздействие высокого давления на массу удаляемой воды неоднозначно. Это связано с тем, что под давлением происходит образование дефектов, как следствие изменяется энергетический потенциал и сорбционная активность глинистых частиц. При этом выявлена тесная связь между показателем шероховатости и градиентом удаляемой связанной воды в интервале давлений от 0 до 200 МПа. При давлениях от 200 до 800 МПа связь не установлена.

Ключевые слова:

Каолиновая глина, формы связанной воды, термогравиметрия, давление, удельная поверхность, шероховатость, сорбционная активность.

Введение

Все грунты в своем составе содержат воду. С этой компонентой не сравнится никакая другая по влиянию на ход основных геологических процессов. Прежде всего, уникальность воды как компоненты обусловлена ее свойствами, составом и строением. Многие ученые, такие как Е.М. Сергеев, Р.И. Злочевская, З.А. Кривошеева, В.А. Королев [1, 2], Э.А. Гойло [3, 4], Е. Galan [5] и другие [6–10] занимались изучением вопроса содержания связанной воды в глинах.

Р.И. Злочевская и др. описывали изменение свойств связанной воды в глинах при увеличении давлений и температур. По данным изыскателей [1–5] в первую очередь при воздействии давлений на грунт удаляется свободная, затем осмотическая вода, а адсорбционно-связанная вода отжимается из глинистого грунта только при нагрузках более 10 МПа. Ближайшие к твердой компоненте грунта слои воды не удаляются при нагрузках в десятки МПа.

Изучение влияния стрессового давления на количество связанной воды является очень важным, так как во многом определяет свойства глин.

Целью данной работы является изучение форм связанной воды в каолиновых глинах, отжимаемых при высоких давлениях, а также выявление связи между потерями масс воды под давлением и термодинамическими параметрами.

Объектом исследования являлась каолиновая глина, добываемая Челябинским рудоуправлением на «Нижне-Увельском» месторождении. Залежи глин представлены отложениям наурзумской свиты миоцена (N_1nr) озерно-аллювиального происхождения. Мощность свиты достигает 20 м. Глины используются в огнеупорной промышленности и в производстве керамики.

Опыты проводились на образцах, которые получены в результате обогащения Челябинского каолина методом седиментации. Всего исследовано около 100 образцов. Средние значения минерального и фракционного состава глин представлены в табл. 1, 2. Выборка формировалась случайным образом с небольшой вариацией по гранулометрическому составу.

Таблица 1. Минеральный состав каолиновой глины

Table 1. Mineral composition of kaolinite clay

Наименование образца Sample name	Содержание минералов/Mineral content, %		
	монтмориллонит montmorillonite	каолинит kaolinite	кварц quartz
каолиновая глина kaolin clay	15	77	8

Таблица 2. Фракционный состав каолиновой глины

Table 2. Fractional composition of kaolinite clay

Наименование образца Sample name	Содержание частиц/Mineral content, %			
	>50 мкм >50 μm	5–50 мкм 5–50 μm	1–5 мкм 1–5 μm	<1 мкм <1 μm
каолиновая глина kaolin clay	0	34	52	14

Методика исследования

Сущность методики исследования

1. Подготовка образца происходила с помощью испытания давлением для дальнейшего проведения опытов в термоанализаторе. Образцы глин проходили специальную обработку. Грунты отмучивались в дистиллированной воде, затем высушивались в специальных сушильных шкафах до постоянной массы. Высушенные образцы растирались в ступке пестиком с резиновым наконечником.

Далее образцы обогащенной глины массой 0,2 г были подвержены сжатию на приборе высокого давления. При давлениях, равных 10, 25, 35, 50, 75, 85, 100, 115, 125, 150 МПа, далее через каждые 50 МПа до 800 МПа изготавливалось по 3–5 образцов (для каждой ступени давления) в виде «таблеток». Затем образцы глин в течение семи суток выдерживались в эксикаторе. Таким образом изготовлено примерно 100 образцов.

2. Термогравиметрический анализ, совмещенный с масс-спектральным анализом, заключался в измерении потери массы воды при нагревании до

1000 °С каждого образца глины, обработанного при заданных давлениях.

Оборудование и приборы:

- ступка фарфоровая;
- пестик с резиновым наконечником;
- весы лабораторные;
- термоанализатор STA 409 PC Luxx;
- атомно-силовой микроскоп (АСМ);
- эксикатор;
- дифрактометр D2 Phaser;
- сушильный шкаф

Проведение испытаний

Каждую специально подготовленную «таблетку» грунта в корундовом тигле нагревали до температуры 1000 °С, температура увеличивалась на 10 °С каждую минуту. Термогравиметрический анализ (ТГ) и дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК) проводились с помощью термоанализатора.

С помощью атомно-силового микроскопа измерялась шероховатость (R_c) и удельная поверхностная энергия (γ).

Размер области когерентного рассеивания толщины кристаллита (минерала) (M_k) определялся с помощью дифрактометра.

Результаты исследования

На основании полученных опытных данных построены термограммы изменения массы отжимаемой воды при нагревании до 1000 °С в процентах от первоначальной массы. На рис. 1, 2 в качестве примера приведены термограммы образца глины, подготовленного сжатием 10 МПа. Анализ изменения ТГ-кривых каолиновой глины показывает, что здесь наблюдается четыре экстремума кривой, которые зафиксированы при температурах испытаний 90, 150, 500, 800 °С.

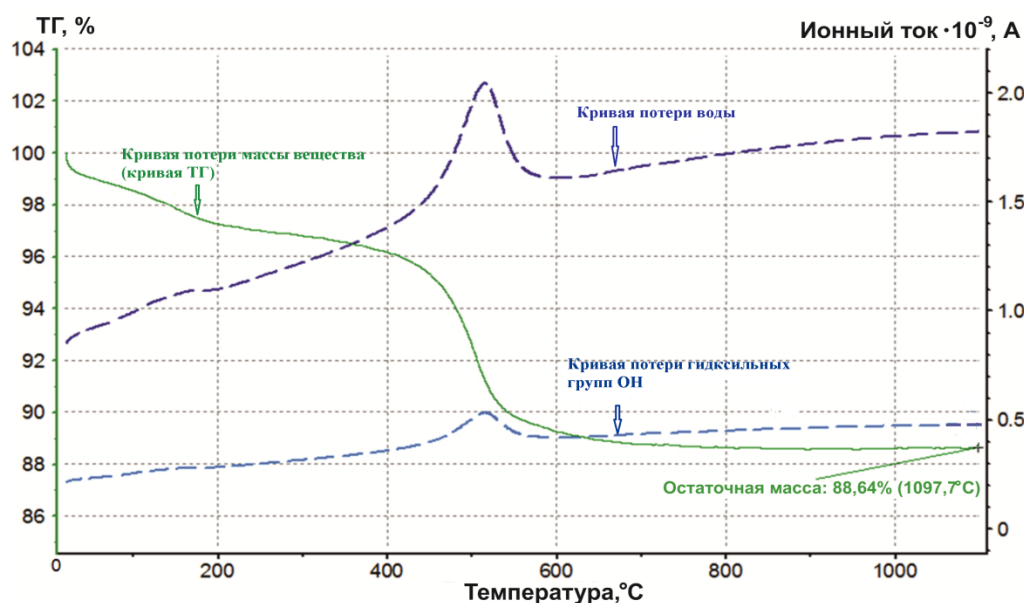


Рис. 1. Термограмма по данным масс-спектрального анализа газовой фазы

Fig. 1. Thermogram based on gas phase mass spectral analysis data

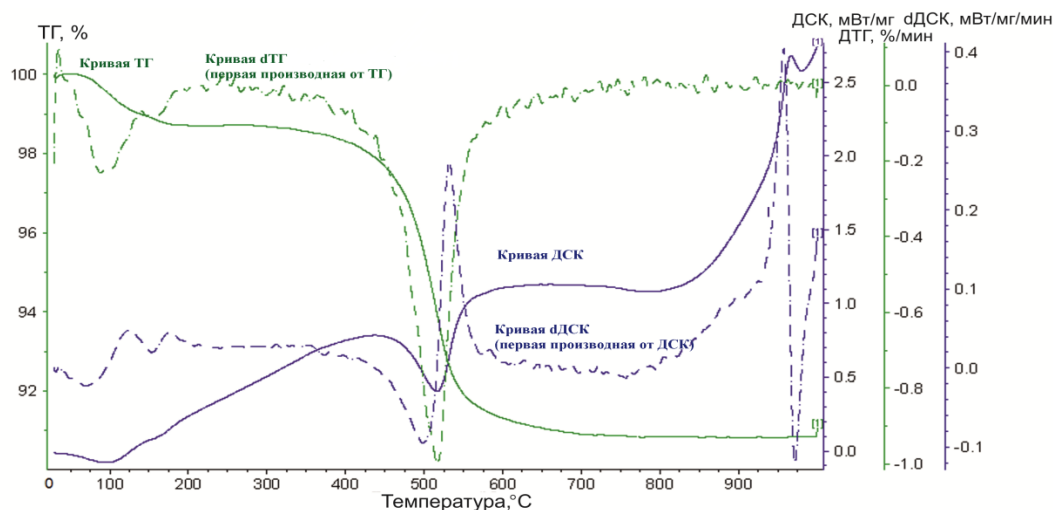


Рис. 2. Термограмма по данным дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК)
 Fig. 2. Thermogram based on differential scanning calorimetry (DSC) data

Основываясь на полученных опытных данных, можно заключить, что глины содержат определенное количество поверхностной адсорбированной воды (рыхлосвязанной и прочносвязанной). Выделение воды, которое происходит при температуре 90–150 °С, связано с потерей массы рыхлосвязанной (1 класс – m_p) и прочносвязанной форм воды (2 класс – m_n). Это вода поверхности коллоидов. Выход гидроксильных групп из кристаллической структуры минералов происходит при температурах от 500 до 800 °С. Выделение воды, которое происходит при температуре 500 °С, соответствует третьему классу – вода поверхности минералов ($m_{он}$). Температура выделения воды и ОН-групп зависит от размера коллоидов и глинистых агрегатов, совершенства кристаллической структуры минералов и условий эксперимента. При температуре 800 °С выделяется вода кристаллической решетки минералов (4 класс – $m_{нк}$). При температурах свыше 900 °С кристаллическая решетка начинает разрушаться. Предложенная авторами классификация воды соотносится с классификацией Е.М. Сергеева и др.

Под водой кристаллической решетки понимается высвобождающиеся гидроксил-ионы (ОН).

Глинистые грунты претерпевают изменения не только под действием температур, но и в результате воздействия высоких давлений. К такому выводу пришли при анализе графиков (рис. 3) изменения потери массы воды образцов, обработанных при всех 25-ти ступенях давлений. Так, на рис. 3, а показаны потери массы воды образцов, подвергшихся нагреванию при температуре, характерной для выделения рыхлосвязанной воды (90 °С), обжатых при различных давлениях.

Из рис. 3, а, б видно, что с увеличением давления потеря массы рыхлосвязанной и прочносвязанной воды возрастает. Для воды поверхности минерала (рис. 3, в) такая закономерность наблюдается только до нагрузки 125–200 МПа, при дальнейшем увеличении нагрузки наблюдается обратная зависимость. Увеличение массы отжимаемой воды кристаллической решетки (рис. 3, г) происходит только начиная с нагрузки от 200 МПа.

Для проверки связи между потерей массы воды и увеличением давления был проведен корреляционный анализ, который показал наличие более сильной связи между давлением на образец в интервале значений от 0 до 200 МПа и массой отжимаемой связанной воды. При давлениях более 200 МПа связь между этими показателями менее выражена.

Данные факты говорят о том, что в первую очередь происходит отжим рыхло- и прочносвязанной воды (1 и 2 класс). Вода поверхности кристаллита (минерала) отжимается до нагрузки 200 МПа, затем наблюдается некоторое уменьшение потерь этой формы воды. Это объясняется тем, что в глине при увеличении давлений более 200 МПа происходит изменение структуры, наблюдаются параллельные процессы дробления и агрегации [11–20] глинистых частиц и как следствие изменение удельной поверхности и энергетического потенциала глинистых частиц.

При стрессовых давлениях происходит разрыв водородных связей между двухэтажными элементарными пакетами каолинита, что приводит к неупорядоченности в наложении слоев и их смещению друг относительно друга. Таким образом, часть внутренних гидроксидов начинает удаляться при более низких температурах, увеличивая потери массы ОН-групп на поверхности кристаллитов (минералов). В то же время за счет увеличения дефектности кристаллической структуры каолинита и в результате агрегации глинистых частиц часть гидроксидов оказывается в «ловушке» и начинает отжиматься при очень высоких температурах. Это объясняет увеличение потерь масс внутренних гидроксидов при давлениях свыше 200 МПа (рис. 5, в).

Следует отметить, что удельная поверхностная энергия зависит от изменяющейся под давлением структуры каолинита и от образования дефектов на поверхности частиц глины, так называемой «шероховатости». Под шероховатостью в данном случае понимается морфология поверхности глинистой частицы. Подробно методика определения шероховатости, расчет среднеарифметической шероховатости (R_c), изложена в работах В.В. Середина, М.В. Федорова и др. [21–22].

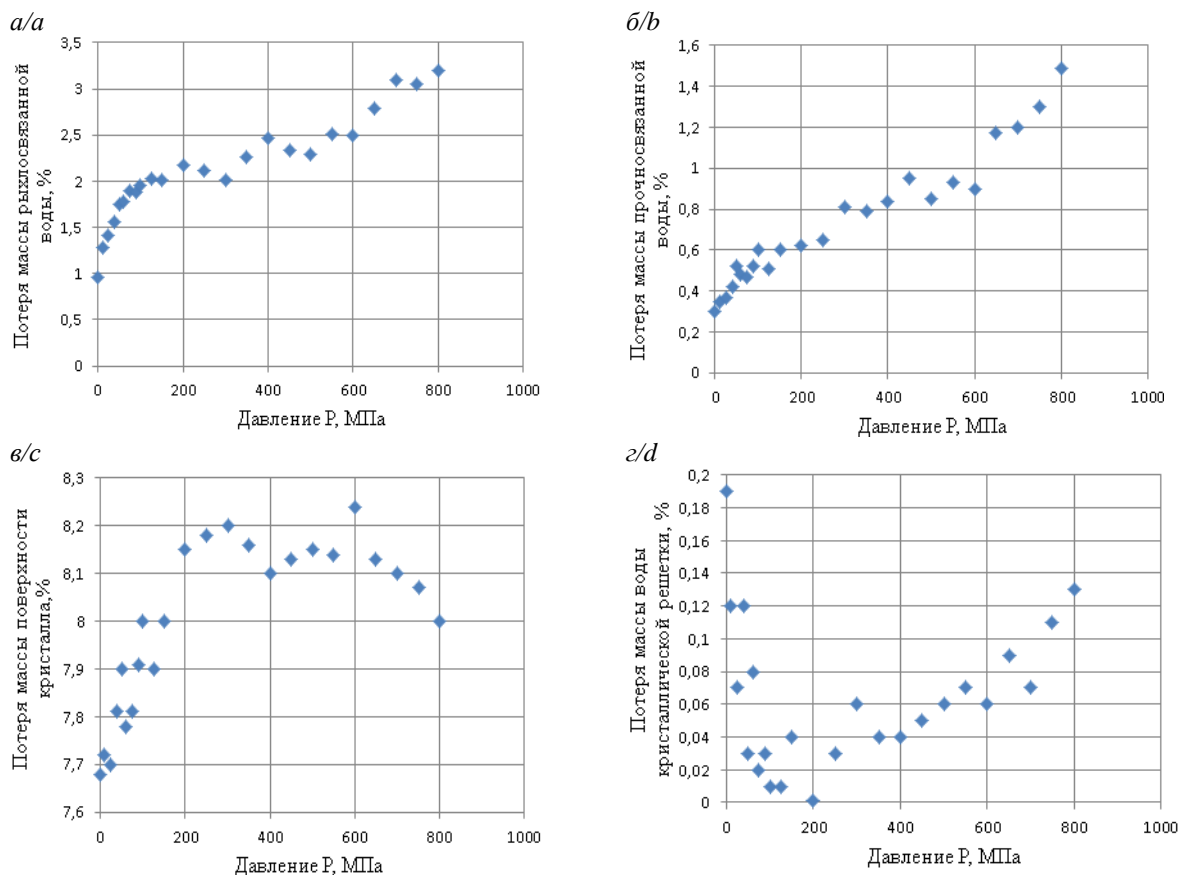


Рис. 3. Диаграмма рассеяния показателей: а) потери массы рыхлосвязанной воды (m_r) и давления (P); б) потери массы прочносвязанной (m_p) воды коллоида и давления (P); в) потери массы воды поверхности кристаллита (минерала) (m_{om}) и давления (P); г) потери массы кристаллической решетки минерала (m_{pc}) и давления (P)

Fig. 3. Scatter diagram of indicators: а) loss of mass of loosely bound water (m_r) and pressure (P); б) loss of mass of strongly bound (m_p) water of the colloid and pressure (P); в) loss of water mass of the crystallite (mineral) surface (m_{om}) and pressure (P); д) loss of mass of the crystal lattice of the mineral (m_{pc}) and pressure (P)

Поэтому изучение взаимосвязи между изменяющейся структурой глинистых частиц и массой отжимаемой воды является неотъемлемой частью данной работы.

В.Г. Шлыков в своей работе очень подробно описывал влияние дефектности (несовершенства) кристаллических структур каолиновых глин на их свойства [11]. Согласно его данным наиболее информативным показателем несовершенства структуры является размер области когерентного рассеивания (M_k), причем чем ниже этот показатель, тем более несовершенна структура и соответственно выше удельный энергетический потенциал частицы.

На основе проведенных нами исследований были построены диаграммы рассеивания показателя толщины кристаллита (минерала) (M_k) и массы удаляемой воды в процентах (рис. 4).

На основании диаграмм рассеивания (рис. 4) установлено, что при увеличении удельного энергетического потенциала (т. е. с уменьшением M_k и увеличением дефектности структуры) наблюдается увеличение удаляемой массы всех форм воды. Это говорит о прямой связи влияния несовершенства структуры кристаллита (минерала) на сорбционную активность глин.

В работах [12–22] подробно изучались вопросы влияния морфологии или шероховатости поверхности

глинистой частицы на изменение удельной поверхностной энергии. А изменение удельной поверхностной энергии частиц, в свою очередь, влияет на количество связанной воды, удерживаемой на ее поверхности. Поэтому важно оценить влияние шероховатости поверхности частиц на количество удаляемой воды из каолиновой глины.

На рис. 5 приведены диаграммы рассеивания между шероховатостью (R_c) поверхности частиц и изменением удаляемой массы воды всех форм.

По диаграммам рассеивания (рис. 5) наблюдается некоторая закономерность увеличения потерь всех форм воды с увеличением шероховатости. Но такая закономерность прослеживается только до значений шероховатости $R_c < 100$ нм, которая формируется при давлениях до 200 МПа. При более высоких значениях R_c и соответственно давлениях более 200 МПа выявить подобную закономерность не удалось. Корреляционный анализ подтверждает, что уменьшение массы рыхло-, прочносвязанной воды и воды поверхности кристаллитов (минералов) при нагрузках до 200 МПа тесно связано с изменением шероховатости (R_c) поверхности частиц (коэффициент корреляции 0,7...0,9), а при нагрузках выше 200 МПа связь не выявлена.

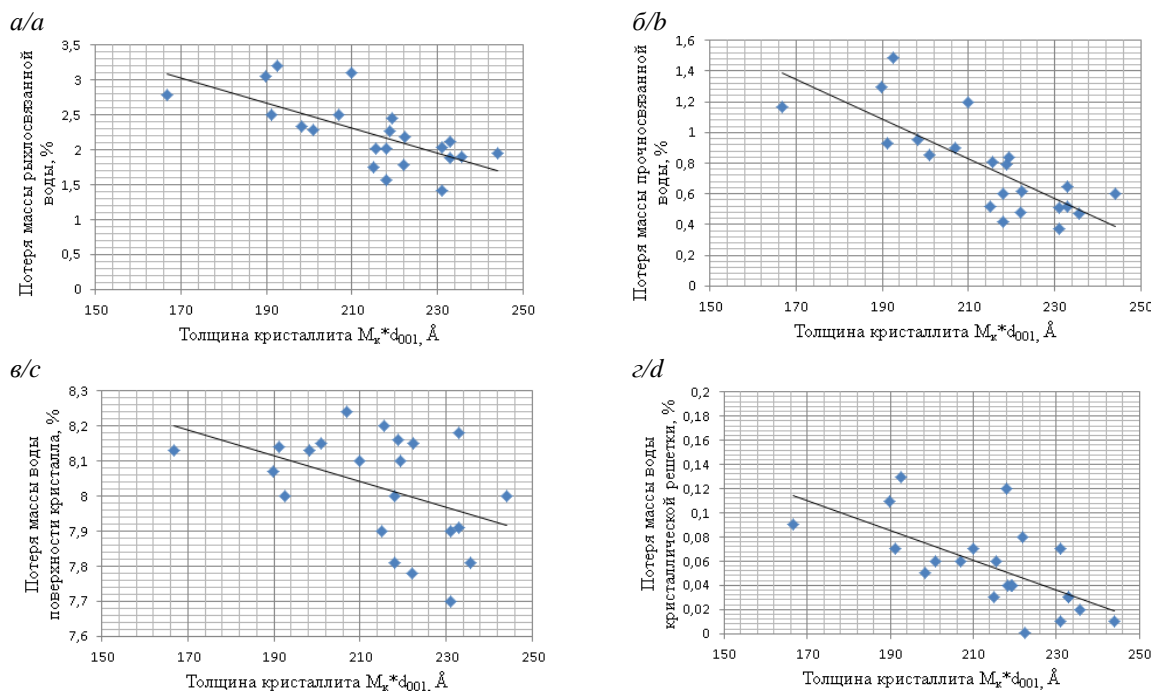


Рис. 4. Диаграмма рассеяния показателя M_c (толщиной кристаллита (минерала), Å) и потери массы связанной воды, %: а) рыхлосвязанной воды; б) прочносвязанной воды; в) воды поверхности кристаллита (минерала); г) кристаллической решетки минерала

Fig. 4. Scattering diagram of the M_c index (crystallite thickness, Å) and the mass loss of bound water, %: a) loosely bound water; b) tightly bound water; c) water of the crystallite surface; d) mineral crystal lattice

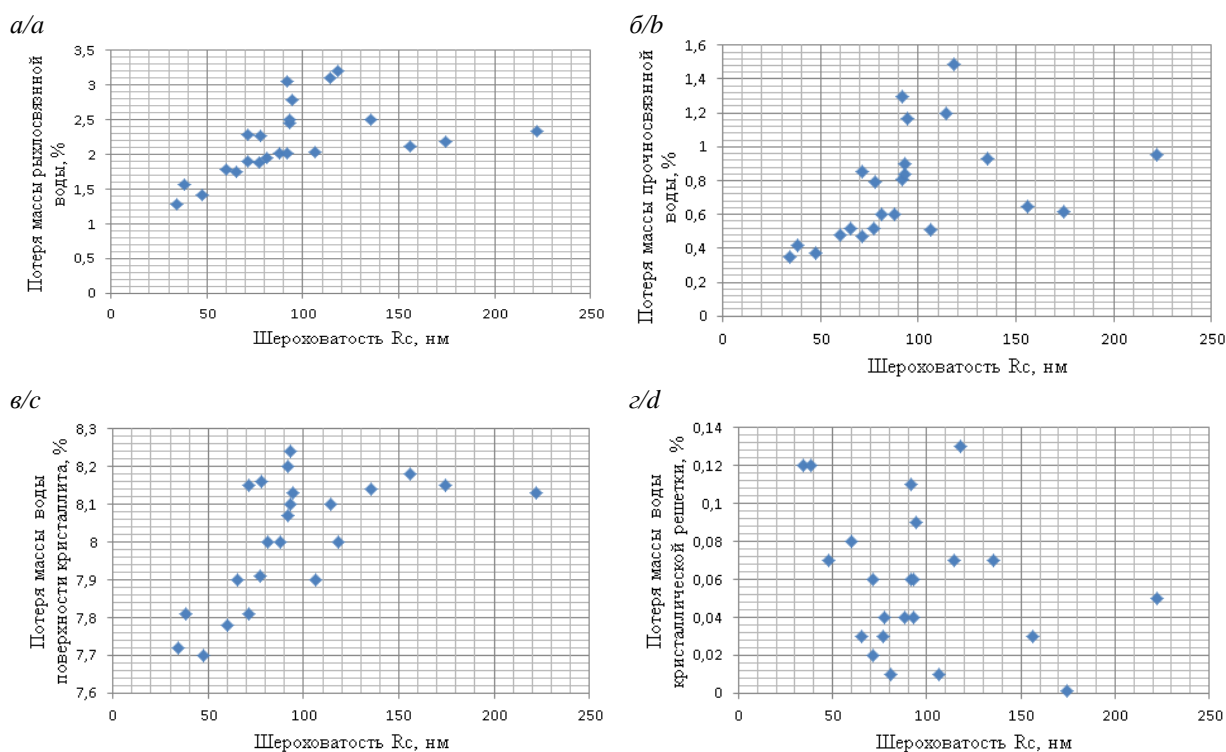


Рис. 5. Диаграмма рассеивания показателя R_c (шероховатость, нм) и потери массы: а) рыхлосвязанной воды; б) прочносвязанной воды; в) воды поверхности кристаллита (минерала); г) кристаллической решетки минерала

Fig. 5. Scattering diagram of the R_c index (roughness, nm) and weight loss: a) loosely bound water; b) tightly bound water; c) water of the crystallite surface; d) mineral crystal lattice

Вопросами классификации воды в грунтах занимались многие ученые: А.Ф. Лебедев, Дж. Боюкос, А.А. Роде, С.И. Долгов, Р.И. Злочевская, Е.М. Сергеев, В.Т. Трофимов, В.И. Осипов, В.Н. Соколов и др. Все классификации отличаются большим терминологическим разнообразием.

Полученные экспериментальные данные с позиций размерности структурных элементов грунта согласуются по физическому смыслу с классификацией связанной воды в глинах, разработанной Е.М. Сергеевым и др. Соотношение классификаций приведено в табл. 3.

Таблица 3. Сравнение классификации связанной воды, предложенной авторами, с классификацией по Е.М. Сергееву и др.

Table 3. Comparison of the bound water classification proposed by the authors with the classification according to E.M. Sergeev et al.

Класс связанной воды Bound water class	Классификация, предложенная авторами Classification proposed by the authors	Классификация по Е.М. Сергееву Classification by E.M. Sergeev
1	рыхлосвязанная вода поверхности коллоидов loosely bound water on the surface of colloids	осмотическая вода osmotic water
2	прочносвязанная вода поверхности коллоидов firmly bound water on the surface of colloids	рыхлосвязанная «вторично ориентированная вода полислоев» или пленочная вода loosely bound «secondary oriented water of multilayers» or film water
3	вода поверхности минералов (кристаллитов) surface water of minerals (crystallites)	прочносвязанная «вода ближней гидратации ионов» и «базальных поверхностей минералов» tightly bound «water of near hydration of ions» and «basal surfaces of minerals»
4	вода кристаллической решетки минералов mineral lattice water	прочносвязанная вода «углов и сколов поверхности кристаллической решетки» tightly bound water of «corners and cleavages of the crystal lattice surface»

Таким образом, в каолиновых глинах, подверженных высоким давлениям, происходит изменение морфологии частицы и как следствие изменение удельной поверхности, что оказывает влияние на сорбционную активность.

Заключение

На основании результатов опытных данных и анализа термограмм выделено четыре пика потери массы воды, в соответствии с этим предложена классификация связанной воды в глинах: рыхлосвязанная вода поверхности коллоидов; прочносвязанная вода поверхности коллоидов; вода поверхности минералов; вода кристаллической решетки. Воздействие высокого давления на массу удаляемой воды неоднозначно. Полученная классификация связан-

ной воды соотносится с классификацией, предложенной Е.М. Сергеевым.

Влияние стрессового давления на градиент потери массы воды неоднозначно. Это связано с тем, что под давлением происходит образование несовершенств (дефектов) структуры частицы, как следствие изменяется энергетический потенциал и сорбционная активность глинистых частиц. При этом выявлена тесная связь между показателем шероховатости и градиентом удаляемой связанной воды в интервале давлений от 0 до 200 МПа. При давлениях от 200 до 800 МПа какую-либо связь установить не удалось.

Таким образом, при сжатии в каолиновой глине изменяется структура, морфология частиц, содержание различных форм связанной воды, что в значительной мере может определять ее свойства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- О природе изменения свойств связанной воды в глинах под действием повышающих температур и давлений / Р.И. Злочевская, В.А. Королев, З.А. Кривошеева, Е.М. Сергеев // Вестник Московского университета. Серия: Геология. – 1977. – № 3. – С. 80–96.
- О природе изменения состава и свойств глинистых пород в процессе литогенеза / З.А. Кривошеева, Р.И. Злочевская, В.А. Королев, Е.М. Сергеев // Вестник Московского университета. Серия: Геология. – 1977. – № 4. – С. 60–73.
- Гойло Э.А., Котов Н.В., Франк-Каменецкий В.А. Экспериментальное исследование влияния давления и температуры на кристаллические структуры каолинита, иллита и монтмориллонита // Физические методы исследования осадочных пород. – М.: Наука, 1966. – С. 123–129.
- Франк-Каменецкий В.А., Котов Н.В., Гойло Э.А. Изменение структуры глинистых минералов в различных термодинамических условиях // Рентгенография минерального сырья. – 1970. – № 7. – С. 166–174.
- The effect of micronization on kaolinites and their sorption behavior / G. Suraj, C.S.P. Iyer, S. Rugmini, M. Lalithambika // Applied Clay Science. – 1997. – V. 12. – P. 111–130. DOI: 10.1016/S0169-1317(96)00044-0
- Королев В.А., Нестеров В.С. Физико-химические закономерности изменения электрических зарядов частиц глинистых грунтов // Инженерная геология. – 2017. – № 4. – С. 50–60. DOI: 10.25296/1993-5056-2017-4-50-60
- Кара-Сал Б.К., Сапелкина Т.В. Повышение адсорбционных свойств глинистых пород Тувы в зависимости от методов активации // Актуальные проблемы современной науки. – 2012. – № 5. – С. 158–162.
- Лучицкий И.В., Громин В.И., Ушаков Г.Д. Эксперименты по деформации горных пород в обстановке высоких давлений и температур. – Новосибирск: Изд-во «Наука», 1967. – 75 с.
- Котельников Д.Д., Конюхов А.И. Глинистые минералы осадочных пород. – М.: Недра, 1986. – 247 с.
- Осипов В.И., Соколов В.Н. Глины и их свойства. – М.: ГЕОС, 2013. – 576 с.
- Шлыков В.Г. Рентгеновский анализ минерального состава дисперсных грунтов. – М.: ГЕОС, 2006. – 176 с.
- Влияние давления на структуру каолинита в огнеупорных глинах Нижне-Увельского месторождения по данным ИК-спектроскопии / О.С. Ситева, Н.А. Медведева, В.В. Середин, Д.В. Иванов, К.А. Алванян // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 6. – С. 208–217.

13. Exploring the relationship between th(iv) adsorption and the structure alteration of phlogopite / H. Wu, P. Liu, W. Wu, Q. Fan, X. Zhao, P. Li, J. Liang, S. Qiang // *Applied Clay Science*. – 2018. – V. 152. – P. 295–302. DOI: 10.1016/j.clay.2017.11.026
14. Galan E., Aparicio P., Gonzalez Á. The effect of pressure on order/disorder in kaolinite under wet and dry conditions // *Clays and Clay Minerals*. – 2006. – V. 54. – № 2. – P. 230–239. DOI: 10.1346/CCMN.2006.0540208
15. Defects in structure as the sources of the surface charges of kaolinite / Xiaoyan Zhu, Zhichao Zhu, Xinrong Lei, Chunjie Yan // *Applied Clay Science*. – 2016. – V. 124–125. – P. 127–136.
16. Madejova J., Gates W.P., Petit S. IR Spectra of Clay Minerals // *Developments in Clay Science*. – 2017. – V. 8. – P. 107–149.
17. Методика оценки напряженного состояния горных пород / В.В. Середин, А.С. Хрулев, А.В. Растегаев, В.И. Галкин // *Горный журнал*. – 2020. – № 2. – С. 30–34.
18. Changes of energy potential on clay particle surfaces at high pressures / V.V. Seredin, A.V. Rastegaev, V.I. Galkin, G.A. Isaeva, T.Yu. Parshina // *Applied Clay Science*. – 2018. – V. 155. – P. 8–14. DOI: 10.1016/j.clay.2017.12.042
19. Changes in physical-chemical properties of clay under compression / V.V. Seredin, A.V. Rastegaev, E.G. Panova, N.A. Medvedeva // *International Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2017. – V. 4. – № 3. – P. 22–29.
20. Изменение сил адгезии на поверхности частиц при обработке монтмориллонитовой глины высоким давлением / М.В. Федоров, И.В. Лунегов, Н.А. Медведева, М.Ф. Леонович, А.В. Растегаев // *Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. – 2019. – Т. 19. – № 1. – С. 26–38.
21. Changes in adhesion force on kaolin under pressures / V.V. Seredin, M.V. Fyodorov, I.V. Lunegov, V.I. Galkin // *AIP Conference Proceedings*. – 2020. – V. 2216 – P. 040004.
22. Seredin V.V., Khrulev A.S. Variations of temperature in specimens of rocks and geomaterials under failure // *Journal of Mining Science*. – 2016. – V. 52. – P. 683–688.

Поступила 19.04.2021 г.

Информация об авторах

Середин В.В., доктор геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой инженерной геологии и охраны недр Пермского национального исследовательского университета.

Ядзинская М.Р., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры инженерной геологии и охраны недр Пермского национального исследовательского университета.

Андрианов А.В., научный сотрудник ООО НИПППД «Недра».

UDC 552.525

CLASSIFICATION OF BOUND WATER FORMS IN KAOLINITIC CLAYS

Valery V. Seredin¹,
seredin@nedra.perm.ru

Marina R. Yadzinskaya¹,
marinayadzinskaya@mail.ru

Andrey V. Andrianov²,
andrianov@nedra.perm.ru

¹ Perm State National Research University,
15, Bukirev street, Perm, 614068, Russia.

² «Nedra»,
13a, Lev Shatrov street, Perm, 614064, Russia.

Relevance. Water is the most important component of soils, as it influences the main geological processes. This is due to the peculiarities of its composition and structure. Many scientists have studied the issue of the content of bound water in clays. However, experiments on this issue are not enough.

The purpose of this work is to study the forms of bound water in kaolinite clays squeezed out at high pressures, as well as to reveal the relationship between the loss of water masses under pressure and thermodynamic parameters.

The object of the research is kaolinite clays.

Method. To achieve this goal, samples were prepared with various degrees of compression under pressure, and then thermogravimetric and diffractometric analyzes were performed.

The results of experimental data and analysis of thermograms made it possible to identify four peaks of water mass loss, in accordance with this, a classification of bound water in clay was proposed: loosely bound water on the surface of colloids; firmly bound water on the surface of colloids; mineral surface water; crystal lattice water. The impact of high pressure on the mass of removed water is ambiguous. This is due to the fact that the formation of defects occurs under pressure, as a result, the energy potential and sorption activity of clay particles change. At the same time, a close relationship was revealed between the roughness index and the gradient of the removed bound water in the pressure range from 0 to 200 MPa. Relationship is not established at pressures from 200 to 800 MPa.

Key words:

Kaolinite clay, forms of bound water, thermogravimetry, pressure, specific surface area, roughness, sorption activity.

REFERENCES

- Zlochevskaya R.I., Korolev V.A., Krivosheeva Z.A., Sergeev E.M. O prirode izmeneniya svoystv svyazannoy vody v glinakh pod deystviem povyshayushchikh temperatur i davleniy [On the nature of changes in the properties of bound water in clays under the influence of increasing temperatures and pressures]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Series: Geology*, 1977, no. 3, pp. 80–96.
- Krivosheeva Z.A., Zlochevskaya R.I., Korolev V.A., Sergeev E.M. O prirode izmeneniya sostava i svoystv glinistykh porod v protsesse litogeneza [On the nature of changes in the composition and properties of clay rocks during lithogenesis]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Series: Geology*, 1977, no. 4, pp. 60–73.
- Goilo E.A., Kotov N.V., Frank-Kamenetskii V.A. Eksperimentalnoe issledovanie vlieniya davleniya i temperatury na kristallicheskuyu strukturu kaolinita, illita i montmorillonita [Experimental study of the effect of pressure and temperature on the crystal structures of kaolinite, illite and montmorillonite]. *Fizicheskie metody issledovaniia osadochnykh porod* [Physical methods for studying sedimentary rocks]. Moscow, Nauka Publ., 1966. pp. 123–129.
- Frank-Kamenetskii V.A., Kotov N.V., Goilo E.A. Izmenenie struktury glinistykh mineralov v razlichnykh temodinamicheskikh usloviyakh [Changes in the structure of clay minerals under different thermodynamic conditions]. *Rentgenografiya mineralnogo syria*, 1970, no. 7, pp. 166–174.
- Suraj G., Iyer C.S.P., Rugmini S., Lalithambika M. The effect of micronization on kaolinites and their sorption behavior. *Applied Clay Science*, 1997, vol. 12, pp. 111–130. DOI: 10.1016/S0169-1317(96)00044-0
- Korolev V.A., Nesterov V.S. Physico-chemical regularities of changes of the clay soil particles electrical charge. *Inzhenernaia geologiya*, 2017, no. 4, pp. 50–60. In Rus. DOI: 10.25296/1993-5056-2017-4-50-60
- Kara-Sal B.K., Sapelkina T.V. Povyshenie adsorbtsionnykh svoystv glinistykh porod Tuvy v zavisimosti ot metodov aktivatsii [Increasing the adsorption properties of clay rocks of Tuva, depending on the activation methods]. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki*, 2012, no. 5, pp. 158–162.
- Luchitskiy I.V., Gromin V.I., Ushakov G.D. *Eksperimenty po deformatsii gornykh porod v obstanovke vysokikh davleniy i temperatur* [Experiments on deformation of rocks in environment of high pressures and temperatures]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1967. 75 p.
- Kotelnikov D.D., Konyukhov A.I. *Glinistyye mineraly osadochnykh porod* [Clay minerals of sedimentary rocks]. Moscow, Nedra Publ., 1986. 247 p.
- Osipov V.I., Sokolov V.N. Gliny i ikh svoystva [Clays and their properties]. Moscow, GEOS Publ., 2013. 576 p.
- Shlykov V.G. *Rentgenovskiy analiz mineralnogo sostava dispersnykh gruntov* [X-ray analysis of the mineral composition of dispersed soils]. Moscow, GEOS Publ., 2006. 176 p.
- Siteva O.S., Medvedeva N.A., Seredin V.V., Ivanov D.V., Alvaniyan K.A. Influence of pressure on kaolinite structure in fire-clays of the nizhne-uvetskoe deposit by IR spectroscopy *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 6, pp. 208–217. In Rus.
- Wu H., Liu P., Wu W., Fan Q., Zhao X., Li P., Liang J., Qiang S. Exploring the relationship between th(iv) adsorption and the structure alteration of phlogopite. *Applied Clay Science*, 2018, vol. 152, pp. 295–302. DOI: 10.1016/j.clay.2017.11.026
- Galan E., Aparicio P., Gonzalez A. The effect of pressure on order/disorder in kaolinite under wet and dry conditions. *Clays and Clay Minerals*, 2006, vol. 54, no. 2, pp. 230–239. DOI: 10.1346/CCMN.2006.0540208
- Xiaoyan Zhu, Zhichao Zhu, Xinrong Lei, Chunjie Yan. Defects in structure as the sources of the surface charges of kaolinite. *Applied Clay Science*, 2016, vol. 124–125, pp. 127–136.

16. Madejova J., Gates W.P., Petit S. IR Spectra of Clay Minerals. *Developments in Clay Science*, 2017, vol. 8, pp. 107–149.
17. Seredin V.V., Khrulev A.S., Rastegaev A.V., Galkin V.I. Procedure of stress state assessment in rocks. *Gornyi Zhurnal*, 2020, vol. 2, pp. 30–34.
18. Seredin V.V., Rastegaev A.V., Galkin V.I., Isaeva G.A., Parshina T.Yu. Changes of energy potential on clay particle surfaces at high pressures. *Applied Clay Science*, 2018, vol. 155, pp. 8–14. DOI: 10.1016/j.clay.2017.12.042
19. Seredin V.V., Rastegayev A.V., Panova E.G., Medvedeva N.A. Changes in physical-chemical properties of clay under compression. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2017, vol. 4, no. 3, pp. 22–29.
20. Fedorov M.V., Lunegov I.V., Medvedeva N.A., Leonovich M.F., Rastegaev A.V. Changes in adhesion forces on the surface of particles during the processing of montmorillonite clay by high pressure. *Vestnik PNRPU*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 26–38. In Rus.
21. Seredin V.V., Fyodorov M.V., Lunegov I.V., Galkin V.I. Changes in adhesion force on kaolin under pressures. *AIP Conference Proceedings*, 2020, vol. 2216, pp. 040004
22. Seredin V.V., Khrulev A.S. Variations of temperature in specimens of rocks and geomaterials under failure. *Journal of Mining Science*, 2016, vol. 52, pp. 683–688.

Received: 19 April 2021.

Information about the authors

Valeriy V. Seredin, Dr. Sc., professor, head of the Department of Engineering Geology, Perm State National Research University.

Marina R. Yadzinskaya, Cand. Sc., associate professor, Perm State National Research University.

Andrey V. Andrianov, researcher, «Nedra».

УДК 624.131.35

УТОЧНЕНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ МЕЖДУ ДАННЫМИ СТАТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ГРУНТОВ

Яббарова Екатерина Николаевна¹,
yabbarova.en@mail.ru

Латыпов Айрат Исламгалиевич¹,
airatlat@mail.ru

¹ Казанский (Приволжский) федеральный университет,
Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 4/5.

Актуальность исследования обусловлена возрастающим интересом к использованию метода статического зондирования грунтов, в том числе для определения характеристик грунтов непосредственно в полевых условиях.

Цель: построение корреляционных зависимостей между параметрами статического зондирования и деформационно-прочностными характеристиками разных видов грунтов, распространенных на территории г. Казани.

Объекты: дисперсные грунты и грунтовые массивы на территории г. Казани.

Методы: анализ отечественных и зарубежных исследований, статическое зондирование грунтов, лабораторные исследования свойств грунтов, статистическая обработка результатов испытаний.

Результаты. На примере грунтов, распространенных на территории г. Казани, показана возможность определения прочностных и деформационных характеристик с помощью метода статического зондирования с достоверностью, необходимой для проектирования оснований зданий и сооружений. Показано, что задача может быть решена уточнением региональных корреляционных зависимостей вида $E=f(q)$, $f=f(q)$ и $C=f(q)$, имеющих в нормативных документах, для грунтовых условий исследуемой территории. Данный вывод сделан на основании обработки результатов более чем 3000 точек статического зондирования, пройденных до глубины 28 м, проходки скважин глубиной до 30 м и параллельным лабораторным определением показателей состояния грунтов. Сопоставление данных полевых и лабораторных испытаний для разных видов грунтов показало, что деформационные и прочностные характеристики, полученные по данным статического зондирования, часто имеют завышенные значения. Данная проблема может быть решена с помощью создания региональных зависимостей в области статического зондирования грунтов, что позволит повысить точность получаемых инженерно-геологических данных.

Ключевые слова:

Грунт, статическое зондирование, деформационно-прочностные свойства, корреляционные зависимости, Казань.

Введение

Проектирование фундаментов предполагает высокую степень достоверности определяемых прочностных и деформационных характеристик грунтов, получаемых, как правило, на основании лабораторных испытаний. Вместе с тем для сооружений повышенного и нормального уровней ответственности рекомендуется уточнение лабораторных исследований полевыми методами. Кроме того, инженерно-геологические условия некоторых территорий не всегда позволяют отобрать образцы грунтов требуемого для лабораторных испытаний качества.

В связи с этим полевые методы исследований грунтовых массивов становятся все более востребованными при проведении инженерно-геологических и геотехнических изысканий.

Одним из наиболее популярных стандартизированных полевых методов для изучения грунтового массива в естественном сложении является метод статического зондирования вследствие высокой скорости проведения испытаний и технико-экономической рентабельности. Отечественные нормы, в частности СП 11-105, СП 446.1325800, содержат таблицы и формулы, связывающие между собой параметры зондирования и некоторые физико-механические характеристики грунтов [1, 2]. При этом точность таких определений невысока вследствие сбора и осреднения исходных данных для всей территории РФ. Кроме того, много-

численные исследования показывают, что важное значение при интерпретации данных полевых испытаний имеет учет генезиса грунтовых толщ и геолого-геоморфологических особенностей региона [3].

Отечественный и зарубежный опыт активного применения метода статического зондирования насчитывает несколько десятилетий. Общая тенденция исследований в этой сфере заключается в поиске и составлении уравнений, связывающих между собой один или несколько параметров зондирования с физическими или механическими характеристиками грунта [4, 5].

Так, Е.П. Конашинская для оценки деформационных свойств лессовых грунтов Ростовской области по данным испытаний статическим зондированием предлагает использовать следующие уравнения с учетом ввода дополнительных аргументов – верхнего предела текучести WL и показателя консистенции IL . Данные параметры повышают коэффициент корреляции и отражают влажностное состояние глинистых грунтов [6]:

$$E = 13,38 + 0,14q + 8,39f - 14,81IL;$$

$$E = -6,21 + 1,01q + 20,64f + 0,38WL.$$

Р.С. Зиангиров и В.И. Каширский предлагают использовать для супесчаных грунтов разного возраста и генезиса, распространенных на территории г. Москвы, зависимость вида $E_{su}=f(q)$ с учетом консистенции и гранулометрического состава [7]. Так, для песчаных

супесей уравнение связи имеет вид: $E_{ш}=2q+5$; для супесей твердой консистенции $E_{ш}=3,1q+8$; для текучей консистенции $E_{ш}=1,1q+3$.

О.В. Игнатова для четвертичных глинистых грунтов при использовании теории корреляционно-регрессионного анализа исследует зависимости модуля деформации по данным штамповых испытаний с удельным лобовым сопротивлением [8]. Кроме того, для улучшения тесноты связи в качестве входных параметров используются физические свойства грунтов: для деформационных характеристик природная влажность W , для прочностных – число пластичности I_p .

Г.Г. Болдырев и др. на примере одной из строительных площадок в г. Набережные Челны приводят скорректированные значения индекса типа грунта согласно ГОСТ 25100 [9].

И.Б. Рыжков и др. уточняют диапазоны применения классификационных диаграмм по данным статического зондирования для идентификации грунтов Башкирского региона [10].

Д.И. Вдовкина и др., проводя сравнительный анализ лабораторных и полевых испытаний для грунтов Казахстана, выявили необходимость корреляции полученных результатов исследований в связи с большим расхождением между методами [11].

Н.А. Зарипова для грунтовых условий г. Новосибирска по результатам комплексного изучения сравнивает деформационные характеристики и уточняет повышающие коэффициенты, приведенные в нормативной литературе [12].

Зарубежными учеными также проводятся исследования по поиску корреляционных соотношений между удельным лобовым сопротивлением и механическими характеристиками, а также корректировке коэффициентов для грунтов разного возраста и генезиса. Т. Lunne, Н. Christophersen для песчаных грунтов при удельном лобовом сопротивлении меньше 10 МПа используют поправочный коэффициент, равный 4 [13]. Ряд исследователей предлагают использовать значения корреляционного коэффициента α_{oed} от 1 до 8 для зависимости $E=f(q)$ [14–17]. G. Sanglerat et al. для уточнения коэффициента α_{oed} глинистых грунтов использует значение числа пластичности и естественной влажности [18, 19]. F. Kulhawу предлагает использовать общее уравнение для модуля деформации, не зависящее от вида грунта [20].

В результате анализа проведенных исследований можно заключить, что построение корреляционных зависимостей и расчет деформационно-прочностных характеристик по данным статического зондирования должны учитывать региональные генетические особенности грунтовых условий исследуемого региона.

Область исследования

Для уточнения корреляционных зависимостей авторами в программном комплексе Excel-MS создана база данных по параметрам статического зондирования и показателям состояния грунтов разных генетических групп. Основная единица базы данных – точка статического зондирования с параметрами общего бокового и лобового сопротивлений, которая включает в себя информацию о разновидности, генезисе, возрасте грунтов, их физико-механических характеристиках, пространственном расположении – абсолютная отметка, положение подошвы и кровли инженерно-геологического элемента.

В исследовании рассматривается неоген-четвертичная толща дисперсных грунтов до глубины 30 м, в пределах которой осуществляется инженерно-хозяйственная деятельность человека.

Для детального изучения корреляционных зависимостей толща неоген-четвертичных дисперсных грунтов была разделена на разновидности: пески, супеси, суглинки, глины. Далее, опираясь на исследования Н.И. Жарковой, собранная база данных по литолого-генетическому принципу подразделялась на две группы террас: низкие и высокие [21]. Суглинисто-супесчаные грунты, расположенные в пределах низких террас, находятся преимущественно в водонасыщенном состоянии и имеют низкую несущую способность. Высокие террасы имеют более глубокое залегание уровней грунтовых вод и, как следствие, более высокие значения несущей способности.

Выбор конкретного вида зависимости осуществляется на основе предварительного анализа диаграмм рассеяния или путем пробной аппроксимации имеющихся данных кривыми разного вида с последующим сравнением качества прогноза.

Для вывода корреляционных уравнений аллювиальных песчаных грунтов низких террас была использована выборка 115 определений, высоких – 144. Аппроксимация данных представлена на рис. 1, 2.

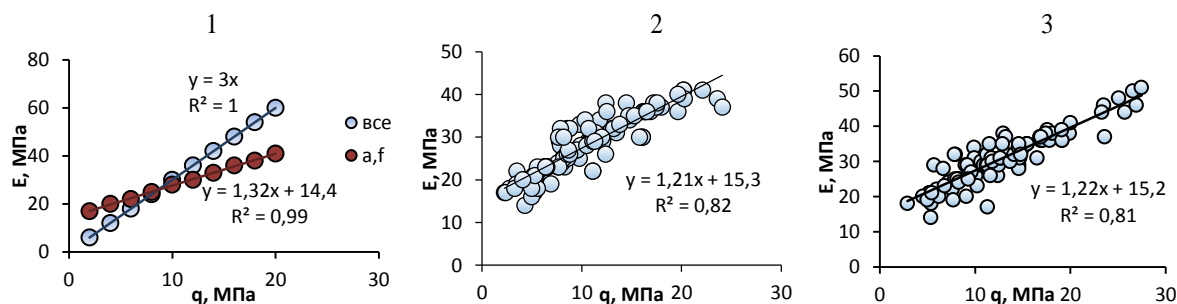


Рис. 1. Аппроксимация значений модуля деформации (E , МПа) песчаных грунтов: 1) СП 446.1325800; грунты Казани: 2) низкие террасы, 3) высокие террасы

Fig. 1. Approximation of deformation modulus values (E , MPa) for sandy soils: SP 446.1325800; soils of Kazan city: 2) low terraces, 3) high terraces

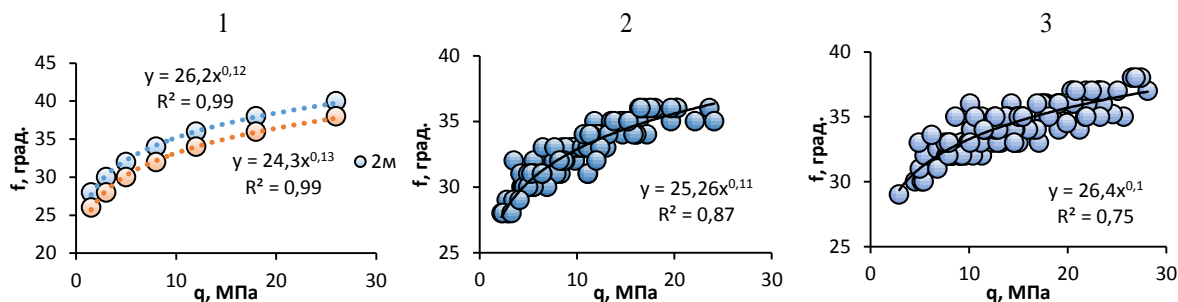


Рис. 2. Аппроксимация данных угла внутреннего трения (f , град.) песчаных грунтов: 1) СП 446.1325800; грунты Казани: 2) низкие террасы, 3) высокие террасы

Fig. 2. Approximation of data angle of internal friction (f , deg.) for sandy soils: 1) SP 446.1325800; soils of Kazan city: 2) low terraces, 3) high terraces

Для суглинистых грунтов низких террас количество определений составило $n=110$, для высоких террас – $n=185$. В результате аппроксимации данных табл. Ж.4 СП 446.1325800 и исследуемых грунтов подгоночные уравнения для определения деформационно-прочностных характеристик имеют следующий вид (рис. 3).

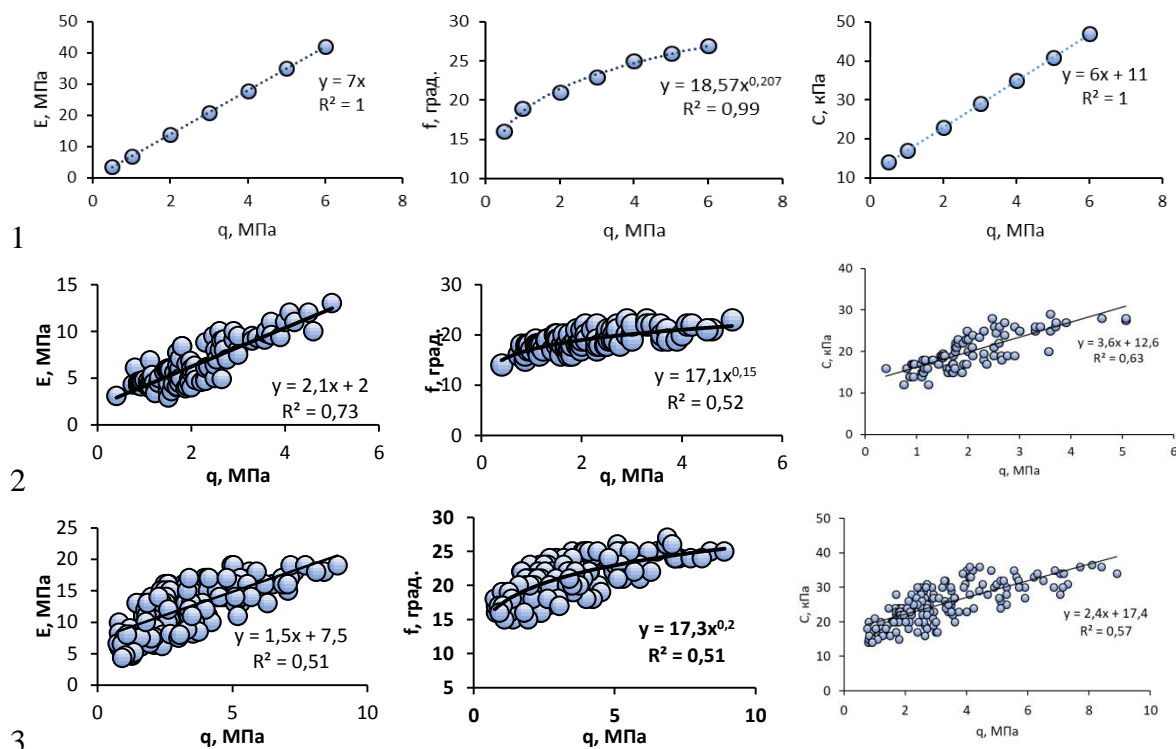


Рис. 3. Аппроксимация значений модуля деформации (E , МПа), угла внутреннего трения (f , град.), сцепления (C , кПа) для суглинков: 1) СП 446.1325800; грунты г. Казани: 2) низкие террасы; 3) высокие террасы

Fig. 3. Approximation of deformation modulus values (E , MPa), angle of internal friction (f , deg.), cohesion (C , kPa) for clay loam: 1) SP 446.1325800; soils of Kazan city: 2) low terraces, 3) high terraces

Наличие глинистых грунтов со статистически достоверной выборкой (72 определения) характерно только для низких террас. При аппроксимации данных табл. Ж.4 СП 446.1325800 и исследуемых грунтов были получены следующие корреляционные соотношения (рис. 4).

Свойства супесчаных грунтов по данным статического зондирования, как правило, определяют исходя из гранулометрического состава, так как они занимают промежуточное положение между песчаными и глинистыми грунтами. Аппроксимируя табличные данные и выборочную совокупность (99 определений)

супесчаных грунтов, приуроченных преимущественно к высоким террасам, получены уравнения линейной зависимости (рис. 5).

Анализ данных песчаных грунтов показал, что исследуемые зависимости для деформационно-прочностных характеристик имеют тот же характер, что и в действующих нормативных документах (СП 446.1325800, СП 11-105). Коэффициент корреляции для модуля деформации песков всех геоморфологических уровней составил $r=0,90$; для угла внутреннего трения низких террас – $r=0,93$, высоких террас – $r=0,86$.

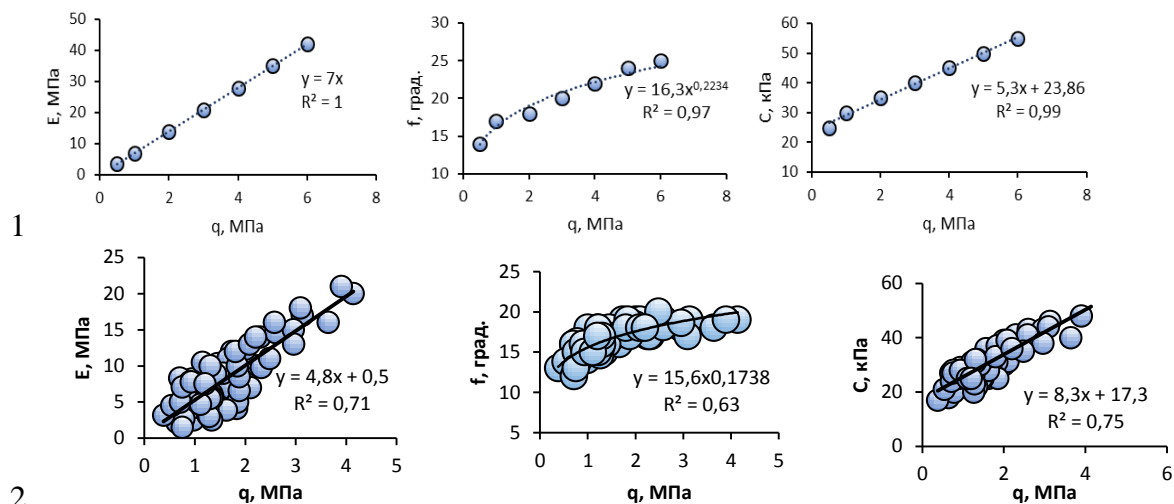


Рис. 4. Аппроксимация значений модуля деформации (E, МПа), угла внутреннего трения (f, град.), сцепления (C, кПа) для глин по 1) СП 446.1325800; 2) для г. Казани

Fig. 4. Approximation of deformation modulus values (E, MPa), angle of internal friction (f, deg.), cohesion (C, kPa) for clay: 1) SP 446.1325800; 2) for Kazan city

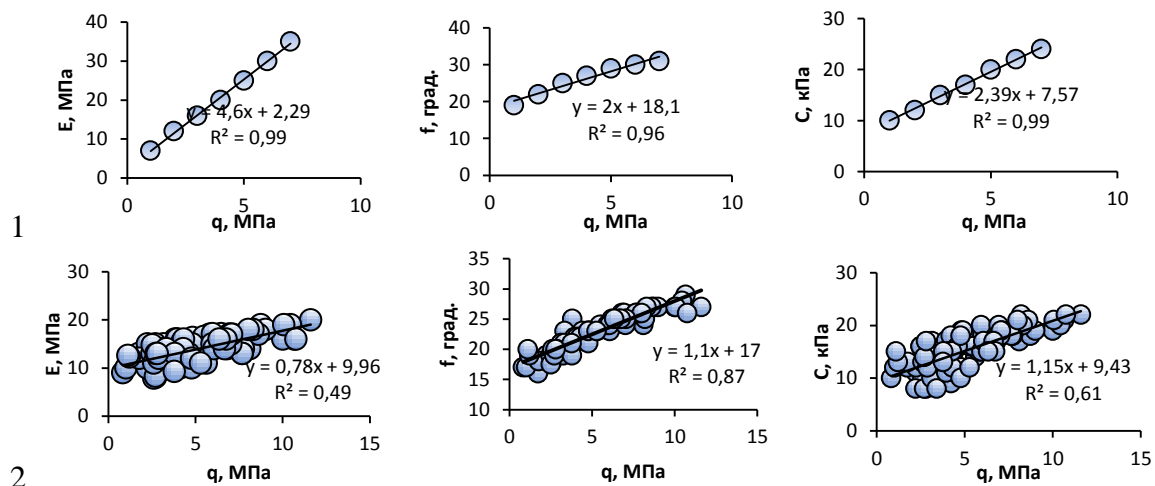


Рис. 5. Аппроксимация значений модуля деформации (E, МПа), угла внутреннего трения (f, град.), сцепления (C, кПа) для супесей 1) СП 446.1325800; 2) для г. Казани

Fig. 5. Approximation of deformation modulus values (E, MPa), angle of internal friction (f, deg.), cohesion (C, kPa) for sandy loam 1) SP 446.1325800; 2) for Kazan city

Для суглинистых грунтов г. Казани вид корреляционных зависимостей аналогичен приведенным в нормативных документах. Но коэффициент корреляции значительно ниже, чем для песчаных грунтов. Для низких террас зависимость $E=f(q)$ имеет коэффициент корреляции $r=0,85$, для высоких $r=0,71$; $f=f(q)$ характеризуется коэффициентом корреляции $r=0,71$ для всех геоморфологических уровней; для сцепления $C=f(q)$ коэффициент корреляции $r=0,78$ соответствует низким террасам и $r=0,75$ – высоким.

Глинистые грунты, согласно полученным зависимостям, характеризуются коэффициентом корреляции для модуля деформации, равным $r=0,84$, для угла внутреннего трения – $r=0,79$, для сцепления – $r=0,86$.

Для супесей значение модуля деформации описывается зависимостью $E=0,78q+9,96$ при $r=0,70$; для угла внутреннего трения $E=1,1q+17$ при $r=0,93$; для сцепления $C=1,15q+9,43$ при $r=0,78$.

Таким образом, на основе проведенного анализа составлена уточненная таблица нормативных механических характеристик по данным статического зондирования для связанных и несвязанных грунтов всех геоморфологических уровней (табл. 1, 2).

Заключение

Выполненное исследование показало, что для территорий, расположенных в долинах крупных рек, таких как р. Волга, характеристики грунтовых толщ могут достаточно эффективно определяться путем создания региональных корреляционных зависимостей, построенных на основании системного анализа полевых и лабораторных данных. В частности, в работе авторов задача решена уточнением корреляционных зависимостей, связывающих параметры статического зондирования (удельное лобовое сопротивление погружению зонда) и модуля деформации, угла внут-

ренного трения и удельного сцепления. Вышеуказанные характеристики являются основными при расчете фундаментов зданий и сооружений. Достоверность их определения значительным образом обеспечивается как безопасностью, так и экономической рентабельностью строительства.

Выбор метода полевых исследований связан с его доступностью, скоростью проведения и относительно низкой стоимостью. Кроме того, в последнее время популярность метода статического зондирования увеличивается во всем мире в связи с появлением дополнительных возможностей по измерению различных параметров.

Таблица 1. Уточненная таблица нормативных значений для глин, суглинков и супесей

Table 1. Updated table of standard values for clays, loams and sandy loams

qc, МПа MPa	Нормативные значения модуля деформации (E, МПа), угла внутреннего трения (f, град) и удельного сцепления (C, кПа) Standard values of deformation modulus and angle of internal friction (f, deg.) and cohesion (C, kPa)							
	E	Глины Clay		Суглинки Clay loam		Супеси Sandy loam		
		f	C	f	C	E	f	C
1	8	16	28	16	20	8	17	11
	10	–	–	18	25	10	18	12
2	12	18	33	16	20	11	18	12
	12	–	–	20	27	12	19	13
3	18	20	38	17	19	14	19	13
	14	–	–	22	29	12	19	13
4	20	22	43	17	19	15	20	14
	16	–	–	23	33	13	20	14
5	22	24	48	18	18	14	21	15
	17	–	–	24	34	14	21	15
6	24	26	51	19	17	–	–	–
	18	–	–	25	35	15	22	16
7	26	28	54	20	16	–	–	–
	19	–	–	26	36	16	23	17

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- СП 11-105-1997. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. I. – М.: Изд-во ПНИИИС Госстроя России, 1997. – 47 с.
- СП 446.1325800-2019. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ. – М.: Стандартинформ, 2019. – 82 с.
- Опыт инженерно-геологического районирования по несущей способности грунтов промплощадки Эльгинского горно-обогатительного комбината в Якутии / Л.А. Строкова, С.А. Дмитриева, Н.В. Осьмушкина, А.В. Осьмушкин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 2. – С. 175–185.
- Латыпов А.И., Яббарова Е.Н. Об интерпретации данных статического зондирования грунтов. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 10. – С. 82–90.
- Яббарова Е.Н., Латыпов А.И. Построение корреляционных зависимостей между данными статического зондирования грунтов и показателями их состояния на примере Вахитовского района города Казани // Уральская горная школа – регионам. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2019. – С. 88–89.
- Конашинская Е.П. Оценка устойчивости геологической среды урбанизированных территорий при геоэкологических исследованиях на основе результатов статического зондирования

Таблица 2. Уточненная таблица нормативных значений для песков

Table 2. Updated table of standard values for sands

qc, МПа MPa	Нормативные значения модуля деформации (E, МПа) и угла внутреннего трения (f, град.) Standard values of deformation modulus (E, MPa) and angle of internal friction (f, deg.)	
	E	f
2	17/21	28/30
4	19/22	29/31
6	22/25	30/32
8	25/27	31/33
10	28/28	32/33
12	30/30	33/34
14	32/32	34/34
16	34/34	35/35
18	35/35	36/36
20	36/36	37/37

В числителе указаны значения для низких надпойменных террас, в знаменателе – для высоких.

The numerator indicates the values for low terraces above the floodplain, in the denominator – for high terraces.

Сравнение полученных корреляционных зависимостей с приведенными в действующих нормативных документах на территории Российской Федерации показало, что региональный подход является наиболее перспективным, так как подразумевает уточнение определяемых параметров с учетом особенностей конкретных территорий, интегрирующих совокупность геологических, гидрогеологических, геоморфологических, инженерно-геологических, структурных и других факторов.

На примере г. Казани показан механизм уточнения и построения таких зависимостей с выделением отдельных участков, полигонов и типов грунтовых толщ. Очевидно, что для территории Российской Федерации такой подход будет наиболее перспективным.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-90089.

(на примере лессовых отложений Нижнего Дона): дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Ростов-на-Дону, 2002. – 155 с.

- Зиангиров Р.С., Каширский В.И. Статическое зондирование в инженерно-геологических изысканиях // Инженерная геология. – 2006. – № 2. – С. 13–20.
- Игнатова О.И. Исследование корреляционных связей деформационных и прочностных характеристик грунтов разного генезиса с удельным сопротивлением грунта при статическом зондировании // Вестник НИЦ Строительство. – 2014. – № 10. – С. 60–68.
- Болдырев Г.Г., Идрисов И.Х. О классификации грунтов по данным статического зондирования // Инженерная геология. – 2019. – № 4. – С. 6–23.
- Использование статического зондирования для распознавания литологических разновидностей грунтов / И.Б. Рыжков, А.Р. Хафизов, А.Ф. Хазипова Р.Г. Халиуллин, Е.А. Попкова, Р.Г. Мамлеева // Современные строительные материалы и технологии. – Калининград: Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, 2020. – С. 190–201.
- Вдовкина Д.И., Пономарева М.В. Сравнительный анализ лабораторных и полевых методов исследований грунтов // Труды университета. – 2020. – № 1. – С. 57–61.
- Зарипова Н.А. Сравнение методов определения деформационных свойств грунтов стройплощадки по ул. Столетова в г. Новосибирске // Вестник КузГТУ. – 2019. – № 5. – С. 92–100.
- Lunne T., Christophersen H.P. Interpretation of cone penetrometer data for offshore sands // Houston. – 1983. – V. 15. – P. 181–192.

14. Senneset K., Janbu N. Shear strength parameters obtained from static cone penetration tests // ASTM STP 883, Symposium. – Amsterdam, 1984. – P. 41–54.
15. Meigh A.C. Cone penetration testing – methods and interpretation. – London: CIRIA, 1987. – 141 p.
16. Mayne P.W. Stress-strain-strength-flow parameters from enhances in-situ tests // International Conference on In-Situ Measurement of Soil Properties and Case Histories. – Bali, Indonesia, 2001. – P. 27–48.
17. Jones G.A., Rust E.A. Piezometer penetration testing CPTU // 2nd European Symposium on Penetration Testing. – Amsterdam, 1982. – V. 2. – P. 607–613.
18. Sanglerat G. The penetrometer and soil exploration. – Amsterdam: Elsevier Publ. Company, 1972. – 488 p.
19. Direct soil classification by static penetrometer with special friction sleeve / G. Sanglerat, T. Nhim, M. Sejourne, R. Andina // Proc. of the First European Symposium on Penetration Testing. – Stockholm, 1974. – V. 2.2. – P. 337–344.
20. Kulhawy F.N., Mayne P.H. Manual on estimating soil properties for foundation design. – USA: Electric Power Research Institute, 1990. – 306 p.
21. Жаркова Н.И. Закономерности формирования инженерно-геологических условий на территории г. Казани // Георесурсы. – 2006. – № 2 (19). – С. 16–19.

Поступила 19.04.2021 г.

Информация об авторах

Яббарова Е.Н., ассистент кафедры общей геологии и гидрогеологии Института геологии и нефтегазовых технологий Казанского (Приволжского) федерального университета.

Латыпов А.И., кандидат технических наук, доцент кафедры общей геологии и гидрогеологии Института геологии и нефтегазовых технологий Казанского (Приволжского) федерального университета.

UDC 624.131.35

CLARIFICATION OF CORRELATION DEPENDENCES BETWEEN THE PARAMETERS OF CONE PENETRATION TEST AND STRENGTH AND DEFORMATION CHARACTERISTICS OF SOILS

Ekaterina N. Yabbarova¹,
yabbarova.en@mail.ru

Airat I. Latypov¹,
airatlat@mail.ru

¹ Kazan (Volga Region) Federal University,
4/5, Kremlevskaya street, Kazan, 420004, Russia.

The relevance of the research is caused by the increasing use of the method of cone penetration test, including the use for determining the characteristics of soils directly in the field.

The main aim of the research is to construct the correlation dependences between the parameters of cone penetration test and the strength and deformation characteristics of different types of soils distributed in the territory of Kazan.

Objects: dispersive soils and soil massifs on the territory of Kazan.

Methodology: analysis of domestic and foreign research, cone penetration test, laboratory studies of soil properties, statistical processing of test results.

Results. On the example of soils common in the territory of Kazan, the possibility of determining the strength and deformation characteristics of soils using the cone penetration test with the reliability necessary for the design of construction objects is shown. It is shown that the problem can be solved by refining the correlation dependences of the form $E=f(q)$, $f=f(q)$ and $C=f(q)$, available in regulatory documents for the soil conditions of the study area. This conclusion is based on processing the results of more than 3000 points of cone penetration test passed to a depth of 28 m, drilling wells up to a depth of 30 m, as well as laboratory tests of soil samples to determine the strength and deformation characteristics. Comparison of field and laboratory test data for different types of soils showed that the values of mechanical characteristics obtained from cone penetration test data are often overestimated. This problem can be solved by creating regional dependencies in the field of cone penetration test of soils, which will improve the accuracy of the obtained engineering and geological data.

Key words:

Soil, cone penetration test, strength and deformation characteristics, correlation dependences, Kazan.

The research was financially supported by the RFBR within the scientific project no. 19-35-90089.

REFERENCES

- SP 11–105. *Inzhenerno-geologicheskie izyskaniya dlya stroitelstva* [Engineering geological site investigations for construction]. Moscow, PNIIS Gosstroya Rossii Publ., 1997. P. I, 47 p.
- SP 446.1325800. *Inzhenerno-geologicheskie izyskaniya dlya stroitelstva. Obshchie pravila proizvodstva rabot* [Engineering surveys for construction]. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 82 p.
- Strokova L.A., Dmitrieva S.A., Osmushkina N.V., Osmushkin A.V. Experience of engineering-geological zoning on bearing capacity of soils of the industrial site of Elga coal-preparation plant in Yakutia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 2, pp. 175–185. In Rus.
- Latypov A.I., Yabbarova E.N. On interpretation of the data of soil cone penetration test. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 10, pp. 82–90. In Rus.
- Yabbarova E.N., Latypov A.I. Postroenie korrelyatsionnykh zavisimostey mezhdru dannymi staticheskogo zondirovaniya gruntov i pokazatelyami ikh sostoyaniya na primere Vakhitovskogo rayona goroda Kazani [Construction of correlations between the data of static sounding of soils and indicators of their state on the example of the Vakhitovsky district of the city of Kazan]. *Uralskaya gornaya shkola – regionam* [Ural mining school – to regions]. Ekaterinburg, Ural State Mine University Publ., 2019. pp. 88–89.
- Konashinskaya E.P. *Otsenka ustoichivosti geologicheskoy sredy urbanizirovannykh territoriy pri geologicheskikh issledovaniyakh na osnovе rezultatov staticheskogo zondirovaniya (na primere lessovykh otlozheniy Nizhnego Dona)*. Dis. Kand. nauk [Assessment of the stability of the geological environment of urbanized territories in geocological studies based on the results of static sounding (for example loess deposits of the Lower don). Cand. Diss.]. Rostov-on-Don, 2002. 155 p.
- Ziangirov R.S., Kashirskii V.I. Staticheskoe zondirovanie v inzhenerno-geologicheskikh izyskaniyakh [Cone penetration test in geotechnical investigations]. *Inzhenernaya geologiya*, 2006, no. 2, pp. 13–20.
- Ignatova O.I. Issledovanie korrelyatsionnykh svyazey deformatsionnykh i prochnostnykh kharakteristik gruntov raznogo genezisa s udelnym soprotivleniem grunta pri staticheskom zondirovanii [Investigation of correlations of deformation and strength characteristics of soils of different genesis with soil resistivity during cone penetration test]. *Vestnik NIC Stroitelstvo*, 2014, no. 10, pp. 60–68.
- Boldyrev G.G., Idrisov I.H. About classification of soils by cone penetration test. *Engineering geology*, 2019, no. 4, pp. 6–23. In Rus.
- Ryzhkov I.B., Khafizov A.R., Khazipova A.F., Khaliullin R.G., Popkova E.A., Mamleeva R.G. Ispolzovanie staticheskogo zondirovaniya dlya raspoznavaniya litologicheskikh raznovidnostey gruntov [The use of cone penetration test for recognition of lithological varieties of soils]. *Sovremennye stroitelnye materialy i tekhnologii* [Modern building materials and technologies]. Kaliningrad, Immanuel Kant Baltic Federal University Publ., 2020. pp. 190–201.
- Vdovkina D.I., Ponomareva M.V. Sravnitelny analiz laboratornykh i polevykh metodov issledovaniya gruntov [Comparative analysis of laboratory and field methods of soil research]. *Trudy universiteta*, 2020, no. 1, pp. 57–61.
- Zaripova N.A. Comparison of methods for estimating soil deformation properties on the construction site on Stoletov Street, Novosibirsk. *Bulletin KuzGTU*, 2019, no. 5, pp. 92–100. In Rus.
- Lunne T., Christophersen H.P. *Interpretation of cone penetrometer data for offshore sands*. Houston, 1983. Vol. 15, pp. 181–192.
- Senneset K., Janbu N. Shear strength parameters obtained from static cone penetration tests. *ASTM STP 883, Symposium*. Amsterdam, 1984. pp. 41–54.

15. Meigh A.C. *Cone penetration testing – methods and interpretation*. London, CIRIA, 1987. 141 p.
16. Mayne P.W. Stress-strain-strength-flow parameters from enhanced in-situ tests. *International Conference on In-Situ Measurement of Soil Properties and Case Histories*. Bali, Indonesia, 2001. pp. 27–48.
17. Jones G.A., Rust E.A. Piezometer penetration testing CPTU. 2nd *European Symposium on Penetration Testing*. Amsterdam, 1982. Vol. 2, pp. 607–613.
18. Sanglerat G. *The penetrometer and soil exploration*. Amsterdam, Elsevier Publ. Company, 1972. 488 p.
19. Sanglerat G., Nhim T., Sejourne M., Andina R. Direct soil classification by static penetrometer with special friction sleeve. *Proc. of the First European Symposium on Penetration Testing*. Stockholm, 1974. Vol. 2.2, pp. 337–344.
20. Kulhawy F.N., Mayne P.H. *Manual on estimating soil properties for foundation design*. USA, Electric Power Research Institute, 1990. 306 p.
21. Zharkova N.I. Zakonomernosti formirovaniya inzhenerno-geologicheskikh usloviy na territorii g. Kazani [Regularities of formation of engineering and geological conditions on the territory of Kazan]. *Georesursy*, 2006, no. 2 (19), pp. 16–19.

Received: 19 April 2021.

Information about the authors

Ekaterina N. Yabbarova, assistant, Kazan (Volga Region) Federal University.

Airat I. Latypov, Cand. Sc., associate professor, Kazan (Volga Region) Federal University.

УДК 536.42

ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ ЗАСЫПКИ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЁ СУШКИ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРЕВА

Нига́й Наталья Андреевна¹,
nigay_n.a@mail.ru

Сыро́дой Семен Владимирович¹,
ssyrodooy@yandex.ru

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

Актуальность. Анализ прогнозов специалистов показывает, что, несмотря на активные попытки многих государств внедрить возобновляемые источники энергии в национальные энергосистемы к 2040 г., основная доля производства тепловой и электрической энергии все равно будет приходиться на тепловые электрические станции, сжигающие уголь. По этой причине на настоящее время ведутся активные разработки новых технологий сжигания топлива, которые позволят полностью (или хотя бы значительно) сократить использование угля на тепловых электрических станциях (ТЭС). Одним из самых перспективных направлений является сжигание древесной биомассы в топочных устройствах котельных агрегатов. Но полномасштабное внедрение биомассы в качестве топлива на ТЭС тормозится неизученностью процессов тепло- и массопереноса, протекающих при сушке влажной древесины. Это обусловлено тем, что, как правило, свежесрубленная древесина значительно насыщена влагой. Сжигание такой высокообводненной биомассы в топочных устройствах неэффективно. При большой исходной влажности много теплоты будет затрачиваться на испарение и, соответственно, коэффициент полезного действия цикла парогенерации может снижаться. Поэтому исходное влагонасыщенное сырье необходимо предварительно подсушивать. В связи с этим одной из открытых проблем энергетики в настоящее время является неизученность основных закономерностей процессов тепло- и массопереноса, протекающих в слое мелкодиспергированной влажной древесной биомассы в период её сушки. Последнее необходимо для разработки фундаментальных основ проведения опытно-конструкторских работ по обоснованию конструктивных характеристик современных установок термической подготовки биомассы к сжиганию. При этом, как правило, сушку больших объемов древесины проводят в крупногабаритном оборудовании бункерного типа. В таких бункерах высота слоя биомассы может достигать нескольких десятков метров (до 20 м). Очевидно, что в этих условиях градиенты плотности древесины (за счет слеживаемости) также будут значительны. При этом достоверно установлено, что на характеристики влагоудаления из слоя влажной древесной биомассы оказывает влияние не только температура внешней среды, но и фильтрационные характеристики (плотность, размер пор, проницаемость, пористость) высушиваемого материала. Но до настоящего времени в мировой научной периодике нет публикаций с описанием результатов оценки влияния плотности засыпки влажной мелкодиспергированной древесины на характеристики и условия её дегидратации.

Цель: анализ влияния плотности засыпки слоя влажной древесной биомассы на процессы тепломассопереноса в условиях высокотемпературного нагрева.

Объект: влажная древесная биомасса (сосновые опилки). Экспериментальные исследования проведены при следующих значениях степени уплотнения биомассы $\gamma=1$; $\gamma=1,5$; $\gamma=2$ (где $\gamma=\rho/\rho_0$; ρ – плотность спрессованной биомассы; ρ_0 – плотность биомассы без уплотнения).

Метод: экспериментальные исследования скорости влагоудаления и времени дегидратации влажной древесной биомассы при высокотемпературном нагреве ($T_g=333\text{--}393\text{ К}$) в сушильной камере СНОЛ-3.5-М2У42.

Результаты. Приведены результаты экспериментальных исследований процессов влагоудаления из слоя влажной древесной биомассы (на основе типичных отходов деревообработки – опилки) при интенсивном радиационно-конвективном нагреве. Проанализировано влияние насыпной плотности (ρ) слоя древесины на характеристики процесса влагоудаления. Установлено, что увеличение степени уплотнения (γ) навески биомассы приводит к существенному изменению динамики влагоудаления (увеличение γ с 1 до 2 приводит к двукратному росту времени сушки t_d). При этом показано, что такое увеличение t_d характерно для всех исследованных температур окружающей среды T_g . Также по результатам экспериментов установлены характерные значения массовой скорости влагоудаления (W_{eva}) в зависимости от времени при различных степенях уплотнения слоя биомассы. Показано, что в условиях относительно низких температур внешней среды функция $W_{eva}(t)$ имеет волновой характер. Сформулирована гипотеза, описывающая такую зависимость значений W_{eva} от времени. Результаты проведенных исследований существенно расширяют современные представления о процессах сушки мелкодиспергированной древесной биомассы в условиях интенсивного радиационно-конвективного нагрева.

Ключевые слова:

Древесная биомасса, отходы деревообработки, плотность засыпки, сушка, тепломассоперенос, скорость влагоудаления.

Введение

Древесная биомасса, как показывают современные эконометрические прогностические модели [1–4] развития альтернативной (нетрадиционной) энергетики, является наиболее перспективным и относительно дешевым возобновляемым энергоносителем, доступным практически во всех регионах планеты. Древесина

представляет собой так называемое углерод-нейтральное топливо [5, 6]. Последнее обусловлено тем, что при сжигании древесной биомассы образуется CO_2 , который не нарушает общего баланса диоксида углерода в атмосфере [7, 8]. Также стоит сказать, что по результатам экспериментальных исследований [9] установлено, что при горении древесной биомассы

практически не образуется антропогенных оксидов азота (NO_x [10]) и серы (SO_x [11]). По этой причине в развитых (технологически и экономически) странах тепловые электрические станции переводят с угольного топлива на древесную биомассу или на совместное сжигание биомассы с углем [12]. Например, с 2016 г. тепловая электрическая станция Avedore работает на отходах лесопиления и сельского хозяйства [13].

Однако стоит отметить, что даже у одной из самых теплолюбивых пород древесины – дуба, теплота сгорания ($(Q_n^d)_{wood} = 11 \text{ МДж} \cdot \text{кг}^{-1}$ [14]) ниже теплолотворной способности самого низкосортного угля (бурого) ($(Q_n^d)_{lign} = 13 \text{ МДж} \cdot \text{кг}^{-1}$ [15]). Соответственно, энергоэффективность котельного агрегата, сжигающего древесину, ниже, чем у котла, работающего на угле [16]. Эффективность использования биомассы в энергетике можно повысить за счет разработки новых технологий подготовки и сжигания древесной биомассы в топочных устройствах котельных агрегатов [17] или её пирогазетической [18] переработки в другие продукты.

Одним из важнейших этапов подготовки биомассы перед её использованием (как прямое сжигание [19] в топках паровых и водогрейных котлов, так и термическая переработка [20]) является дегидратация (сушка). Цель последнего – доведение содержания влаги в биомассе до оптимальных (для применяемой технологии) значений (зависит от целей дальнейшего использования биомассы). Несмотря на значимость этого технологического этапа использования биомассы в энергетике, пока нет общей теории, описывающей процессы удаления влаги из насыпных слоёв биомассы. Ранее не было изучено влияние плотности засыпки (ρ) на процессы тепло- и массопереноса в слое влажной древесины. Поэтому на настоящее время пока не разработано физической модели, адекватно описывающей процесс влагоудаления из слоя биомассы с большим градиентом ρ . Цель исследования – анализ влияния плотности засыпки слоя влажной древесной биомассы на процессы тепломассопереноса в условиях высокотемпературного нагрева.

Методика проведения экспериментов

В качестве объекта экспериментальных исследований рассматривались типичные отходы деревообработки (древесные опилки). На рис. 1 представлена навеска (металлический поддон, заполненный биомассой) влажной древесной биомассы с разной степенью уплотнения $\gamma = \rho/\rho_0 = 1$ (рис. 1, а) и $\gamma = 1,5$ (рис. 1, б), где ρ – плотность спрессованного материала; ρ_0 – плотность биомассы (без уплотнения).

Подготовка материала проводилась аналогично [21]. Типичные отходы деревообработки получены путем обработки монолитного (предварительно высушенного) фрагмента древесины сосны электрическим шерхебельным станком. Типичный характерный размер опилок составлял 1–1,5 мм. Сухие опилки предварительно опрыскивались водой из пульверизатора для достижения типичной (по условиям хранения [22]) влажности $\varphi_0 = 55 \pm 5 \%$ (значения рассчиты-

вались по формуле (1)). Значения φ_0 древесной биомассы определялись по формуле:

$$\varphi_0 = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_1} \right) \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где m_1 , m_2 – масса влажной и сухой биомассы, кг. В случае если влажность навески древесной биомассы превышала контрольное (по условиям эксперимента) значение, навеска вновь высушивалась, и вся процедура влагонасыщения биомассы проводилась заново.

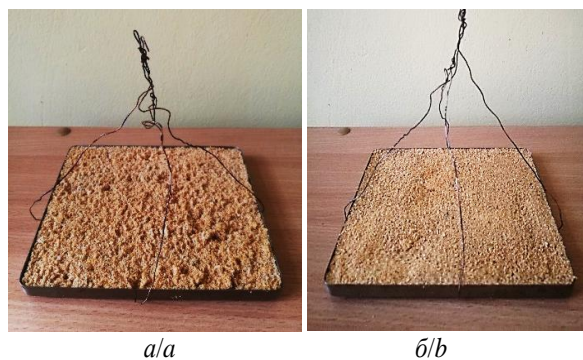


Рис. 1. Навеска влажной древесной биомассы (опилки) при плотности засыпки а) $\gamma = 1$, без уплотнения; б) с уплотнением $\gamma = 1,5$

Fig. 1. Weighing amount of wet woody biomass (sawdust) with a backfill density; а) $\gamma = 1$ without compaction; б) with compaction $\gamma = 1,5$

После достижения планируемой влажности древесная биомасса укладывалась в плоский металлический поддон (рис. 1) размерами 145×125 мм (площадь $F_{eva} = 0,0181 \text{ м}^2$) для проведения процедуры дегидратации в сушильной камере.

При проведении экспериментальных исследований анализировалось влияние насыпной плотности на характеристики и условия процесса сушки. При проведении экспериментов значения γ варьировались в достаточно широком, но в то же время применимом в реальной практике диапазоне $\gamma = 1-2$. Дальнейшее увеличение значений γ нецелесообразно в связи с увеличением затрат на прессовку мелкодиспергированной биомассы. Также при этом растет металлоемкость конструкции бункеров топлива и опорных колонн главного здания ТЭС.

Эксперименты проведены на установке, представленной на рис. 2. Последняя состоит из сушильной камеры СНОЛ-3.5-М2У42 (максимальная температура нагрева $T_{max} = 423 \text{ К}$; скорость нагрева 10 К/с), регистратора температуры внутрикамерного пространства (хромель-алюмелевой термопары (ТХА), погрешность измерения T_g $0,1 \text{ С}$) и высокоточных лабораторных весов АСЗЕТ (CITIZEN) СУ-1003 (погрешность измерения массы $0,001 \text{ г}$).

Навеска древесной биомассы через подвесное соединение крепилась к электронным лабораторным весам (рис. 2). Поддон с опилками размещался в центральной части сушильной камеры. С целью измерения температуры непосредственно вблизи от поверхности исследуемого биоматериала устанавливалась хромель-

алюмелевая термопара (толщина проволоки 0,1 мм; диаметр спая 0,25 мм; время задержки измерений $\tau_{del}=0,3$ с; погрешность измерения температуры $\pm 1,5$ К).

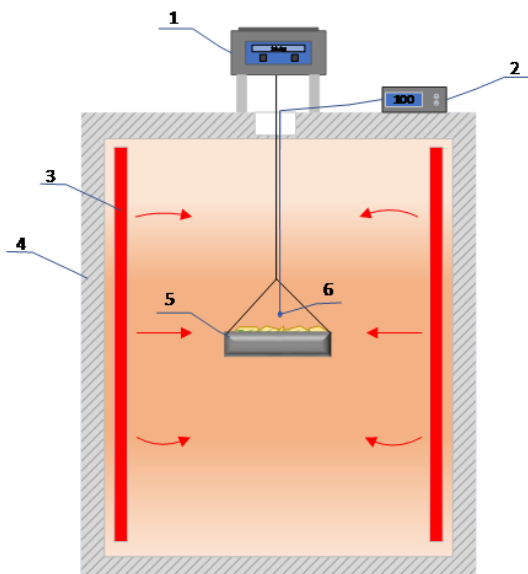


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 – высокоточные лабораторные весы ACZET (CITIZEN) CY-1003; 2 – терморегулятор TPM 500; 3 – электрический нагреватель; 4 – сушильная камера SNOL-3.5-M2U42; 5 – поддон с навеской древесной биомассы; 6 – термоэлектрический преобразователь

Fig. 2. Schematic diagram of the experimental setup: 1 – high-precision laboratory scales ACZET (CITIZEN) CY-1003; 2 – thermostat TPM 500; 3 – electric heater; 4 – drying chamber SNOL-3.5-M2U42; 5 – pallet with a weight of woody biomass; 6 – thermoelectric converter

Эксперименты проводились по следующей схеме: на первом этапе осуществлялся нагрев внутрикамерного воздуха до заданной (по условиям эксперимента) температуры. Момент наступления постоянной (по времени) температуры воздуха в камере определялся из условия $d\bar{T}/dt=0$ (где $\bar{T} = \frac{1}{V} \int T dV$ – средняя по объему температура, К; V – объем сушильной камеры, m^3). Затем навеска древесной биомассы помещалась в полость внутрикамерного пространства сушильной установки (рис. 2). Температура воздуха в камере варьировалась в диапазоне от 333 до 393 К. Регистрация массы навески биомассы m_{bio} проводилась непрерывно в течение всего эксперимента. Каждый опыт продолжался до тех пор, пока значения m_{bio} не переставали изменяться. Период времени от начала теплового воздействия до момента наступления режима, при котором выполнялось условие $dm/dt=d\varphi/dt=0$, считался временем дегидратации (t_d).

Каждый эксперимент выполнялся в идентичных условиях не менее пяти раз. С целью определения доверительных интервалов результаты каждой серии эксперимента статистически обрабатывались в соответствии с методикой [23]. На первом этапе определя-

лись математические ожидания значений влажности $M[\varphi]$. Затем рассчитывалась дисперсия $D[\varphi]$ (с учетом оценки смещения) и среднеквадратичное отклонение $\sigma[\varphi]$. После отбраковки промахов по критерию Романовского [24] определялись доверительные интервалы $\Delta\varphi$. Относительная погрешность измерения $\delta(\varphi)$ при доверительной вероятности 0,95 составила 8 %. Массовая скорость влагоудаления вычислялась по формуле:

$$W_{eva} = \frac{m_1}{F_{eva}} \frac{d\varphi}{dt} = \frac{1}{F_{eva}} \frac{dm}{dt}. \quad (2)$$

Результаты

На рис. 3 представлены зависимости безразмерных массовых скоростей влагоудаления из слоя влажных сосновых опилок ($\mathcal{L}=W_{eva}/W_0$, где W_{eva} – скорость влагоудаления, зарегистрированная в экспериментах (рассчитана по формуле (2)); W_0 – скорость испарения воды со свободной поверхности при температуре поверхности фронта испарения $T_{eva}=T_g$, рассчитанная в соответствии с методикой [25] (значения W_0 приведены в таблице)) от безразмерного времени сушки $\xi=t/t_d$ (где t_d – полное время сушки (таблица)) при различных значениях плотности засыпки в диапазоне температур от 333 до 393 К.

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 3, показывает, что степень уплотнения биомассы оказывает существенное влияние на динамику влагоудаления. Увеличение плотности засыпки приводит к значительному росту скорости удаления влаги в идентичных (по температуре внутрикамерного пространства) условиях нагрева. Это, скорее всего, связано с тем, что увеличение γ приводит к уменьшению пористости структуры слоя биомассы. В результате теплопроводность биоматериала увеличивается. Последнее приводит к тому, что слой биомассы быстрее прогревается и, соответственно, процесс испарения воды интенсифицируется. Известно [26–30], что в процессе сушки фронт испарения воды движется от поверхности нагрева в глубинные слои древесины. В результате формируется высокопористый каркас с высоким термическим сопротивлением ($R_{hr}=\lambda^{-1}$). Увеличение γ приводит к уменьшению R_{hr} . В результате слой биомассы прогревается более интенсивно по сравнению с навеской биомассы при $\gamma=1$.

Таблица. Значения скоростей влагоудаления (W_0) и полного времени сушки (t_d) при различных степенях уплотнения биомассы (γ)

Table. Values of rates of moisture removal (W_0) and total drying time (t_d) at different degrees of biomass compaction (γ)

		$\gamma=1$			
		$T_g=333$ К	$T_g=353$ К	$T_g=373$ К	$T_g=393$ К
W_0 , кг/м ² ·с		$9,08 \cdot 10^{-5}$	$22,8 \cdot 10^{-5}$	$50,18 \cdot 10^{-5}$	$50,18 \cdot 10^{-5}$
t_d , с		6600	4200	3000	3000
		$\gamma=1,5$			
W_0 , кг/м ² ·с		$9,08 \cdot 10^{-5}$	$22,8 \cdot 10^{-5}$	$50,18 \cdot 10^{-5}$	$50,18 \cdot 10^{-5}$
t_d , с		8400	5400	4200	3600
		$\gamma=2$			
W_0 , кг/м ² ·с		$9,08 \cdot 10^{-5}$	$22,8 \cdot 10^{-5}$	$50,18 \cdot 10^{-5}$	$50,18 \cdot 10^{-5}$
t_d , с		12000	7800	6000	5400

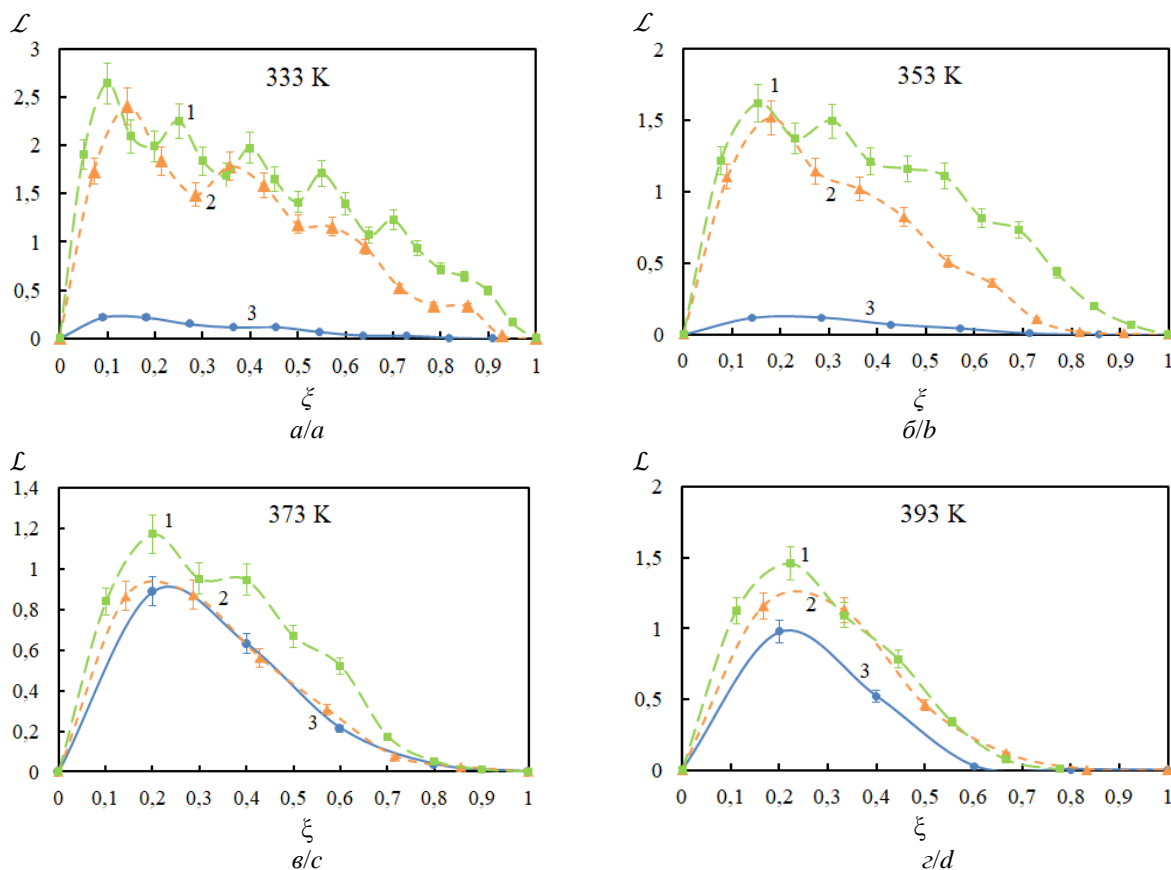


Рис. 3. Зависимости безразмерной скорости влагоудаления $\mathcal{L}=W_{\text{evd}}/W_0$ от безразмерного времени сушки $\xi=t/t_d$ при температуре в сушильной камере: а) $T_g=333$ К; б) $T_g=353$ К; в) $T_g=373$ К; г) $T_g=393$ К. Где 1 – $\gamma=2$; 2 – $\gamma=1,5$; 3 – $\gamma=1$. Вертикальные отрезки на рисунках иллюстрируют доверительные интервалы определения \mathcal{L}

Fig. 3. Dependences of the dimensionless rate of moisture removal $\mathcal{L}=W_{\text{evd}}/W_0$ on the dimensionless drying time $\xi = t/t_d$ at the temperature in the drying chamber: а) $T_g=333$ К; б) $T_g=353$ К; в) $T_g=373$ К; г) $T_g=393$ К. Where 1 – $\gamma=2$; 2 – $\gamma=1,5$; 3 – $\gamma=1$. The vertical bars in the figures illustrate the confidence intervals for determination of \mathcal{L}

Анализ $\mathcal{L}(\xi)$ показывает, что в начальный период ($\xi=0-0,2$) нагрева слоя влажной биомассы массовая скорость влагоудаления быстро повышается до максимальных значений, затем значения \mathcal{L} постепенно понижаются. При этом по результатам анализа рис. 3 можно отметить существенно нелинейный немонотонный характер зависимостей $\mathcal{L}(\xi)$ в условиях низкотемпературного (в диапазоне изменения $T_g=333-373$ К) нагрева. В то же время при относительно высоких температурах внешней среды ($T_g=393$ К) значения \mathcal{L} монотонно возрастают до момента времени $\xi=0,2$, а затем монотонно убывают. Это, скорее всего, связано с тем, что с ростом температуры быстро повышается скорость испарения влаги. Этот фазовый переход сопровождается интенсивным поглощением теплоты в малой по размерам зоне, соответствующей окрестности границы раздела «влажная биомасса – сухая биомасса». Так как пористость материала навески велика (составляет около 75 %), водяной пар заполняет поры. Давление паров воды в малой окрестности зоны интенсивного испарения растёт. Но так как температура смеси «древесина–воздух–пары воды» в слое, прилегающем к открытой поверхности навески, выше, чем в её нижней части (нагреваемой менее интенсивно), часть водяных па-

ров фильтруются в более «холодную» часть навески. При охлаждении водяных паров происходит их конденсация на поверхностях элементов древесных опилок. В результате концентрация воды в нижней (более холодной) части навески повышается. Соответственно, после прогрева этой части навески растёт приток паров воды с единицы поверхности и интенсифицируется охлаждение биомассы.

На рис. 4 приведены зависимости безразмерного времени сушки $\xi=t/t_d^0$ (где t – время сушки; t_d^0 – время сушки при $\gamma=1$) от степени уплотнения (γ) навески биомассы при варьировании температуры внешней среды в диапазоне от 333 до 393 К. Анализ зависимостей рис. 4 показывает, что γ оказывает существенное влияние на характеристики и условия сушки. Так, увеличение γ в два раза приводит к практически двукратному замедлению процесса сушки. Последнее обусловлено тем, что уплотнение биомассы приводит к уменьшению пористости и, соответственно, проницаемости структуры слоя мелкодиспергированной древесины. В результате существенно возрастает сопротивление фильтрации. Последнее приводит к тому, что при $\gamma=2$ водяным парам значительно труднее выйти на поверхность слоя биомассы, чем при степени уплотнения $\gamma=1$.

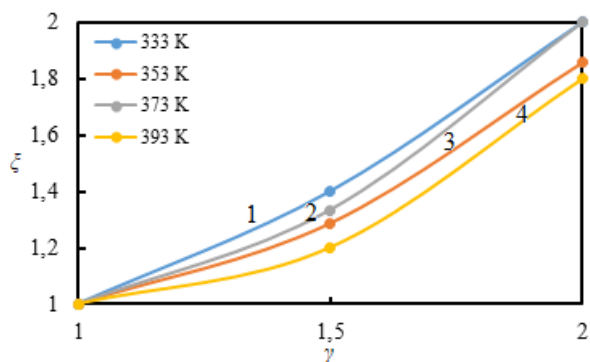


Рис. 4. Зависимости безразмерного времени сушки $\zeta=t/t_d^0$ от степени уплотнения навески биомассы γ при температуре в сушильной камере: 1) $T_g=333$ К; 2) $T_g=353$ К; 3) $T_g=373$ К; 4) $T_g=393$ К

Fig. 4. Dependences of the dimensionless drying time $\zeta=t/t_d^0$ on degree of biomass backfill compaction γ at the temperature in the drying chamber: 1) $T_g=333$ K; 2) $T_g=353$ K; 3) $T_g=373$ K; 4) $T_g=393$ K

Стоит отметить, что по результатам экспериментов установлена практически линейная зависимость $\zeta(\gamma)$. При этом температура внешней среды не оказывает значимого влияния на динамику сушки. В этих условиях можно обосновано предположить, что фильтрационные характеристики (плотность засыпки, проницаемость, пористость, размер пор) слоя древесной биомассы также оказывают значимое влияние, как и условия нагрева (температура внешней среды, интенсивность теплообмена, радиацион-

ные характеристики поверхностей нагрева сушильной камеры).

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования показали, что степень уплотнения биомассы оказывает существенное влияние на характеристики и условия процесса сушки слоя влажной древесной биомассы во всем исследуемом диапазоне температур внешней среды ($T_g=333$ – 393 К). Показано, что увеличение плотности засыпки биомассы приводит к линейному росту времени полного влагоудаления.

Также показано, что в условиях относительно низких температур внешней среды ($T_g=333$ К) массовая скорость влагоудаления в течение времени изменяется немонотонно. Установлено, что в начальный период нагрева W_{eva} быстро возрастает до максимального значения, а затем постепенно уменьшается. При этом зависимость $W_{eva}(t)$ имеет, как правило, вейвлетовый (или волновой) характер. С увеличением температуры внешней среды ($T_g=373$ К) характер зависимостей $W_{eva}(t)$ меняется на монотонный. По результатам экспериментов разработана гипотеза, описывающая этот эффект. Показано, что определяющим динамику влагоудаления фактором (наряду с температурой внешней среды) является фильтрация водяных паров сквозь пористый древесный каркас.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10015).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Chitawo M.L., Chimphango A.F.A., Peterson S. Modelling sustainability of primary forest residues-based bioenergy system // Biomass and Bioenergy. – 2018. – V. 108. – P. 90–100.
- Improving the financial performance of solid forest fuel supply using a simple moisture and dry matter loss simulation and optimization / A. Laurén, A. Asikainen, Jyrki-Pekko Kinnunen, M. Palviainen, L. Sikanen // Biomass and Bioenergy. – 2018. – V. 116. – P. 72–79. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.05.014> (дата обращения 07.03.2021).
- Mitigating environmental pollution and impacts from fossil fuels: the role of alternative fuels / L. Liu, S.Y. Cheng, J.B. Li, Y.F. Huang // Energy Sources. P. A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. – 2007. – V. 29. – P. 1069–1080.
- Hansen K., Mathiesen B.V., Skov I.R. Full energy system transition towards 100 % renewable energy in Germany in 2050 // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2019. – V. 102. – P. 1–13.
- Pelletization of wood and alternative residual biomass blends for producing industrial quality pellets / R. Garcia, M.V. Gil, F. Rubiera, C. Pevida // Fuel. – 2019. – V. 251. – P. 739–753.
- Dogan E., Inglesi-Lotz R. Analyzing the effects of real income and biomass energy consumption on carbon dioxide (CO2) emissions: empirical evidence from the panel of biomass-consuming countries // Energy. – 2017. – V. 138. – P. 721–727. DOI: 10.1016/j.energy.2017.07.136.
- Deng T., Alzahrani A.M., Bradley M.S. Influences of environmental humidity on physical properties and attrition of wood pellets // Fuel Processing Technology. – 2019. – V. 185. – P. 126–132.
- The influence of biomass energy consumption on CO2 emissions: a wavelet coherence approach / F. Bilgili, İ. Öztürk, E. Koçak, Ü. Bulut, Y. Pamuk, E. Muğaloğlu, H.H. Bağlıtaş // Environmental Science and Pollution Research International. – 2016. – V. 23. – P. 19043–19061. DOI: 10.1007/s11356-016-7094-2.

- Fogarasi S., Cormos C.-C. Technico-economic assessment of coal and sawdust co-firing power generation with CO2 capture // Journal of Cleaner Production. – 2015. – V. 103. – P. 140–148.
- Li P.W., Chyang Ch.S. A comprehensive study on NOx emission and fuel nitrogen conversion of solid biomass in bubbling fluidized beds under staged combustion // Journal of the Energy Institute. – 2020. – V. 93. – P. 324–334.
- Emissions of SO2, NOx, CO2, and HCl from Co-firing of coals with raw and torrefied biomass fuels / E. Rokni, X. Ren, A. Panahi, Y.A. Levendis // Fuel. – 2018. – V. 211. – P. 363–374.
- Beagle E., Belmont E. Comparative life cycle assessment of biomass utilization for electricity generation in the European Union and the United States // Energy Policy. – 2019. – V. 128. – P. 267–275.
- Voytenko Y., Peck P. Organisational frameworks for straw-based energy systems in Sweden and Denmark // Biomass and Bioenergy. – 2012. – V. 38. – P. 34–48. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.049> (дата обращения 07.03.2021).
- Hao H., Chow C.L., Lau D. Effect of heat flux on combustion of different wood species // Fuel. – 2020. – V. 278. – P. 118325. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118325> (дата обращения 07.03.2021).
- Mirkowski Z., Jelonek I. Petrographic composition of coals and products of coal combustion from the selected combined heat and power plants (CHP) and heating plants in Upper Silesia, Poland // International Journal of Coal Geology. – 2019. – V. 201. – P. 102–108.
- A review on biomass as a fuel for boilers / R. Saidur, E.A. Abdelaziz, A. Demirbas, M.S. Hossain, S. Mekhilef // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2011. – V. 15. – P. 2262–2289.
- Characterization of emissions from a pilot-scale combustor operating on coal blended with woody biomass / T.L.B. Yelverton, A.T. Brashear, D.G. Nash, J.E. Brown, C.F. Singer, P.H. Kariher, J.V. Ryan, P. Burnette // Fuel. – 2020. – V. 264. – P. 116774. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116774> (дата обращения 07.03.2021).

18. Liang J., Shan G., Sun Y. Catalytic fast pyrolysis of lignocellulosic biomass: critical role of zeolite catalysts // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2021. – V. 139. – P. 110707.
19. Mladenović M., Paprika M., Marinković A. Denitrification techniques for biomass combustion // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2018. – V. 82. – P. 3350–3364.
20. Multi-scale complexities of solid acid catalysts in the catalytic fast pyrolysis of biomass for bio-oil production – a review / R. Liu, M. Sarker, Md.M. Rahman, Ch. Li, M. Chai, R. Cotillon, N.R. Scott // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2020. – V. 80. – P. 100852.
21. Features of the processes of heat and mass transfer when drying a large thickness layer of wood biomass / G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, N.A. Nigay, V.I. Maksimov, N.Yu. Gutareva // *Renewable Energy*. – 2021. – V. 169. – P. 498–511. URL: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.137> (дата обращения 07.03.2021).
22. Estimating the fuel moisture content to control the reciprocating grate furnace firing wet woody biomass / N. Striūgas, L. Vorotinskienė, R. Paulauskas, R. Navakas, A. Džiugys, L. Narbutas // *Energy Conversion and Management*. – 2017. – V. 149. – P. 937–949. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.014> (дата обращения 07.03.2021).
23. Schenck H. *Theories of engineering experimentation*. – London: McGraw-Hill, 1968. – 385 p.
24. Радкевич Я.М., Лактионов Б.И. *Метрология, стандартизация*. – М.: Высшая школа, 2004. – 767 с.
25. Хашенко А., Вечер О., Дискаева Е. Исследование температурной зависимости скорости испарения жидкостей со свободной поверхности и скорости кипения жидкости на твердой поверхности нагрева // *Известия Алтайского государственного университета*. – 2016. – Т. 1. – № 1. – С. 84–86.
26. Characteristics and conditions for ignition of bio-coal mixtures based on coal and forest combustible material / S.V. Syrodoy, G.V. Kuznetsov, N.Y. Gutareva, Zh.A. Kostoreva, A.A. Kostoreva, N.A. Nigay // *Journal of the Energy Institute*. – 2020. – V. 93. – P. 1978–1992. URL: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2020.04.013> (дата обращения 07.03.2021).
27. Theoretical justification of utilization of forest waste by incineration in a composition of bio-water-coal suspensions. Ignition stage / G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, D.Yu. Malyshev, N.Yu. Gutareva, N.A. Nigay // *Applied Thermal Engineering*. – 2020. – V. 170. – P. 115034. URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115034> (дата обращения 07.03.2021).
28. Estimation of energy consumption for drying of forest combustible materials during their preparation for incineration in the furnaces of steam and hot water boilers / N.A. Nigay, G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, N.Y. Gutareva // *Energy Sources. P. A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. – 2020. – V. 42. – P. 1997–2005. URL: <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1604910> (дата обращения 07.03.2021).
29. Mathematical and physical modeling of the coal–water fuel particle ignition with a liquid film on the surface / V. Salomatov, G. Kuznetsov, S. Syrodoy, N. Gutareva // *Energy Reports*. – 2020. – V. 6. – P. 628–643. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.02.006> (дата обращения 07.03.2021).
30. Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Gutareva N.Y. Influence of a wet wood particle form on the characteristics of its ignition in the high-temperature medium // *Renewable Energy*. – 2020. – V. 145. – P. 1474–1486. URL: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.046> (дата обращения 07.03.2021).

Поступила 11.03.2021 г.

Информация об авторах

Нига́й Н.А., аспирант Инженерной школы энергетики НОЦ И.Н. Бутакова Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Сыро́дой С.В., кандидат технических наук, научный сотрудник Инженерной школы энергетики НОЦ И.Н. Бутакова Национального исследовательского Томского политехнического университета.

УДК 536.42

INFLUENCE OF DENSITY OF WOOD BIOMASS FILLING ON THE CHARACTERISTICS OF ITS DRYING UNDER HIGH TEMPERATURE HEATING

Natalya A. Nigay¹,
nigay_n.a@mail.ru

Semen V. Syrodoy¹,
ssyrodoy@yandex.ru

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

Relevance. The analysis of the forecasts of specialists shows that despite the active attempts of many states to introduce renewable energy sources into national energy systems by 2040, the bulk of the production of thermal and electric energy will still fall on thermal power plants that burn coal. For this reason, at present, active development of new technologies for fuel combustion is underway, which will completely (or at least significantly) reduce the use of coal at thermal power plants. One of the most promising areas is the combustion of woody biomass in the furnaces of boiler units. But the full-scale introduction of biomass as a fuel at thermal power plants is hampered by the lack of knowledge of heat and mass transfer that occur during wet wood drying. This is due to the fact that, as a rule, freshly harvested wood is significantly saturated with moisture. Combustion of such a highly watered biomass in combustion devices is ineffective. With a high initial humidity, a lot of heat will be spent on evaporation and, accordingly, the efficiency of the steam generation cycle may decrease. Therefore, the initial moisture-saturated raw material must be pre-dried. In this regard, one of the open problems of the energy sector at the present time is the lack of study of the main regularities of heat and mass transfer, occurring in a layer of finely dispersed moist woody biomass during its drying. The latter is necessary for development of the fundamental foundations for conducting experimental design work to substantiate the design characteristics of modern installations for biomass thermal preparation for combustion. In this case, as a rule, drying of large volumes of wood is carried out in large-sized equipment of the bunker type. In such bunkers, the height of the biomass layer can reach several tens of meters (up to 20 m). Obviously, under these conditions, wood density gradients (due to caking) will also be significant. It has been reliably established that the characteristics of moisture removal from a layer of moist woody biomass are influenced not only by the ambient temperature, but also by the filtration characteristics (density, pore size, permeability, porosity) of the dried material. But until now in the world scientific periodicals there are no publications describing the results of assessing the influence of moist finely dispersed wood filling density on the characteristics and conditions of its dehydration.

The aim: experimental studies of the influence of moist woody biomass layer backfill density on the integral characteristics of its drying.

Object: wet woody biomass (pine sawdust). Experimental studies were carried out at the following values of the degree of compaction of biomass γ : 1; 1.5; 2 (where $\gamma = \rho/\rho_0$).

Method: experimental studies of moisture removal rate and the time of moist woody biomass dehydration at high-temperature heating ($T_g = 333\text{--}393\text{ K}$) in the SNOL-3.5-M2U42 drying chamber.

Results. The paper introduces the results of experimental studies of moisture removal from a layer of moist woody biomass (based on typical woodworking waste – sawdust) under intense radiation-convective heating. The authors have analysed the influence of the wood layer bulk density (ρ) on the dehumidification characteristics. It was found that the increase in the backfill (ρ) density leads to a significant change in the dynamics of moisture removal (an increase in γ from 1 to 2 leads to a twofold increase in the drying time t_d). It was shown that such increase in t_d is characteristic for all values of T_g . Also, according to the results of experiments, the characteristic values of the mass rate of moisture removal (W_{eva}) were established depending on time at various degrees of compaction of the biomass layer. It is shown that under conditions of relatively low ambient temperatures, the function $W_{eva}(t)$ changes non-monotonically, but has a wave character. A hypothesis is formulated describing such a dependence of the W_{eva} values on time. The results of the studies carried out significantly expand modern understanding of drying finely dispersed woody biomass under conditions of intense radiation-convective heating.

Key words:

Woody biomass, woodworking waste, backfill density, drying, heat and mass transfer, moisture removal rate.

The research was carried out due to the grant of the Russian Science Foundation (project no. 18-79-10015).

REFERENCES

- Chitawo M.L., Chimphango A.F.A., Peterson S. Modelling sustainability of primary forest residues-based bioenergy system. *Biomass and Bioenergy*, 2018, vol. 108, pp. 90–100.
- Laurén A., Asikainen A., Kinnunen J.P., Palviainen M., Sikanen L. Improving the financial performance of solid forest fuel supply using a simple moisture and dry matter loss simulation and optimization. *Biomass and Bioenergy*, 2018, vol. 116, pp. 72–79. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.05.014> (accessed 07 March 2021).
- Liu L., Cheng S.Y., Li J.B., Huang Y.F. Mitigating environmental pollution and impacts from fossil fuels: the role of alternative fuels. *Energy Sources. P. A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2007, vol. 29, pp. 1069–1080.
- Hansen K., Mathiesen B.V., Skov I.R. Full energy system transition towards 100 % renewable energy in Germany in 2050. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, vol. 102, pp. 1–13.
- García R., Gil M.V., Rubiera F., Pevida C. Pelletization of wood and alternative residual biomass blends for producing industrial quality pellets. *Fuel*, 2019, vol. 251, pp. 739–753.
- Dogan E., Inglesi-Lotz R. Analyzing the effects of real income and biomass energy consumption on carbon dioxide (CO₂) emissions: empirical evidence from the panel of biomass-consuming countries. *Energy*, 2017, vol. 138, pp. 721–727. DOI: 10.1016/j.energy.2017.07.136.
- Deng T., Alzahrani A.M., Bradley M.S. Influences of environmental humidity on physical properties and attrition of wood pellets. *Fuel Processing Technology*, 2019, vol. 185, pp. 126–132.

8. Bilgili F., Öztürk İ., Koçak E., Bulut Ü., Pamuk Y., Muğaloğlu E., Bağlıtaş H.H. The influence of biomass energy consumption on CO₂ emissions: a wavelet coherence approach. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2016, vol. 23, pp. 19043–19061. DOI: 10.1007/s11356-016-7094-2.
9. Fogarasi S., Cormos C.C. Technico-economic assessment of coal and sawdust co-firing power generation with CO₂ capture. *Journal of Cleaner Production*, 2015, vol. 103, pp. 140–148.
10. Li P.W., Chyang Ch.S. A comprehensive study on NO_x emission and fuel nitrogen conversion of solid biomass in bubbling fluidized beds under staged combustion. *Journal of the Energy Institute*, 2020, vol. 93, pp. 324–334.
11. Rokni E., Ren X., Panahi A., Levendis Y.A. Emissions of SO₂, NO_x, CO₂, and HCl from Co-firing of coals with raw and torrefied biomass fuels. *Fuel*, 2018, vol. 211, pp. 363–374.
12. Beagle E., Belmont E. Comparative life cycle assessment of biomass utilization for electricity generation in the European Union and the United States. *Energy Policy*, 2019, vol. 128, pp. 267–275.
13. Voytenko Y., Peck P. Organisational frameworks for straw-based energy systems in Sweden and Denmark. *Biomass and Bioenergy*, 2012, vol. 38, pp. 34–48. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.049> (accessed 07 March 2021).
14. Hao H., Chow C.L., Lau D. Effect of heat flux on combustion of different wood species. *Fuel*, 2020, vol. 278, pp. 118325. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118325> (accessed 07 March 2021).
15. Mirkowski Z., Jelonek I. Petrographic composition of coals and products of coal combustion from the selected combined heat and power plants (CHP) and heating plants in Upper Silesia, Poland. *International Journal of Coal Geology*, 2019, vol. 201, pp. 102–108.
16. Saidur R., Abdelaziz E.A., Demirbas A., Hossain M.S., Mekhilef S. A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, vol. 15, pp. 2262–2289.
17. Yelverton T.L.B., Brashers A.T., Nash D.G., Brown J.E., Singer C.F., Kariher P.H., Ryan J.V., Burnette P. Characterization of emissions from a pilot-scale combustor operating on coal blended with woody biomass. *Fuel*, 2020, vol. 264, pp. 116774. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116774> (accessed 07 March 2021).
18. Liang J., Shan G., Sun Y. Catalytic fast pyrolysis of lignocellulosic biomass: critical role of zeolite catalysts. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, vol. 139, pp. 110707.
19. Mladenović M., Paprika M., Marinković A. Denitrification techniques for biomass combustion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 82, pp. 3350–3364.
20. Liu R., Sarker M., Rahman M.M., Li Ch., Chai M., Cotillon R., Scott N.R. Multi-scale complexities of solid acid catalysts in the catalytic fast pyrolysis of biomass for bio-oil production – a review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2020, vol. 80, pp. 100852.
21. Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Nigay N.A., Maksimov V.I., Gutareva N.Yu. Features of the processes of heat and mass transfer when drying a large thickness layer of wood biomass. *Renewable Energy*, 2021, vol. 169, pp. 498–511. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.137> (accessed 07 March 2021).
22. Striugas N., Vorotinskienė L., Paulauskas R., Navakas R., Džiugys A., Narbutas L. Estimating the fuel moisture content to control the reciprocating grate furnace firing wet woody biomass. *Energy Conversion and Management*, 2017, vol. 149, pp. 937–949. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.014> (accessed 07 March 2021).
23. Schenck H. *Theories of engineering experimentation*. London, McGraw-Hill, 1968. 385 p.
24. Radkevich Y.M., Laktionov B.I. *Metrologiya, standartizatsiya* [Metrology, standardization]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2004. 767 p.
25. Khashchenko A., Vecher O., Diskaeva E. Study of the temperature dependence of the rate of evaporation of liquids from a free surface and the rate of boiling of a liquid on a solid heating surface. *Bulletin of the Altai State University*, 2016, vol. 1, pp. 84–86.
26. Syrodoy S.V., Kuznetsov G.V., Gutareva N.Y., Kostoreva Zh.A., Kostoreva A.A., Nigay N.A. Characteristics and conditions for ignition of bio-coal mixtures based on coal and forest combustible material. *Journal of the Energy Institute*, 2020, vol. 93, pp. 1978–1992. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2020.04.013> (accessed 07 March 2021).
27. Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Malyshev D.Yu., Gutareva N.Yu., Nigay N.A. Theoretical justification of utilization of forest waste by incineration in a composition of bio-water-coal suspensions. Ignition stage. *Applied Thermal Engineering*, 2020, vol. 170, pp. 115034. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115034> (accessed 07 March 2021).
28. Nigay N.A., Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Gutareva N.Y. Estimation of energy consumption for drying of forest combustible materials during their preparation for incineration in the furnaces of steam and hot water boilers. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2020, vol. 42, pp. 1997–2005. Available at: <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1604910> (accessed 07 March 2021).
29. Salomatov V., Kuznetsov G., Syrodoy S., Gutareva N. Mathematical and physical modeling of the coal–water fuel particle ignition with a liquid film on the surface. *Energy Reports*, 2020, vol. 6, pp. 628–643. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.02.006> (accessed 07 March 2021).
30. Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Gutareva N.Y. Influence of a wet wood particle form on the characteristics of its ignition in the high-temperature medium. *Renewable Energy*, 2020, vol. 145, pp. 1474–1486. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.046> (accessed 07 March 2021).

Received: 11 March 2021.

Information about the authors

Natalya A. Nigay, post-graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.
Semen V. Syrodoy, Cand. Sc, researcher, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 666.962

ГИДРОМАГНЕЗИТОВАЯ ПОРОДА В ТЕХНОЛОГИИ МАГНЕЗИАЛЬНЫХ ВЯЖУЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Митина Наталия Александровна¹,
mitinana@tpu.ru

Хабас Тамара Андреевна¹,
tak@tpu.ru

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

Актуальность исследования обусловлена необходимостью комплексного использования магнезиального сырья, в том числе отходов добычи. При добыче магнезиального сырья как огнеупорного и стратегического материала на некоторых месторождения сопутствующей является гидромагнезитовая порода, которая не находит применения в классических магнезиальных технологиях. В то же время она обладает характеристиками, позволяющими применять ее для получения важных продуктов: антипиренов для различных материалов, поризующий компонент в огнестойких покрытиях, исходный компонент для получения водостойких магнезиальных вяжущих.

Цель: определить возможность и условия применения гидромагнезитовой породы Халиловского месторождения в качестве исходного сырья при получении водного раствора бикарбоната магния – жидкости затворения водостойкого магнезиального вяжущего.

Объекты: гидромагнезитовая порода, сопутствующая магнезиту скрытокристаллической структуры Халиловского месторождения, Оренбургская область. Изучаемая порода состоит из гидрокарбонатных минералов: гидромагнезита, дипингита, несквигонита, а также примеси клинохризотила. Гидрокарбонатный состав не позволяет применять ее для формованных обжиговых магнезиальных изделий.

Методы: метод термической активации гидромагнезитовой породы, позволяющий получить высокорекреационную дефектную структуру; получение раствора бикарбоната магния искусственной карбонизацией суспензии активированного гидромагнезитового материала; термические методы исследования – дифференциальная сканирующая калориметрия, термогравиметрия; рентгенофазовый анализ; титриметрический метод определения концентрации бикарбонат-ионов.

Результаты. Установлена возможность использования гидромагнезитовой породы для получения водного раствора бикарбоната магния с концентрацией по бикарбонат-иону до 3,8 г/л; установлена эффективность термической обработки гидромагнезитов в диапазоне температур 300–375 °С, которая позволяет получить высокодефектный продукт $x\text{MgCO}_3 \cdot y\text{Mg}(\text{OH})_2$; термическая активация гидромагнезитов повышает эффективность перехода бикарбонат-ионов и катионов магния в раствор в присутствии CO_2 при низком давлении процесса карбонизации 0,2 МПа; полученный при низком давлении газа CO_2 водный раствор бикарбоната магния с высокой концентрацией бикарбонат-ионов позволит получить гидравлические магнезиальные вяжущие композиции высокой водостойкости.

Ключевые слова:

Гидромагнезитовая порода, карбонизация, водный раствор бикарбоната магния, магнезиальное вяжущее, водостойкость.

Введение

Гидромагнезитовые породы являются продуктами выветривания магнезиально-силикатных магматических и метаморфических пород, таких как серпентиниты, с образованием серой высокодисперсной рыхлой массы [1]. Кроме этого, гидрокарбонаты магния обнаружены как отложения в условиях озерных обстановок континентальных депрессий кайнозоя. Разведанные месторождения хемокластогенных магнезитов (гидромагнезитов) известны в Турции, Греции, Австралии (г. Рокхемптон, штат Квинсленд), Канада и в других странах [2–5]. Их формирование связано с химическими экзогенными процессами в речных и озерных структурах континентальных депрессий.

В России такие формирования содержит Халиловская площадь в Оренбургской области. Площадь объединяет массив серпентинитов и прилегающие к нему депрессивные кайнозойские структуры. По серпентинитам развита кора выветривания, с которой генетически связано магнезит-гидромагнезитовое образование в виде проявлений тонкодисперсного белого по-

рошка в пойкилитовых структурах [3]. Алюмосиликатные и силикатные минералы, подвергаясь агрессивному действию микробиологические объектов, формируют гидрокарбонатные минеральные фазы магния. Это происходит за счет жизнедеятельности микроорганизмов, которые выделяют активный CO_2 , реагирующий с магнием выветренного серпентинита с образованием гидромагнезита в виде тонкодисперсных агрегатов белого цвета [6, 7].

Гидратированные карбонаты магния, несквигонит и дипингит, также были обнаружены на выходах кимберлитовой брекчии трубки Обнаженная Куойкинского месторождения Якутской кимберлитовой провинции (рис. 1) [8]. Формирование этих минералов связано с уникальными характеристиками кимберлитовой трубки, выходящей на поверхность реки Куойки и состоящей из магматических и постмагматических пород – серпентинит, оливин, кальцит [9]. Здесь образование гидратированных карбонатов магния происходит в результате фильтрации дождевой воды через верхнюю часть обнажения. Обогащенные магнием растворы улавливают углекислый газ из ат-

мосферы попадают на вертикальную поверхность кимберлитовой брекчии, где происходит осаждение

несквигонита, который, претерпевая фазовые превращения, переходит в дипингит и гидромагнетит [3].

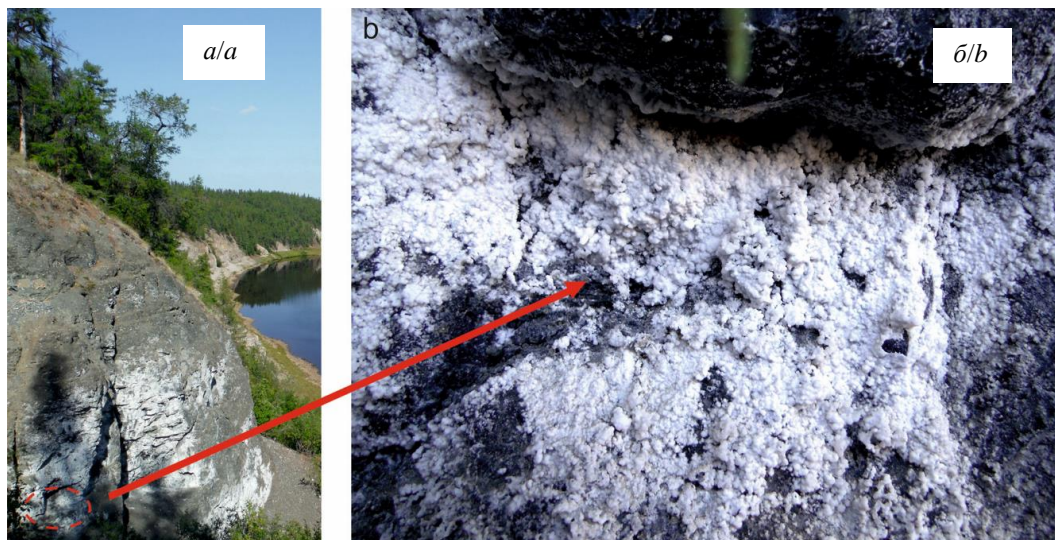


Рис. 1. Фотография обнажения трубки Обнаженная (а) и белая корка гидратированных карбонатов магния, несквигонита и дипингита, на кимберлитовой брекчии (б) [7]

Fig. 1. Photo of an outcrop of the Obnazhennaya pipe (a) and a white crust of hydrated magnesium carbonates, nesquehonite, and dypingite, on kimberlite breccia (b)

Гидратированные карбонаты магния – несквигонит, дипингит, гидромагнетит, обычно образуются в подземных условиях, обнаруживаются в угольных шахтах, штат Пенсильвания (США), и в Челябинском угольном месторождении [10], а также на поверхности серпентинитов [11]. Данные минералы относятся к низкотемпературным эпигенетическим минералам, и фазовые переходы их в системе $MgO-CO_2-H_2O$ подробно рассмотрены в [12, 13].

По мнению ученых [3–8], кайнозойский геолого-промышленный тип магнезитов, а именно гидрокарбонатные магниальные геологические образования, имеют хорошие перспективы как высокомагниальное сырье, так как проявления располагаются в хорошо доступных поверхностных и приповерхностных горизонтах и характеризуются рыхлой дисперсной структурой масс [9].

Гидрокарбонатные минералы магния, составляющие гидромагнетитовые породы, обладают рядом уникальных свойств в силу своих структурных и химических особенностей. Структурная формула минералов $xMgCO_3 \cdot yMg(OH)_2 \cdot zH_2O$ и $MgCO_3 \cdot xH_2O$ содержит кристаллогидратную, гидроксильную составляющие, а также карбонат магния. Данные вещества могут применяться в качестве эффективных антипиренов, при нагревании ступенчато выделяя газообразные вещества, которые не поддерживают горение и обладают гасящим эффектом [14–18]. Кроме того, целенаправленно синтезированные гидромагнетитовые наноразмерные кристаллические сферолиты могут использоваться в качестве носителей катализаторов для генерации водорода, а также в качестве адсорбирующих веществ [19–22] в силу весьма развитой поверхности кристаллических сростков. В неиз-

менном, природном виде и специально синтезированные гидрокарбонаты магния могут использоваться в качестве активной минеральной добавки [23, 24] в технологии магниальных вяжущих, повышая при этом прочность и водостойкость композиций без применения хлоридных и сульфатных растворов жидкостей затворения. Также гидрокарбонатные минеральные фазы рассматривается как продукты эффективного связывания антропогенного CO_2 из окружающей среды [25, 26].

Основной недостаток магниальных оксихлоридных (оксисульфатных) композиций, получаемых в настоящее время, – это низкая стойкость во влажных условиях, которая значительно ограничивает сферы их применения. Установлено, что решение данной проблемы возможно при замене классической традиционно применяемой жидкости затворения растворов хлорида (сульфата) магния на водный раствор бикарбоната магния. Применение такой жидкости затворения позволяет получать в продуктах твердения водонерастворимые соединения гидрокарбонатов магния, которые формируют прочную водостойкую структуру твердения магниальных композиций [27–30].

Целью настоящей работы является исследование возможности использования гидромагнетитовой породы в технологии магниальных вяжущих веществ в качестве основы для получения водного раствора бикарбоната магния.

Материалы и методы

Материалы

В данной работе использовали гидромагнетитовую породу Халиловского месторождения (Оренбургская область). Материал содержит гидрокарбонатные минералы – гидромагнетит $Mg_5(CO_3)_4(OH)_2 \cdot 4H_2O$, дипингит

$Mg_5(CO_3)_4(OH)_2 \cdot 5H_2O$, несквигонит $Mg(HCO_3)(OH) \cdot 2H_2O$, а также примеси клинохризотила $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$, так как гидрокарбонатное минералообразование происходит по выветренным серпентинитам. Это подтверждается химическим составом гидрокарбонатных пород Халиловского месторождения:

- о магниевом характере породы свидетельствует большое содержание оксида магния – 43,32 мас. %;
- значительное количество оксида кремния SiO_2 – 9,86 мас. % – доказывает наличие в минералогическом составе клинохризотила минерала серпентинитовой группы, таким образом указывая на происхождение магниевых образований Халиловского месторождения;

- низкое содержание оксида кальция CaO – 0,52 мас. % – говорит об отсутствии в гидромагнетитовой породе примеси доломита как одной из частых сопутствующих примесей многих магниевых месторождений;
- оксиды алюминия и марганца находятся в малых количествах – Al_2O_3 0,69 мас. %, MnO 0,029 мас. %;
- количество оксида железа Fe_2O_3 более 1 % (1,17 мас. %) при термической обработке дает незначительное окрашивание материала в светлорыжий цвет;
- значительные потери при прокаливании – 45,33 мас. % – свидетельствуют о гидрокарбонатной природе минеральных образований, что подтверждается термическим анализом породы (рис. 2).

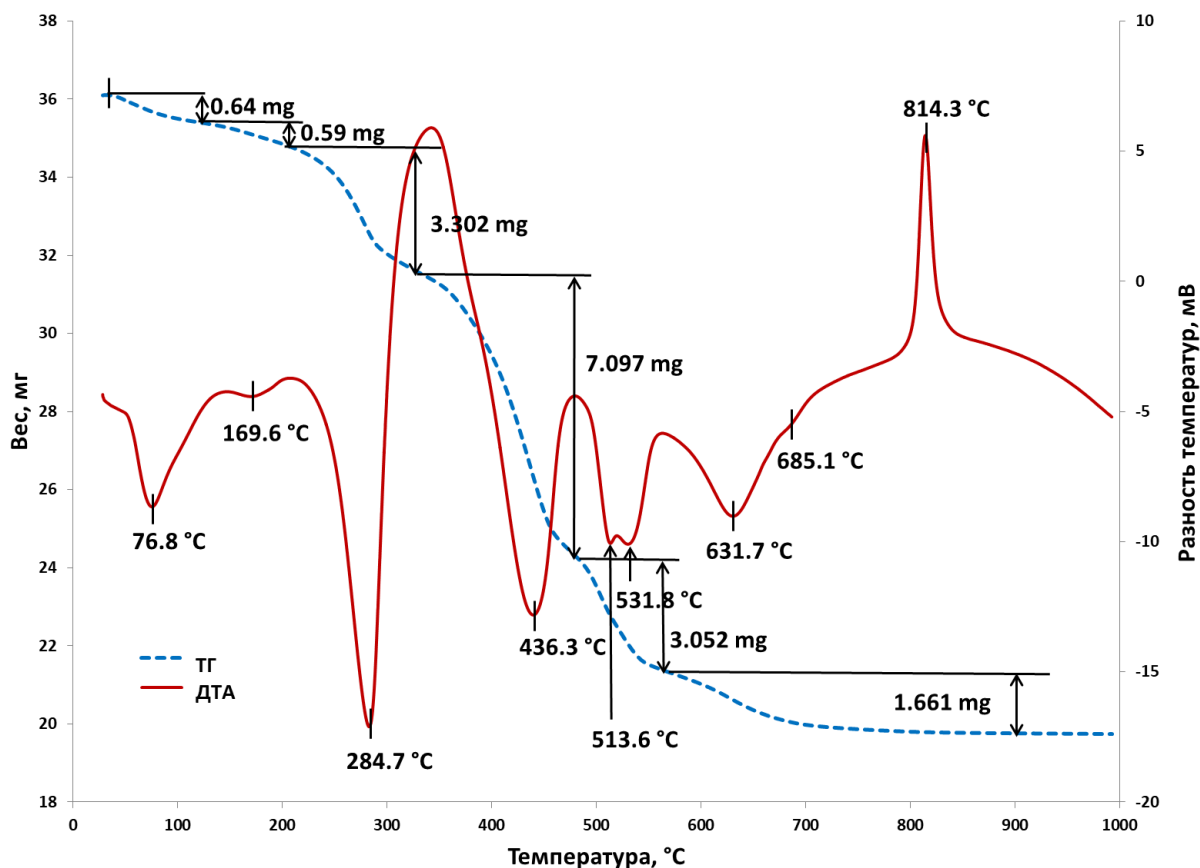


Рис. 2. Термограмма гидромагнетитовой породы

Fig. 2. Thermogram of hydromagnesite rock

На термограмме пробы гидромагнетита (рис. 2) наблюдается большое количество эндотермических эффектов и выраженный экзоэффект (табл. 1).

Методы

Пробы гидромагнетитовой породы прокаливались при температурах 200, 300, 375, 475, 520, 575, 675, 775 °C с выдержкой в течение часа. Выбор температур обжига связан с термическими эффектами, наблюдаемыми на термограмме (рис. 2), которые наблюдаются при ступенчатой дегидратации и декарбонизации.

Водный раствор бикарбоната магния готовили искусственной карбонизацией суспензии магниевых

порошка в автоклаве в течение 30 мин при давлении углекислого газа 0,2 МПа [31].

Для проведения термического анализа образцы нагревались в воздухе с 25 до 1000 °C со скоростью 10 град/мин с использованием прибора для синхронного термического анализа STA 449 F3 Jupiter® NETZSCH (Германия).

Рентгенограммы исходной гидромагнетитовой породы и после прокаливании получены на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD 7000 с использованием излучения Cu -анода, шаг сканирования 2 °/мин, время измерения интенсивности в точках сканирования 1 с, напряжение на трубке 40 кВ, сила тока 30 мА.

Таблица 1. Термические эффекты при прокаливании гидромагнетитовой породы

Table 1. Thermal effects during calcination of hydromagnesite rock

Температура эффекта, °C Effect temperature, °C	Потеря массы, мг Weight loss, mg	Термический эффект Thermal effect
220–320 (284)	3,302	Удаление кристаллизационной воды Crystallization water removal
436,3	7,097	Дегидроксилирование и начало декарбонизации Dehydroxylation and initiation of decarbonization
500–560	3,052	Декарбонизация Decarbonization
520	–	Формирование карбоната магния в аморфной форме и его декарбонизация Magnesium carbonate formation in amorphous form and its decarbonization
631,7 685,1	1,661	Декарбонизация и удаление кристаллизационной воды из клинохризотила Decarbonization and removal of crystallization water from clinochrysotile
814,3	–	Формирование фазы силиката магния из клинохризотила Formation of the magnesium silicate phase from clinochrysotile

Определение концентрации водного раствора бикарбоната магния по содержанию бикарбонат-ионов

проводилось титрометрическим методом с использованием метилоранжа в качестве индикатора [32].

Результаты и обсуждение

Приготовление раствора бикарбоната магния основано на использовании порошка активного оксида магния, полученного при низкотемпературном обжиге (до 800 °C) магниальных пород [23]. Свойства твердого MgO оказывают значительное влияние на качество получаемого водного раствора бикарбоната магния. В связи с этим было исследовано изменение свойств и фазового состава гидромагнетитовой породы при нагревании.

При прокаливании гидромагнетитовой породы происходит значительное изменение фазового состава и свойств. Изменение фазового состава при обжиге представлено на рентгенограмме (рис. 3). Исходный порошок породы состоит в основном из гидрокарбонатных пород, таких как гидромагнетит, нескевонит и дипингит, также есть примесь – клинохризотил, которая стабильна до температуры 575 °C.

При нагревании порода проходит ступенчатое преобразование (1)–(3), постепенно теряя структурную воду, гидроксильную группу, и декарбонизируется:

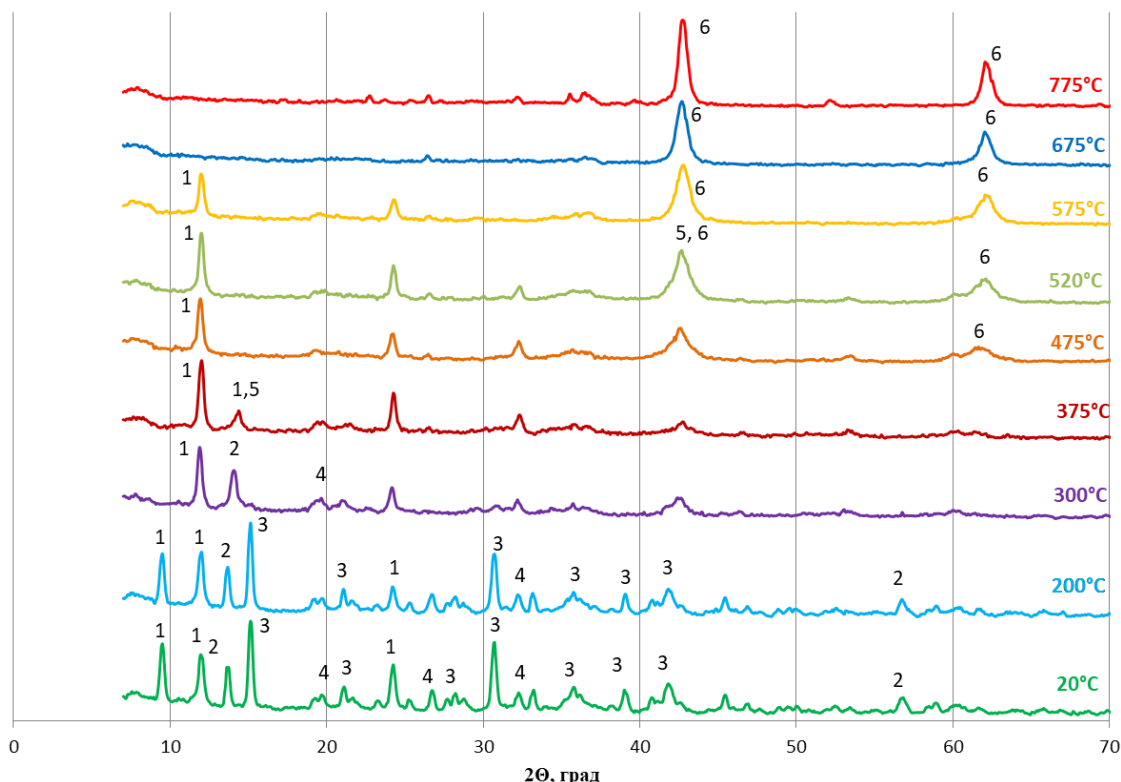
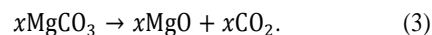
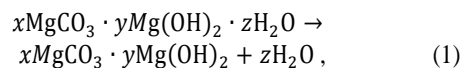


Рис. 3. Рентгенограммы продуктов обжига гидромагнетитовой породы при разных температурах: 1 – клинохризотил, 2 – нескевонит, 3 – гидромагнетит, 4 – дипингит, 5 – магнезит, 6 – оксид магния

Fig. 3. X-ray diffraction patterns of fired products of hydromagnesite rock at different temperatures: 1 – clinochrysotile, 2 – nesquehonite, 3 – hydromagnesite, 4 – dypingite, 5 – magnesite, 6 – magnesium oxide

При нагреве свыше 375 °С видно, что гидрокарбонатные фазы исчезают. При увеличении температуры обжига до 775 °С видно, что фазовый состав будет представлен лишь одним оксидом магния, клинохризотил и магнезит исчезнут при температуре свыше 575 °С. С увеличением температуры менялся и цвет порошка от светло-серого при температуре до 375 °С и до светло-красно-коричневого при температуре от 475 °С. На рентгенограммах прокаленных проб при 375, 475, 520 и 575 °С отмечаются низкие уширенные

рефлексы оксида магния, что свидетельствует о слабоакристаллизованной псевдомагнезитовой структуре высокодефектного MgO. Такое состояние продукта термического разложения гидрокарбонатов магния характеризуется высокой активностью. Эти данные подтверждаются данными по удельной поверхности гидромагнезитовой породы (рис. 4). В интервале температур 550–750 °С наблюдаются максимальные значения удельной поверхности.

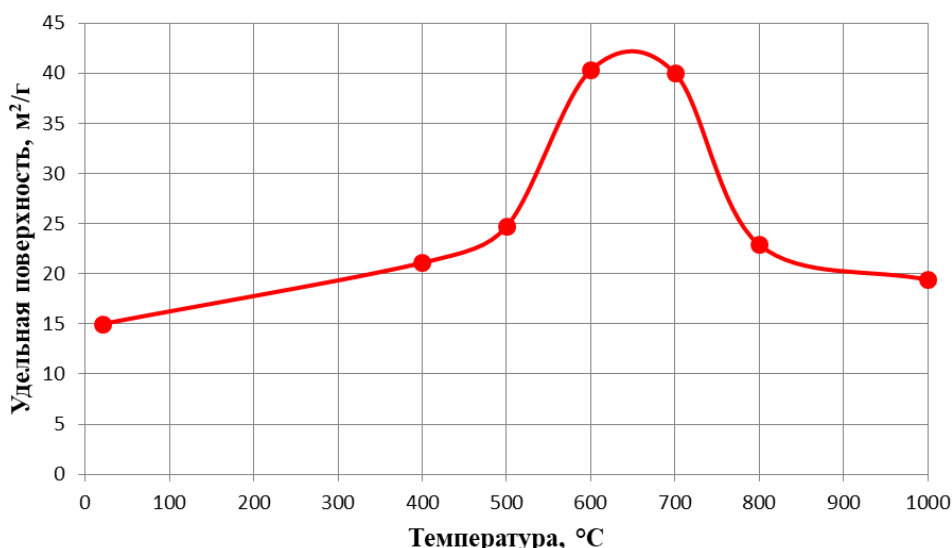
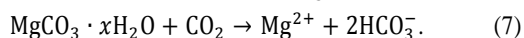
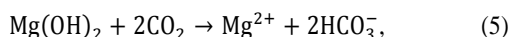


Рис. 4. Изменение удельной поверхности гидромагнезита при термообработке

Fig. 4. Change in the specific surface area of hydromagnesite during heat treatment

Формирование высокодисперсной дефектной и весьма реакционной структуры после обжига является благоприятным фактором при проведении карбонизации суспензии из прокаленного гидромагнезита с целью получения водного раствора бикарбоната магния. Этот процесс осуществляется по реакциям (4)–(7):



Для проведения карбонизации магниевой суспензии в автоклаве и получения раствора бикарбоната магния были выбраны пробы гидромагнезитовой породы, прокаленные при температурах 200, 300, 375, 475, 520 и 575 °С. После проведения процесса определяли концентрацию ионов бикарбоната в растворе, результаты представлены в табл. 2.

Данные таблицы показывают, что оптимальным интервалом обжига гидромагнезитовой породы для получения наиболее высокой концентрации раствора бикарбоната в условиях низкого давления карбонизации является диапазон температур 300–375 °С. В этом диапазоне температур, согласно данным табл. 1, основным процессом при нагревании выступает удаление кристаллизационной воды, что значительно ослабляет кристаллическую структуру исходным минералов.

Таблица 2. Концентрация бикарбонат-ионов в растворе бикарбоната магния в зависимости от температуры обжига породы

Table 2. Concentration of bicarbonate ions in magnesium bicarbonate solution depending on the temperature of rock firing

Температура обжига гидромагнезитовой породы, °С Firing temperature of hydromagnesite rock, °С	Концентрация ионов HCO ₃ ⁻ , г/л Concentration of HCO ₃ ⁻ ions, g/l
–	2,196
200	2,013
300*	3,416
375*	3,818
475	1,525
520	1,037
575	1,769

* – оптимальные температуры обжига для получения максимальной концентрации ионов HCO₃⁻/optimal burning temperatures for obtaining maximum concentration of HCO₃⁻ ions.

Термическая обработка гидромагнезитов в диапазоне температур 350–375 °С позволяет получить высокодефектный продукт xMgCO₃·yMg(OH)₂, прошедший дегидратацию, частичное дегидроксилирование и начальную декарбонизацию. Данная дефектная структура в большей степени подвержена растворению и переходу бикарбонат-ионов HCO₃⁻ и катионов магния Mg²⁺ в раствор в присутствии растворенного в воде CO₂, вследствие чего концентрация водного рас-

твора бикарбоната магния по бикарбонат-иону будет наибольшая без применения повышенного давления углекислого газа в автоклаве.

Испытание прочностных свойств магниевых вяжущих с использованием раствора бикарбоната магния на основе прокаленной гидромагнетитовой породы проводили после твердения образцов на воздухе, в воздушно-влажных условиях и в воде в течение 28 суток. Результаты испытаний образцов на прочность при сжатии в зависимости от температуры

обжига гидромагнетитовой породы, а, следовательно, от концентрации раствора бикарбоната магния, приведены в табл. 3.

Данные испытаний показывают увеличение прочности во всех случаях при твердении образцов во влажных и водных условиях. Отмечается максимальная прочность до 40 МПа композиции магниевых вяжущих при использовании раствора бикарбоната из прокаленной при 375 °С гидромагнетитовой породы.

Таблица 3. Прочностные свойства магниевых камней с использованием раствора бикарбоната магния из прокаленной гидромагнетитовой породы

Table 3. Strength properties of magnesia stone using magnesium bicarbonate solution from calcined hydromagnesite rock

№ серии образцов Sample series no.	Температура обжига гидромагнетита, °С (концентрация раствора бикарбоната магния по HCO_3^- , г/л) Firing temperature of hydromagnesite rock, °С (concentration of magnesium bicarbonate solution by HCO_3^- , g/l)	Среда твердения Curing conditions	Предел прочности при сжатии, МПа Compressive strength, MPa
1.1	300 (3,416)	воздух air	10,83
1.2		воздушно-влажная air humid	23,40
1.3		вода water	29,83
2.1	375 (3,818)	воздух air	20,00
2.2		воздушно-влажная air humid	30,67
2.3		вода water	40,20
3.1	520 (1,037)	воздух air	13,73
3.2		воздушно-влажная air humid	27,90
3.3		вода water	33,63

Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований установлена возможность использования прокаленной при 300–375 °С гидромагнетитовой породы для получения жидкости затворения магниевых вяжущих – водного раствора бикарбоната магния. Низкотемпературная термическая обработка гидромагнетитовой породы позволяет получить продукт $x\text{MgCO}_3 \cdot y\text{Mg}(\text{OH})_2$ с дефектной высокореакционноспособной структурой.

Использование гидромагнетитовой породы, прокаленной при температуре 300–375 °С, позволяет получать водный раствор бикарбоната магния с концентрацией 3,82 г/л при карбонизации под давлением углекислого газа 0,2 МПа в течение 30 мин. Данная концентрация раствора необходима и достаточна для получения прочных водостойких магниевых композиций, способных твердеть не только на воздухе, но и в воде.

Исследования проводились на базе Центра «Физико-химических методов анализа» ТПУ. Работа поддержана программой развития ТПУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Шевелев А.И., Щербакова Т.А. Высокомagneзиальное минеральное сырье. – М.: Наука, 1991. – С. 153–157.
- Schmid H. Turkeys Salda Lake. A genetic model for Australias newly discovered magnesite deposits // *Industrial Minerals*. – 1987. – № 239. – P. 19–31.
- Щербакова Т.А., Шевелев А.И., Сенаторов П.П. Новое высокомагнезиальное карбонатное сырье для огнеупорной промышленности России // *Новые огнеупоры*. – 2015. – № 5. – С. 11–15.
- Щербакова Т.А., Шевелев А.И. Сырьевая база магнезита России и перспективы ее развития // *Георесурсы*. – 2016. – Т. 18. – № 1. – С. 75–78.
- Atmospheric carbon sequestration in ultramafic mining residues and impacts on leachate water chemistry at the Dumont Nickel Project, Quebec, Canada / A. Grasa, G. Beaudoina, J. Molsona, B. Plante // *Chemical Geology*. – 2020. – V. 546. – P. 119661.
- Rausis K., Cwik A. Direct moist carbonation of brucite-rich serpentinized dunites: an alternative to the carbonation of heat-activated serpentine // *Applied Geochemistry*. – 2021. – V. 127. – P. 104851.
- Microorganisms and microbially induced fabrics in cave walls / J.C. Cañveras, S. Sanchez-Moral, V. Sloer, C. Saiz-Jimenez // *Geomicrobiology Journal*. – 2001. – V. 18. – № 3. – P. 223–240.
- Zayakina N., Ugapeva S., Oleinikov O. Rare hydrated magnesium carbonate minerals of the kimberlite pipe Obnazhennaya, The Yakutian Kimberlite Province // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2020. – V. 609. – P. 012007.

9. Колингит из кимберлитовой брекчии трубки Манчары (центральная Якутия) / Н.В. Заякина, О.Б. Олейников, Т.И. Васильева, Н.А. Опарин // Записки Российского минералогического общества. – 2015. – Т. 144. – № 1. – С. 115–121.
10. Genth F.A., Penfield S.L. On lansfordite, nesquehonite, a new mineral, and pseudomorphs of nesquehonite after lansfordite // American Journal of Science. – 1890. – № 139. – P. 121–137.
11. Carbon dioxide fixation within mine wastes of ultramafic-hosted ore deposits: examples from the Clinton Creek and Cassiar Chrysotile Deposits, Canada / S.A. Wilson, G.M. Dipple, I.M. Power, J.M. Thom, R.G. Anderson, M. Raudsepp, J.E. Gabites, G. Southam // Society of Economic Geologists, Inc. Economic Geology. – 2009. – V. 104 – P. 95–112.
12. Phase transitions in the $MgCO_3 \cdot H_2O$ system and the thermal decomposition of dypingite, $Mg_5(CO_3)_4(OH)_2 \cdot 5H_2O$: implications for geosequestration of carbon dioxide / P. Ballirano, C. De Vito, S. Mignardi, V. Ferrini // Chemical Geology. – 2013. – V. 340. – P. 59–67.
13. Phase transitions in the system $MgO-CO_2-H_2O$ during CO_2 degassing of Mg-bearing solutions / L. Hopkinson, P. Kristova, K. Rutt, G. Cressey // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2012. – V. 76. – P. 1–13.
14. Unluer C., Al-Tabbaa A. Characterization of light and heavy hydrated magnesium carbonates using thermal analysis // J Therm Anal Calorim. – 2014. – V. 115. – P. 595–607.
15. Hollingbery L.A., Hull T.R. The fire retardant behaviour of huntite and hydromagnesite – a review // Polymer Degradation and Stability. – 2010. – V. 95. – P. 2213–2225.
16. Hollingbery L.A., Hull T.R. The thermal decomposition of natural mixtures of huntite and hydromagnesite // Thermochimica Acta. – 2012. – V. 528. – P. 45–52.
17. Hollingbery L.A., Hull T.R. The fire retardant effects of huntite in natural mixtures with hydromagnesite // Polymer Degradation and Stability. – 2012. – V. 97. – P. 504–512.
18. Fire-proof silicate coatings with magnesium-containing fire retardant / O. Kazmina, E. Lebedeva, N. Mitina, A. Kuzmenko // Journal of Coatings Technology and Research. – 2018. – V. 15 (3). – P. 543–554.
19. Ground improvement and its role in carbon dioxide reduction: a review / M.A. Mohammed, N. Z. Mohd Yunus, M. Azril Hezmi, Dayang Zulaika Abang Hasbollah, Ahmad Safuan A Rashid // Environmental Science and Pollution Research. – 2021. – V. 28. – P. 8968–8988.
20. Chen D., Jordan E.H. Synthesis of porous, high surface area MgO microspheres // Materials Letters. – 2009. – V. 63. – P. 783–785.
21. Efficient removal of fluoride by hierarchical MgO microspheres: performance and mechanism study / Z. Jin, Y. Jia, T. Luo, L.-T. Kong, B. Sun, W. Shen, F.-L. Meng, J.-H. Liu // Applied Surface Science. – 2015. – V. 357. – P. 1080–1088.
22. Rectangular MgO microspheres with strong catalytic activity / T. Selvamani, A. Sinhamahapatra, D. Bhattacharjya, I. Mukhopadhyay // Materials Chemistry and Physics. – 2011. – V. 129. – P. 853–861.
23. The mechanism of hydration of MgO -hydromagnesite blends / C. Kuenzel, F. Zhang, V. Ferrándiz-Mas, C.R. Cheeseman, E.M. Gartner // Cement and Concrete Research. – 2018. – V. 103. – P. 123–129.
24. Effect of hydromagnesite addition on the properties and water resistance of magnesium oxysulfate (MOS) cement / Yan Guan, Zhiqi Hu, Zuhua Zhang, Jun Chang, Wanli Bi, Chris R. Cheeseman, Tingting Zhang // Cement and Concrete Research. – 2021. – V. 143. – P. 106387.
25. Magnesium-based basic mixtures derived from earth-abundant natural minerals for CO_2 capture in simulated flue gas / Yafei Guo, Chang Tan, Peng Wang, Jian Sun, Weiling Li, Chuanwen Zhao, Ping Lu // Fuel. – 2019. – V. 243. – P. 298–305.
26. Influence of cellulose pulp on the hydration followed by fast carbonation of MgO -based binders / G. Marmola, L. Mattosob, A. Carolina Correab, C.A. Fioronia, H. Savastano Jr. // Journal of CO_2 Utilization. – 2020. – V. 41. – P. 101236.
27. Waterproof magnesia binder for composite materials / N.A. Mitina, I.B. Revva, A.A. Ditts, D. Simonov // Key Engineering Materials. – 2016. – V. 712. – P. 182–187.
28. Торфосодержащие композиции на основе магнезиального вяжущего / Н.А. Митина, В.А. Лотов, М.А. Ковалева, Н.О. Копаница // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2018. – Т. 61. – № 8. – С. 81–88.
29. Митина Н.А., Лотов В.А., Сухушина А.В. Жидкость затвердения для магнезиального вяжущего // Строительные материалы. – 2015. – № 1. – С. 64–68.
30. Митина Н.А., Лотов В.А. Формирование структуры цементного камня при гидратации и твердении гидрокарбонатного магнезиального вяжущего // Строительные материалы. – 2017. – № 8. – С. 68–73.
31. Смирнов А.П., Лотов В.А., Архипов В.А., Прохоров А.Н., Резников И.В. Способ получения ультрадисперсных порошков карбонатов: пат. Рос. Федерация № 2374176; заявл. 10.10.2007; опубл. 27.11.2009. Бюл. № 2374176. – 2 с.
32. Муравьев А.Г. Руководство по определению показателей качества воды полевыми методами. – СПб: Крисмас+, 2004. – 248 с.

Поступила 26.05.2021 г.

Информация об авторах

Митина Н.А., кандидат технических наук, доцент научно-образовательного центра Н.М. Кижнера Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Хабас Т.А., доктор технических наук, профессор научно-образовательного центра Н.М. Кижнера Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDK666.962

HYDROMAGNESITE WASTE-ROCK IN MAGNESIA CEMENT TECHNOLOGY

Natalia A. Mitina¹,
mitinana@tpu.ru

Tamara A. Khabas¹,
tak@tpu.ru

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

The research is relevant due to the need for the integrated use of magnesium materials, including mining waste. During the extraction of magnesia raw materials, as a refractory and strategic material, in some deposits the accompanying material is hydromagnesite rock, which is not used in classical magnesia technology. Simultaneously, it has characteristics that make it possible to obtain important products: fire retardants for various materials, a porous component in fire-resistant coatings, a feedstock for creating waterproof magnesia binders.

The aim of the research is to determine the possibility and conditions of using the hydromagnesia formation of the Khalilovskoe field as a feedstock for obtaining water solution of magnesium bicarbonate – a mixing liquid of a waterproof magnesia binder.

Materials: hydromagnesite rock accompanying magnesite of the cryptocrystalline structure of the Khalilovskoe deposit, Orenburg region. The studied rock consists of hydrocarbonate minerals: hydromagnesite, deepingite, nesvignonite, as well as admixture of clinochrysolite. The bicarbonate composition does not allow its use for molded fired magnesia products.

Methods. The method of thermal activation of hydromagnesite rock makes it possible to produce a highly reactive defect structure; obtaining a solution of magnesium bicarbonate by artificial carbonization of a suspension of activated hydromagnesite material; thermal research methods – differential scanning calorimetry, thermogravimetry; X-ray phase analysis; titrimetric method for determining the concentration of bicarbonate ions.

Results. The possibility of using hydromagnesite formation to obtain water solution of magnesium bicarbonate with the bicarbonate ion concentration of up to 38 g/l was determined; the efficiency of heat treatment of hydromagnesites in the temperature range of 300–375 °C was established, that allows obtaining a highly defective product $x\text{MgCO}_3 \cdot y\text{Mg}(\text{OH})_2$; thermal activation of hydromagnesites increases the efficiency of the transition of bicarbonate ions and magnesium cations into solution in the presence of CO_2 at the low pressure of 0,2 MPa of the carbonization process; water solution of magnesium bicarbonate with high concentration of bicarbonate ions obtained at the low pressure of CO_2 gas will make it possible to create hydraulic magnesia binders with high water resistance.

Key words:

Hydromagnesite rock, carbonation, water solution of magnesium bicarbonate, magnesia binder, water resistance.

The research was carried out using the core facilities of TPU's «Physical and chemical methods of analysis». This research was supported by the TPU development program.

REFERENCES

1. Shevelev A.I., Shcherbakova T.A. *Vysokomagnezjalnoe mineralnoe syre* [High magnesium mineral raw materials]. Moscow, Nauka Publ., 1991. pp. 153–157.
2. Schmid H. Turkeys Salda Lake. A genetic model for Australia's newly discovered magnesite deposits. *Industrial Minerals*, 1987, vol. 239, pp. 19–31.
3. Shcherbakova T.A., Shevelev A.I., Senatorov P.P. New high-magnesia carbonate raw material for Russian refractory industry. *New refractories*, 2015, vol. 5, pp. 11–15. In Rus.
4. Scherbakova T.A., Shevelev A.I. Magnesite raw material base of Russia and prospects of its development. *Georesursy*, 2016, vol. 18, no. 1, pp. 75–78. In Rus.
5. Grasa A., Beaudoina, Molsona J., Plante B. Atmospheric carbon sequestration in ultramafic mining residues and impacts on leachate water chemistry at the Dumont Nickel Project, Quebec, Canada. *Chemical Geology*, 2020, vol. 546. pp. 119661.
6. Rausis K., Cwik A. Direct moist carbonation of brucite-rich serpentized dunites: An alternative to the carbonation of heat-activated serpentine. *Applied Geochemistry*, 2021, vol. 127, pp. 104851.
7. Cañveras J.C., Sanchez-Moral S., Sloer V., Saiz-Jimenez C. Microorganisms and Microbially Induced Fabrics in Cave Walls. *Geomicrobiology Journal*, 2001, vol. 18, no. 3, pp. 223–240.
8. Zayakina N., Ugapeva S., Oleinikov O. Rare hydrated magnesium carbonate minerals of the kimberlite pipe Obnazhennaya, The Yakutian Kimberlite Province. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 609, p. 012007.
9. Zayakina N.V., Oleinikov O.B., Vasileva T.I., Oparin N.A. Coalingite from kimberlite breccia of the Manchary pipe, Central Yakutia. *Geology of Ore Deposits*, 2015, vol. 57, no. 8, pp. 732–736.
10. Genth F.A., Penfield S.L. On lansfordite, nesquehonite, a new mineral, and pseudomorphs of nesquehonite after lansfordite. *American Journal of Science*, 1890, vol. 139, pp. 121–137.
11. Wilson S.A., Dipple G.M., Power I.M., Thom J.M., Anderson R.G., Raudsepp M., Gabites J.E., Southam G. Carbon dioxide fixation within mine wastes of ultramafic-hosted ore deposits: examples from the Clinton Creek and Cassiar Chrysotile Deposits, Canada. *Society of Economic Geologists, Inc. Economic Geology*, 2009, vol. 104, pp. 95–112.
12. Ballirano P., De Vito C., Mignardi S., Ferrini V. Phase transitions in the $\text{MgCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ system and the thermal decomposition of dypingite, $\text{Mg}_5(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$: implications for geosequestration of carbon dioxide. *Chemical Geology*, 2013, vol. 340, pp. 59–67.
13. Hopkinson L., Kristova P., Rutt K., Cressey G. Phase transitions in the system $\text{MgO}-\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ during CO_2 degassing of Mg-bearing solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, vol. 76, pp. 1–13.
14. Unluer C., Al-Tabbaa A. Characterization of light and heavy hydrated magnesium carbonates using thermal analysis. *J Therm Anal Calorim*, 2014, vol. 115, pp. 595–607.
15. Hollingbery L.A., Hull T.R. The fire retardant behaviour of huntite and hydromagnesite – a review. *Polymer Degradation and Stability*, 2010, vol. 95, pp. 2213–2225.
16. Hollingbery L.A., Hull T.R. The thermal decomposition of natural mixtures of huntite and hydromagnesite. *Thermochimica Acta*, 2012, vol. 528, pp. 45–52.

17. Hollingbery L.A., Hull T.R. The fire retardant effects of huntite in natural mixtures with hydromagnesite. *Polymer Degradation and Stability*, 2012, vol. 97, pp. 504–512.
18. Kazmina O., Lebedeva E., Mitina N., Kuzmenko A. Fire-proof silicate coatings with magnesium-containing fire retardant. *Journal of Coatings Technology and Research*, 2018, vol. 15, no. 3, pp. 543–554.
19. Mohammed M.A., Mohd Yunus N. Z., Azril Hezmi M., Abang Hasbollah Dayang Zulaika, Ahmad Safuan A Rashid. Ground improvement and its role in carbon dioxide reduction: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, vol. 28, pp. 8968–8988.
20. Chen D., Jordan E. H. Synthesis of porous, high surface area MgO microspheres. *Materials Letters*, 2009, vol. 63, pp. 783–785.
21. Jin Z., Jia Y., Luo T., Kong L.-T., Sun B., Shen W., Meng F.-L., Liu J.-H. Efficient removal of fluoride by hierarchical MgO microspheres: performance and mechanism study. *Applied Surface Science*, 2015, vol. 357, pp. 1080–1088.
22. Selvamani T., Sinhamahapatra A., Bhattacharjya D., Mukhopadhyay I. Rectangular MgO microspheres with strong catalytic activity. *Materials Chemistry and Physics*, 2011, vol. 129, pp. 853–861.
23. Kuenzel C., Zhang F., Ferrándiz-Mas V., Cheeseman C.R., Gartner E.M. The mechanism of hydration of MgO-hydromagnesite blends. *Cement and Concrete Research*, 2018, vol. 103, pp. 123–129.
24. Guan Yan, Hu Zhiqi, Zhang Zuhua, Chang Jun, Bi Wanli, R. Cheeseman Chris, Zhang Tingting. Effect of hydromagnesite addition on the properties and water resistance of magnesium oxy-sulfate (MOS) cement. *Cement and Concrete Research*, 2021, vol. 143, pp. 106387.
25. Yafei Guo, Chang Tan, Peng Wang, Jian Sun, Weiling Li, Chuanwen Zhao, Ping Lu. Magnesium-based basic mixtures derived from earth-abundant natural minerals for CO₂ capture in simulated flue gas. *Fuel*, 2019, vol. 243, pp. 298–305.
26. Mármola G., Mattosob L., Carolina Correas A., Fioronia C.A., Savastano Jr.H. Influence of cellulose pulp on the hydration followed by fast carbonation of MgO-based binders. *Journal of CO₂ Utilization*, 2020, vol. 41, pp. 101236.
27. Mitina N.A., Revva I.B., Ditts A.A., Simonov D. Waterproof magnesia binder for composite materials. *Key Engineering Materials*, 2016, vol. 712, pp. 182–187.
28. Mitina N.A., Lotov V.A., Kovaleva M.A., Kopanitsa N.O. Peat-containing composition containing magnesia binder. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya*, 2018, vol. 61, no. 8, pp. 81–88.
29. Mitina N.A., Lotov V.A., Suhushina A.V. Mixing fluid for magnesia binder. *Construction Materials*, 2015, no. 1, pp. 64–68. In Rus.
30. Mitina N.A., Lotov V.A. Formation of the structure of a cement stone during hydration and hardening of a hydrocarbonate magnesia binder. *Construction Materials*, 2017, no. 8, pp. 68–73. In Rus.
31. Smirnov A.P., Lotov V.A., Arhipov V.A., Prohorov A.N., Reznikov I.V. *Sposob polucheniya ultradispersnykh poroshkov karbonatov* [A process for preparing ultrafine powders of carbonates]. Patent RF, no. 2374176, 2009.
32. Muravev A.G. *Rukovodstvo po opredeleniyu pokazateley kachestva vody polevymi metodami* [Guidance for the determination of water quality indicators by field methods]. St-Petersburg, Krismas+ Publ., 2004. 248 p.

Received: 26 May 2021.

Information about the authors

Natalia A. Mitina, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Tamara A. Khabas, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 556.314:556.535.8

СПОСОБ ОЦЕНКИ ДОПУСТИМЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ С УЧЕТОМ СОСТОЯНИЯ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Савичев Олег Геннадьевич¹,
OSavichev@mail.ru

Чжоу Дань¹,
929177582@qq.com

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

Актуальность исследования определяется необходимостью учета взаимодействий речных вод с донными отложениями при нормировании антропогенных воздействий на водные объекты.

Цель: разработка модели трансформации загрязняющих веществ в водных объектах с учетом разбавления стоков, взаимодействий речных вод с донными отложениями и методики нормирования сбросов загрязняющих веществ.

Методы: математическое моделирование гидрхимических процессов.

Результаты и выводы. Разработана математическая модель трансформации загрязняющих веществ в водных объектах с учетом разбавления стоков и взаимодействия речных вод и донных отложений. Ее апробация на примере малых рек в северной части Вьетнама (реки Бан Тхи и Дай в бассейне р. Хонг) показала, что химический состав вод изученных рек определяется более чем на 60 % взаимодействиями речных вод с донными отложениями в результате осаждения малорастворимых соединений ряда металлов и соосаждения микроэлементов на твердых частицах. Это приводит к заметному снижению концентрации многих веществ на участках до 4,5–5,0 км. Влияние водного стока проявляется, прежде всего, в изменении твердого стока, в меньшей степени – в регулировании внутриводных процессов, для которых требуется более продолжительное время установления равновесия в растворе. На основе предложенной модели разработана ее упрощенная версия и методика нормирования сбросов загрязняющих веществ для вариантов наличия и отсутствия данных наблюдений за химическим составом речных вод. При этом влияние взаимодействий с донными отложениями учитывается косвенно через структуру модели и значения ее параметров. Апробация упрощенной модели выполнена на примере р. Цзиньцзян в водосборе озера Поянху (Китай).

Ключевые слова:

Математическая модель, трансформация загрязняющих веществ, разбавление, речные воды, донные отложения, водосбор реки Хонг, водосбор озера Поянху.

Введение

Оценка допустимых концентраций загрязняющих веществ $C_{w,lim}$ в стоках является важным этапом и одновременно условием охраны и восстановления водных объектов. Она должна, с одной стороны, быть научно обоснованной, а с другой – опираться на данные государственной системы наблюдений и быть встроенной в систему принятия управленческих решений в области охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов.

В настоящее время имеется большое количество разработок по этой теме, наиболее полный обзор которых приведен в [1–6]. Кроме того, в законодательствах разных стран введены нормативные документы, в которых содержатся рекомендации по гидрхимическим расчетам. В частности, в Российской Федерации (РФ) в настоящее время используется методика оценки фоновых концентраций C_b в поверхностных водных объектах [7] и методика определения нормативов допустимых сбросов загрязняющих веществ G_{lim} [8]. Согласно последнему документу, расчет величины G_{lim} конкретного вещества сводится к определению элементов уравнений (1), (2) с учетом фоновой и предельно допустимой концентрации вещества (ПДК):

$$G_{lim} = C_{w,lim} q_w = (C_b + n_s (\text{ПДК} - C_b)) q_w, \quad (1)$$

$$n_s = n_m n_0, \quad (2)$$

где q_w – расход сточных вод, м³/с; n_s , n_m , n_0 – кратность общего, основного и начального разбавления, соответственно; концентрации вещества (C_b , $C_{w,lim}$, ПДК) – в мг/дм³. В Китайской народной республике (КНР) приняты нормативные документы в области охраны водных объектов [9–11], в соответствии с которыми установлены стандарты качества воды для объектов разного назначения и метод расчета максимально допустимого загрязнения рек.

Очевидно, что при ПДК < C_b возникает необходимость модификации уравнения (1) и обоснования действий по доказательству природного происхождения вещества в водном объекте. Эта задача до сих пор не имеет однозначного и убедительного решения, впрочем, как и проблема учета взаимовлияния эколого-геохимического состояния вод и донных (водоотводящих) отложений. Все это и определяет актуальность дальнейших исследований в части разработки способов оценки допустимого воздействия на водные объекты.

Именно такая цель и была поставлена авторами при рассмотрении проблемы определения допустимого антропогенного воздействия на водные объекты применительно к рекам зоны муссонных лесов субтропического и субэкваториального климатических

поясов (согласно районированию, приведенному в [12]) в юго-восточной части Китая (бассейн озера Поянху – бассейн р. Янцзы) и северной части Вьетнама (бассейн р. Хонг).

Методика исследования и исходные данные

Соответственно цели исследования методика включала двухэтапное построение и последующую апробацию математической модели трансформации химического состава речных вод в результате поступления в реку сточных вод или вод притоков. На первом этапе рассматривались процессы, учитывающие взаимодействие речных вод с донными отложениями. Но данные совместных наблюдений за расходами воды, химическим составом речных вод и донных отложений, химическим составом сточных вод получить достаточно сложно, и в современных системах экологического мониторинга они проводятся не часто. Обычно основной упор делается на наблюдениях за химическим составом речных и сточных вод, в ряде случаев сопровождаемых измерением расходов воды. Кроме того, даже при наличии данных о составе донных отложений необходимо учитывать возможную неоднородность рядов, связанную с различиями в используемых методиках отбора, подготовки и анализа донных отложений (при изучении состава воды соблюсти условия однородности обычно гораздо легче). Поэтому на втором этапе модель взаимодействия речных вод и донных отложений была адаптирована к использованию данных только о химическом составе сточных и речных вод с сохранением исходной структуры.

На первом этапе были использованы материалы исследования влияния добычи свинцово-цинковых руд на притоки р. Хонг (Красная река, Red river) на севере Вьетнама в уезде Чодонь провинции Баккан – реки Бан Тхи и Дай. Исходные данные и методика полевых (выполнены Нгуен Ван Луеном с учетом требований [13, 14]), камеральных (О.Г. Савичев и Нгуен Ван Луен) и лабораторных работ (выполнены в аккредитованной гидрогеохимической лаборатории Томского политехнического университета (ТПУ) под руководством к.г.-м.н. А.А. Хвощевской) изложены в [15–17]. Здесь лишь отметим, что при определении состава воды и водных вытяжек из донных отложений (пробы из верхнего слоя около 0,2 м с последующими высушиванием при температуре 100 °С и измельчением до фракции с диаметром частиц до 0,5 мм) использовались методы: потенциометрический (рН); титриметрический (Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , CO_2 , Cl^- , перманганатная (ПО) и бихроматная (БО) окисляемость); турбидиметрический (SO_4^{2-}); фотометрический (Si , NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , фосфаты); ионная хроматография (Na^+ , K^+); масс-спектрометрический с индуктивно-связанной плазмой с использованием масс-спектрометра NexION 300D (Li, Al, P, Si, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sr, Ag, Cd, Sn, Sb, Cs, Ba, La, Ce, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu, Au, Hg, Pb, Bi) [16, 17]. Кроме того, в ТПУ был выполнен анализ минерального состава фракции до 0,5 мм с использованием сканирующего электронного микроскопа

НІТАСНІ S-3400N с энерго-дисперсионной приставкой Bruker X Flash 4010 (аналитик Е.В. Перегудина). Съёмка дифрактограмм проводилась на дифрактометре Rigaku Ultima IV (аналитик А.В. Канаки) [18].

Гидравлические характеристики потоков вычислены согласно [1, 8, 19], в том числе: коэффициент Шези $C_{r,M}$ – по формуле Маннинга (3); коэффициент гидродисперсии D_{FR} , коэффициент смешения γ_m , кратность основного разбавления n_m – методом В.А. Фролова и И.Д. Родзиллера по уравнениям (4)–(7):

$$C_{r,M} = \frac{h_a^6}{n_r}, \quad (3)$$

$$D_{FR} = \frac{g v_a h_a}{37 n_r C_{r,M}^2}, \quad (4)$$

$$\alpha_m = \varphi \xi^3 \sqrt{\frac{D_{FR}}{q_w}}, \quad (5)$$

$$\gamma_m = \frac{1 - \exp(-\alpha_m \sqrt[3]{L_{wk}})}{1 + \frac{Q}{q_w} \exp(-\alpha_m \sqrt[3]{L_{wk}})}, \quad (6)$$

$$n_m = \frac{\gamma_m Q + q_w}{q_w}, \quad (7)$$

где n_r – коэффициент шероховатости; h_a – средняя глубина потока, м; g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; v_a – средняя скорость течения, м/с ; α_m – коэффициент гидравлических условий; L_{wk} – расстояние от створа устья притока до контрольного створа, м; φ – коэффициент извилистости; ξ – коэффициент места положения выпуска (для берегового выпуска $\xi=1$); q_w – расход сточных вод или вод притока. Кратность начального разбавления в уравнении (2) по условиям [8] принята $n_0=1$. Интегральная сводка гидравлических и геохимических характеристик приведена в табл. 1.

Выбор химических элементов для апробации модели определяется целесообразностью изучения изменений в речных водах концентраций: 1) кальция – элемента, в значительной степени определяющего поведение карбонатной системы, включая функционирование карбонатного барьера – важного фактора регулирования химического состава вод [4, 20, 21]; 2) цинка – загрязняющего вещества, поступающего в водные объекты в процессе добычи свинцово-цинковых руд; 3) меди – вещества, непосредственно не входящего в перечень основных загрязняющих веществ при добыче свинцово-цинковых руд, но сопутствующего основному загрязнению и входящему в состав веществ, используемых в сельском хозяйстве [15–17].

На втором этапе были использованы данные, полученные в процессе изучения эколого-геохимического состояния водосбора пресноводного озера Поянху (одного из крупнейших в мире), которое является элементом гидрографической системы р. Янцзы, а именно – материалы изучения влияния сбросов сточных вод в реку Цзиньцзян – приток р. Ганьцзян, которая, в свою очередь, является крупнейшим притоком

озера Поянху [22, 23]. Полевые работы выполнены коллективом китайских, российских и индийских специалистов в рамках проекта BRICS в начале ноября 2019 г. С российской стороны отбор проб (с учетом [13, 14]) провели к.г.-м.н. Е.А. Солдатова (Институт геохимии РАН) и к.г.-м.н. И.С. Иванова (Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН). Лабораторные работы выполнены в аккредитованной гидрогеохимической лаборатории ТПУ (под руководством к.г.-м.н. А.А. Хвачевской) с использованием тех же методов, что и при изучении эколого-геохимического состояния рек Северного Вьетнама.

На реке Цзиньцзян в створах обследованных выпусков у г. Юньянь (табл. 2) расходы речных и сточных вод не измеряются. С учетом этого использована следующая методика гидравлических расчетов:

- 1) морфометрические характеристики и расходы воды р. Цзиньцзян в среднем за 2019 г. ($Q_{Jb,y}$) и октябрь 2019 г. (Q_{Jb} ; этот же расход рассматривается как расчетный по состоянию на 01.11.2019 г.) приняты согласно [22–29], в том числе: расходы воды $Q_{Jb,y}=219,7 \text{ м}^3/\text{с}$; $Q_{Jb}=47,3 \text{ м}^3/\text{с}$; площади водосборов р. Ганьцзян (F_G) и р. Цзиньцзян в створе выпуска (F_{Jb}): $F_G=82809 \text{ км}^2$; $F_{Jb}=6021 \text{ км}^2$;
- 2) для расчетных расходов воды Q_{Jb} и $Q_{Jb,y}$ при квазиравномерном движении [30] подобраны значения средней глубины по условию (8):

$$\frac{h_{a,Jb,y} (gB_{Jb,y})^{0,25}}{\sqrt{Q_{Jb,y}}} = \frac{h_{a,Jb} (gB_{Jb})^{0,25}}{\sqrt{Q_{Jb}}} = M(\Gamma), \quad (8)$$

где индекс « Jb,y » соответствует состоянию в среднем за 2019 г., индекс « Jb » – состоянию на 01.11.2019 г.; ширина реки B определялась по снимках Google Earth; получено: $B_{Jb,y}=160 \text{ м}$; $B_{Jb}=150 \text{ м}$; $h_{a,Jb,y}=1,17 \text{ м}$; $h_{a,Jb}=0,55 \text{ м}$; $M(\Gamma)$ – безразмерная глубина по [30]; $M(\Gamma)=0,498$; $v_a=0,57 \text{ м/с}$ (расчет по формуле Шези–Маннинга при $n_r=0,030$);

- 3) по результатам полевого обследования по состоянию на 01.11.2019 г. определены расходы сточных вод: выпуск производственных стоков p101 – $q_{w101p}=0,012 \text{ м}^3/\text{с}$; выпуск хозяйственно-бытовых стоков p100 – $q_{w100p}=0,137 \text{ м}^3/\text{с}$; расчет выполнен при допущении, что на выходе из коллектора глу-

бина потока сточных вод равна критической глубине.

Все расчёты проведены с использованием пакета MS Excel, в том числе оптимизация параметров модели (инструмент «Поиск решения», метод общего понижающего градиента) при условии минимизации относительной ошибки расчета:

$$\delta = \frac{100|C_{ms} - C_{cl}|}{C_{ms}}, \quad (9)$$

где C_{ms} и C_{cl} – концентрации вещества в воде измеренные и вычисленные.

Гидрохимическая характеристика исследуемых рек

Реки Бан Тхи и Дай – элементы речной системы р. Хонг (Бан Тхи – Гам – Ло – Хонг; Дай–Ло–Хонг). В качестве выпусков рассмотрены притоки, в которые поступает поверхностный и подземный сток с горнодобывающих предприятий: р. Ченгу – приток р. Бан Тхи; р. Намду – приток р. Дай. Воды указанных выше рек характеризуются по классификации [31] в среднем как пресные с малой и средней минерализацией (табл. 1), гидрокарбонатные кальциевые второго и третьего типов, с очень малой перманганатной окисляемостью, согласно [32] – олиготрофного и мезосапробного классов, отличаются превышением принятых в РФ нормативов качества для водных объектов хозяйственно-питьевого назначения по содержанию Si, Fe, Al, As, Pb, для рыбохозяйственного назначения – по содержанию NO_2^- , Fe, Al, Mn, Cu, Zn, Pb [15–17].

Водные вытяжки из донных отложений рек также пресные, гидрокарбонатные кальциевые третьего типа, но уже с повышенной перманганатной окисляемостью. Минеральный состав донных частиц (фракция до 0,5 мм) характеризуется преобладанием кварца; в заметных количествах присутствуют слюды, гидрослюды и хлориты, в меньшей степени – плагиоклаз и карбонаты (табл. 1) [16–18]. Общее состояние рек оценивается как «неудовлетворительное», что связано с сочетанием природных и антропогенных факторов, в том числе влиянием добычи свинцово-цинковых руд. Это воздействие прослеживается на протяжении 11–12 км с максимальным проявлением на участках до 4,5–5,0 км [15–17].

Таблица 1. Гидравлические и геохимические характеристики рек Бан Тхи, Дай в фоновом (bs) и контрольном (cs) створах и их притоков [15–18]

Table 1. Hydraulic and geochemical characteristics of the Ban Thi and Dai rivers in background (bs) and control (cs) cross-sections [15–18]

Показатель (формула) Indicator (formula)	Река Бантхи и ее приток The Ban Thi river and its tributary; date 19.02.16; point:			Река Дай и ее приток The Dai river and its tributary; date 20.02.16; point:		
	M1602	M1601	M1605	M1609	M1608	M1610
Створ, приток Cross-section, tributary	bs	cs	р. Ченгу Chengu	bs	cs	р. Намду Namdu
Длина реки от истока L_q , км River length from a source L_q , km	8,99	13,14	7,98	29,57	32,82	11,32
Площадь водосбора F_b , км ² Basin area F_b , km ²	75,4	134,0	48,0	110,5	164,8	40,8
Средняя глубина потока h_a , м Average depth of a stream h_a , m	0,44	0,35	0,15	0,24	0,51	0,50
Ширина потока B , м Width of a stream B , m	11	18	7	12	34	11

Показатель (формула) Indicator (formula)	Река Бантхи и ее приток The Ban Thi river and its tributary; date 19.02.16; point:			Река Дай и ее приток The Dai river and its tributary; date 20.02.16; point:		
	M1602	M1601	M1605	M1609	M1608	M1610
Средняя скорость течения v_a , м/с Average velocity v_a , m/s	0,09	0,12	0,26	0,42	0,20	0,20
Расход воды Q , м ³ /с Water discharge Q , m ³ /s	0,42	0,71	0,29	1,15	3,46	1,11
Коэффициент шероховатости n_r Factor of roughness n_r	0,08	0,08	0,10	0,08	0,07	0,08
Коэффициент Шези $C_{r,M}$, М ^{0,5} /с Chezy factor $C_{r,M}$, m ^{0,5} /s (3)	10,90	10,50	7,32	9,85	13,74	11,13
Коэффициент гидродисперсии D_{FR} , м ² /с Hydrodispersion factor D_{FR} , m ² /s (4)	0,001115	0,001218	0,001958	0,003417	0,002213	0,002630
Коэффициент смешения γ_m (6) Factor of mixture γ_m	–	0,83	–	–	0,79	–
Кратность основного разбавления n_m (7) Frequency rate of the basic dilution n_m	–	2,23	–	–	1,82	–
Расстояние от устья притока до контрольного створа $L_{ок}$, м Distance from a tributary mouth up to control cross-section $L_{ок}$, m	–	2450	–	–	1900	–
Время добегания от устья притока до контрольного створа τ_w , с Time of movement from a tributary mouth up to control cross-section τ_w , s	–	21208	–	–	9390	–
Показатели эколого-геохимического состояния речных вод Parameters of ecological and geochemical condition of river waters						
Температура воды T_{rw} , °С Water temperature T_{rw} , °C	14,5	14,0	15,0	15,5	16,0	15,0
pH, единицы pH/unit of pH	8,00	7,61	7,50	7,87	7,89	7,52
Сумма главных ионов Σ_{mi} , мг/дм ³ Sum of the main ions Σ_{mi} , mg/dm ³	333,3	318,4	290,0	231,0	224,7	264,5
Перманганатная окисляемость (ПО), мгО/дм ³ Permanganate oxidizability (PO), mgO/dm ³	0,13	0,28	0,41	0,13	0,36	0,41
Концентрация в воде $C(Ca)$, мкг/дм ³ $C(Ca)$ concentration in water, mkg/dm ³	83,2	76,6	67,2	48,8	49,1	62,5
Концентрация в воде $C(Cu)$, мкг/дм ³ $C(Cu)$ concentration in water, mkg/dm ³	0,32	0,43	0,39	0,63	0,46	0,36
Концентрация в воде $C(Zn)$, мкг/дм ³ $C(Zn)$ concentration in water, mkg/dm ³	70,61	48,11	1,28	3,63	2,34	7,52
Показатели эколого-геохимического состояния донных отложений Parameters of ecological and geochemical condition of river sediments						
Концентрация в водной вытяжке $S(Ca)$, мг/кг $S(Ca)$ concentration in water extract, mg/kg	217,5	255,0	242,0	257,5	228,5	105,0
Концентрация в водной вытяжке $S(Cu)$, мг/кг $S(Cu)$ concentration in water extract, mg/kg	0,14	0,12	0,10	0,10	0,10	0,08
Концентрация в водной вытяжке $S(Zn)$, мг/кг $S(Zn)$ concentration in water extract, mg/kg	1,52	0,27	0,03	0,05	0,10	0,17
Содержание минерала во фракции донных отложений с диаметром частиц <0,5 мм Mineral content in the river fraction of bottom sediments with particle diameter <0,5 mm						
Кварц/Quartz	83,4	46,0	59,2	74,1	83,0	90,0
Плагиоклаз/Plagioclase	1,0	2,5	2,0	1,2	1,0	1,0
Ортоклаз/Potassium feldspar	0,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0
Кальцит/Calcite	2,2	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Мусковит (иллит)/Muscovite (illite)	9,8	40,4	34,2	14,0	7,5	8,0
Каолинит/Kaolinite	1,1	2,6	1,3	2,5	1,5	0,0
Хлорит/Chlorite	2,5	5,5	2,3	8,2	6,0	1,0
Индексы насыщения SI речных вод (w) и водных вытяжек (e) из донных отложений Indexes of saturation of river waters (w) and water extracts (e) from bottom sediments						
(w): $CaCO_3(\text{calcite})=Ca^{2+}+CO_3^{2-}$	0,47	0,05	–0,11	0,00	0,03	–0,16
(e): $CaCO_3(\text{calcite})=Ca^{2+}+CO_3^{2-}$	–0,39	–8,66	–8,64	–8,63	–8,59	–9,00
(w): $Ca(\text{ГК})=Ca^{2+}+\text{ГК}$	1,11	1,08	1,04	0,91	0,92	1,02
(e): $Ca(\text{ГК})=Ca^{2+}+\text{ГК}$	0,90	0,96	0,94	0,95	0,92	0,62
(w): $ZnCO_3(\text{smithsonite})=Zn^{2+}+CO_3^{2-}$	2,23	1,68	–0,01	0,70	0,53	0,75
(e): $ZnCO_3(\text{smithsonite})=Zn^{2+}+CO_3^{2-}$	–4,62	–12,86	–13,05	–12,67	–12,77	–13,06

Примечание: Σ_{mi} – сумма главных ионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-}); расчет индексов насыщения $SI=lg\Pi A-lgK_{neq}$ речных вод (w) и водных вытяжек (e) выполнен по методике, изложенной в [33]; ΠA – произведение активностей группы веществ; K_{neq} – константа неустойчивости.

The note: Σ_{mi} is the sum of the main ions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-}); calculation of indexes of saturation $SI=lg\Pi A-lgK_{neq}$ of river waters (w) and water extracts (e) is executed by a technique stated in [33]; ΠA is product of substances activities; K_{neq} is a constant of instability.

Воды р. Ганьцзян и ее притоков, а также грунто-вые воды в речных долинах пресные с малой и средней минерализацией, гидрокарбонатные кальциевые, от олигосапробных (речные воды) до мезосапробных (речные и грунтовые воды) [34–37]. Изученные сточные воды пресные с большим разбросом содержаний растворенных веществ; хозяйственно-бытовые стоки гидрокарбонатные кальциевые, производственные сульфатные натриевые (табл. 2).

В целом изученные водные объекты характеризуются наличием пресных вод с достаточно низкой перманганатной окисляемостью и весьма интенсивным снижением концентраций загрязняющих веществ по длине рек, несмотря на высокую антропогенную нагрузку (уже по нормативному образованию загрязняющих веществ на густонаселенных территориях). Это свидетельствует о значительной способности рассмотренных рек к самоочищению и, возможно, связано с особенностями термического режима водных объектов, которые определяют высокую скорость биохимических процессов и более низкую (по сравнению с реками умеренного пояса) растворимость ряда соединений.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ многочисленных публикаций в области гидрохимического моделирования [1–3, 5, 6, 20, 38–40] и опыта исследований рек Вьетнама [15–18, 41] позволил сформулировать основные черты и допущения модели трансформации химического состава речных вод с учетом их взаимодействия с донными отложениями: 1) в ее основе – стационарное уравнение (10), описывающее гидродисперсию и адвективный перенос, отклонения от равновесия, обусловленные преимущественно внутриводными процессами, и взаимодействиями с донными отложениями, связанные с процессами осаждения – растворения и сорбции–десорбции; 2) стационарность уравнения (10) определяется целесообразностью анализа трансформации химического состава вод при наихудших гидрологических условиях, наблюдаемых во многих случаях при минимальном водном стоке в течение относительно продолжительного времени; 3) изменение концентрации вещества в речных водах пропорционально отклонению фактической концентрации C от равновесной C_p , причем это отклонение пропорционально флуктуациям модуля водного стока $M=Q/F_b$ (11), где Q – расход воды, м³/с; F_b – площадь водосбора, км²; 4) концентрация вещества C_x в створе x с учетом разбавления сточных вод с концентрацией C_w речными водами с концентрацией C_b согласно (1)–(7) соответствует аналитическому решению (12) с удельной скоростью изменения концентрации вещества в речных водах k_z (13); 5) максимально возможная концентрация вещества в донных отложениях S_m зависит от гранулометрического, минерального и химического состава донных отложений (через величину S_{m0}) и pH речных вод (14); 6) решением (10) при отсутствии внешних воздействий является уравнение (15), причем при $k_{pM}=0$ оно сводится к уравнению сорбции Лэнгмюра; 7) итоговое уравнение для оценки допустимой концентрации загрязняющего вещества в сточных водах $C_{w,lim}$ с учетом (12) приобретает вид (16):

$$v \frac{\partial C}{\partial x} \approx k_{pM} (C_p - C) + k_s (S - k_c (S_m - S) C) = k_z (C_e - C), \quad (10)$$

$$k_{pM} = k_p \left(\frac{Q}{F_b} \right)^{k_M}, \quad (11)$$

$$C_x = C_e + \left(C_b + \frac{C_w - C_b}{n_s} - C_e \right) \exp(-k_z \tau_w), \quad (12)$$

$$k_z = k_{pM} + k_s k_c (S_m - S), \quad (13)$$

$$S_m = S_{m0} \text{pH}^{k_{pH}}, \quad (14)$$

$$C_e = \frac{k_{pM} C_p + k_s S}{k_z} = C_e(C) + C_e(S), \quad (15)$$

$$C_{w,lim} = ((\text{ПДК} - C_e) \exp(k_z \tau_w) + C_e - C_b) n_s + C_b, \quad (16)$$

где v – скорость переноса вдоль оси x , м/с; k_p , k_M , k_{pM} – коэффициенты, учитывающие влияние на концентрацию вещества в речной воде отклонения от равновесного состояния C_p (k_p), модуля флуктуаций водного стока (k_M) и их совместного воздействия (k_{pM}); k_s и k_c – коэффициенты, учитывающие влияние градиента концентраций вещества в донных отложениях и речной воде (k_s) и пересчета соотношения вещества в донных отложениях и речных водах; S , S_m – фактическая и максимально возможная сорбционная способность грунтов (при наблюдаемом химическом составе и pH); S_{m0} , k_{pH} – региональная компонента S_m и показатель степени влияния pH вод на величину S_m ; $C_e(C)$ и $C_e(S)$ – составляющие C_e . В качестве C_p в первом приближении используются средние арифметические и средние геометрические значения концентраций (отдельно для рек Бан Тхи и Дай [16, 17]) с выбором варианта с минимальной погрешностью δ (9). Апробация модели ((3)–(7), (10)–(16)) показала, что погрешность определения концентраций Ca, Cu, Zn в водах рек Бан Тхи и Дай не превышает 1 % (табл. 3). Это свидетельствует о возможности ее использования и для практических расчетов (при наличии данных о составе донных отложений), и для анализа процессов взаимодействия речных вод с донными отложениями. В частности, судя по полученным данным (табл. 3), уровень содержания изученных химических элементов определяется, преимущественно, взаимодействием речных вод с донными отложениями (более 60 %). Эти взаимодействия в случае Zn (в некоторой степени) и Cu связаны с сорбцией на твердых частицах, а в случае Zn и, особенно, Ca – с осаждением малорастворимых соединений, что подтверждается термодинамическими расчетами и материалами изучения минерального состава донных отложений (табл. 1). Роль внутриводных процессов, связанных с отклонением фактической концентрации от равновесного значения, наиболее значима для меди. Для кальция и цинка время установления равновесия в растворе, судя по данным (табл. 3), заметно больше времени добегаания водных масс от выпуска (устья притока) до контрольного створа.

Сопоставление измеренных значений C_x ($C_{x(ms)}$) и расчетных C_e показало, что существенное приближение к стационарному решению вида (15) происходит в пределах 2,5 км (табл. 1, 3). Влияние водного стока, как показал анализ гидрологической ситуации [15, 17], прежде всего, связан с воздействием на режим твердого стока и русловых деформаций (размыв донных отложений и берегов – аккумуляция наносов). Кроме того, удельная скорость изменения концентраций Ca (в основном) и Zn (в меньшей степени) в определенной степени обратно пропорциональна модулю вод-

ного стока ($k_M < 0$). Для меди такая зависимость ($k_M = 0$) не отмечена (табл. 3).

Следует отметить, что наименьшая погрешность расчета концентраций Ca, Cu, Zn в водах рр. Бан Тхи и Дай была при использовании в качестве равновесного содержания C_p среднегеометрических значений, что вполне закономерно – концентрации многих веществ в речных и подземных водах достаточно часто могут рассматриваться как логнормально распределенные случайные величины с математическим ожиданием, аппроксимируемым средним геометрическим [15].

Таблица 3. Параметры математической модели трансформации содержаний Ca, Cu и Zn в реках Бан Тхи (пункт M1601) и Дай (пункт M1608), водотоки в бассейне р. Хонг, Вьетнам

Table 3. Parameters of mathematical model of transformation of Ca, Cu and Zn contents in the Ban Thi (M1601) and Dai (M1608) rivers, water-currents in the Hong river basin, Vietnam

Показатель (формула) Indicator (formula)	Единицы измерения Units	Ca		Cu		Zn	
		M1601	M1608	M1601	M1608	M1601	M1608
C_b	мг/дм ³ /mg/dm ³	83,2	48,8	0,32	0,63	70,61	3,63
C_w	то же/the same	67,2	62,5	0,39	0,36	1,28	7,52
C_p	–/–	75,9	30,4	0,72	1,15	57,92	7,51
$C_{x(ms)}$	–/–	76,6	49,1	0,43	0,46	48,11	2,34
$C_{x(cl)}$ (12)	–/–	76,5	49,1	0,43	0,46	48,14	2,34
C_e (15)	–/–	76,5	49,1	0,46	0,44	48,14	2,34
$C_e(C)$ (15)	%	<0,1	<0,1	22,8	36,1	<0,1	0,1
$C_e(S)$ (15)	%	>99,9	>99,9	77,2	63,9	>99,9	99,9
$\delta(\theta)$	%	0,130086	<0,00001	<0,00001	0,001077	0,050501	0,000015
S	мг/кг/mg/kg	255,0	228,5	0,12	0,10	0,27	0,10
S_m (14)	то же/the same	42,9	40,6	0,96	0,97	1405,57	1447,51
S_{m0}	–/–	900,1	900,1	0,44	0,44	269,49	269,49
k_z (13)	с ⁻¹ /s ⁻¹	273,041749	3,014386	0,000065	0,000067	5,459482	1,380018
k_{pM}	с ⁻¹ /s ⁻¹	275,137282	4,870474	0,000009	0,000009	4,537368	0,430267
k_p	м ³ /км ² /м ³ /км ²	0,000058	0,000058	0,000009	0,000009	0,000576	0,000576
k_M	–	-2,932348	-2,932348	0,000000	0,000000	-1,712341	-1,712341
k_s	кг/(с·мг)/kg/(s·mg)	0,000353	0,000353	0,000190	0,000190	0,003530	0,003530
$k_z \cdot k_c$	дм ³ /кг/дм ³ /кг	0,009879	0,009879	0,000066	0,000066	0,000656	0,000656
k_{pH}	–	-1,499992	-1,499992	0,384148	0,384148	0,813840	0,813840

Примечание: индекс (ms) соответствует измеренным значениям, а индекс (cl) – вычисленным.

Note: index (ms) corresponds to the measured values, and index (cl) – to the calculated values.

На втором этапе исследования по данным о составе стоков и вод р. Цзиньцзян (C_b – по результатам опробования в пункте р98, $C_{x,ms}$ – в пункте р102) рассмотрено уравнение (12) с двухступенчатым поступлением стоков по выпускам р101 и р100, подбором значений k_z и C_e и последующим сопоставлением C_e со средними геометрическими и средними арифметическими значениями (табл. 2). Для рассмотренных 66 веществ установлено, что наилучшим приближением для C_e является среднее геометрическое C_g :

$$C_e = (0,735 \pm 0,043) C_g; \quad (17)$$

квадрат корреляционного отношения $R^2 = 0,82$.

С учетом этого методика применения уравнений (12), (16) для оценки допустимого воздействия на водные объекты предусматривает: 1) проведение гидрохимических и гидрометрических наблюдений на репрезентативных реках (участках рек); 2) оценку средних геометрических содержаний нормируемых веществ C_g по данным наблюдений и расчету C_e по зависимости (17); 3) оценку кратности разбавления по уравнениям (2)–(7) и подбору значений k_z в уравнении (12); 4) построение по полученным значениям C_g и k_z (которые соотносятся с геометрическим центром

водосбора рассматриваемой реки) карт однородных районов для малых рек и карт изолиний для средних (под малыми в первом приближении понимаются реки с площадью водосбора до 2000 км², под средними – с площадью 2000–50000 км² [42]); при использовании карт однородных районов проводится проверка на однородность с последующим объединением выборок; 5) в случае нормирования сбросов загрязняющих веществ на гидрохимически изученной реке – использование C_e (C_g) и k_z по данным наблюдений, для неизученной реки (например, при проектировании очистных сооружений) – по картам однородных районов или изолиний значений C_g и k_z , а фоновая концентрация принимается как $C_b = C_e$; 6) оценку допустимой концентрации загрязняющего вещества в сточных водах $C_{w,lim}$ по уравнению (16).

Заключение

Разработана математическая модель трансформации загрязняющих веществ в водных объектах. Ее апробация на примере рек Бан Тхи и Дай в Северном Вьетнаме показала, что химический состав вод изученных рек определяется более чем на 60 % взаимодействиями речных вод с донными отложениями в

результате осаждения малорастворимых соединений (карбонаты, фосфаты и гуматы ряда металлов [4, 20, 21, 40, 43, 44]) и соосаждения на твердых частицах микроэлементов (табл. 1, 3). В результате этих взаимодействий уровень содержания в речных водах (в пунктах М1602–М1601 и М1609–М1608) веществ, поступающих в водные объекты в результате добычи свинцово-цинковых руд, существенно снижается в пределах 2,0–2,5 км. На других изученных реках провинции Баккан участки с заметно повышенными концентрациями обычно не превышают 4,5–5,0 км, хотя определенное влияние прослеживается до 11,0–12,0 км [15–17].

Влияние водного стока проявляется, прежде всего, в изменениях твердого стока, в меньшей степени – в регулировании внутриводных процессов, для которых требуется более продолжительное время установления равновесия в растворе. С учетом этого можно предположить, что при восстановлении как поверхностных, так и подземных водных объектов (неглубокого залегания) можно добиться определенного улучшения качества вод за счет последовательного изъятия загрязненных грунтов и внесения грунтов с повышенной сорбционной способностью.

На основе предложенной модели (10)–(15) разработана ее упрощенная версия (12), (17) и методика нормирования сбросов загрязняющих веществ применительно к случаям наличия и отсутствия данных

наблюдений за химическим составом речных вод. Влияние взаимодействий с донными отложениями в этом случае учитывается косвенно, через структуру модели и значения ее параметров. Кроме того, особенностью методики является отсутствие необходимости доказательства природного или антропогенного генезиса веществ в случае $C_b > \text{ПДК}$. Апробация упрощенной модели проведена по данным о химическом составе стоков и воды р. Цзиньцзян (провинция Цзянси в КНР) – элемента гидрографической системы р. Цзиньцзян – р. Ганьцзян – озеро Поянху – р. Янцзы.

Необходимо отметить, что общей чертой гидрохимических условий изученных рек Бан Тхи, Дай (Вьетнам), Цзиньцзян (Китай) является достаточно высокая их способность к самоочищению. Возможно, эта способность связана с особенностями термического режима, определяющими высокую скорость биохимических процессов и более низкую растворимость ряда соединений. Данное предположение в целом совпадает с выводами [45, 46], полученными при сопоставлении способности поверхностных вод к самоочищению на севере и юге КНР, а именно – с выводом о более высоком уровне самоочищения поверхностных вод на юге КНР.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-55-80015.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методические основы оценки и регламентирования антропогенного влияния на качество поверхностных вод / под ред. А.В. Караушева. – Л.: Гидрометеоздат, 1987. – 285 с.
2. Вода России. Математическое моделирование в управлении водопользованием / под ред. А.М. Черняева. – Екатеринбург: Изд-во «Аква-пресс», 2001. – 520 с.
3. Loucks D.P., Van Beek E. Water resources systems planning and management. An introduction to methods, models and applications. – Turin: UNESCO Publishing, printed by Ages Arti Grafiche, 2005. – 679 p.
4. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода–порода. В 5 т. Т. 1. Система вода–порода в земной коре: взаимодействие, кинетика, равновесие, моделирование / отв. ред. С.Л. Шварцев. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. – 244 с.
5. Лехов А.В. Физико-химическая гидрогеодинамика. – М.: КДУ, 2010. – 500 с.
6. Benedini M., Tsakiris G. Water quality modelling for rivers and streams. – Dordrecht: Springer, 2013. – 288 p.
7. РД 52.24.622-2017. Порядок проведения расчета условных фоновых концентраций химических веществ в воде водных объектов для установления нормативов сбросов сточных вод. Дата введения 14.06.2017 г. – М.; Ростов-на-Дону: Росгидромет, ФГБУ «ГХИ», 2017. – 96 с.
8. Методика разработки нормативов допустимых сбросов веществ и микроорганизмов в водные объекты для водопользователей. – М.: МПР России, 2020. – 26 с.
9. GB3838-2002. State Environmental Protection Administration. Environmental quality standards for surface water. – Beijing, China Environmental Science Press, 2002. – 12 p.
10. Chinese Academy of Environmental Planning // National Technical Manual of Water Environmental Capacity Calculation. – Beijing, Chinese Academy of Environmental Planning, 2003. – P. 42–69.
11. SL 348-2006. Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Code of practice for computation on allowable permitted assimilative capacity of water bodies. China: Water Conservancy and Hydropower Press, 2006. – 43 p.
12. Реймерс Н.Ф. Природопользование. – М.: Мысль, 1990. – 637 с.
13. Water quality assessments. A guide to use of biota, sediments and water in environmental monitoring. 2nd ed. / Ed. by D. Chapman. – London: Chapman & Hall, 1996. – 651 p.
14. Guide to hydrological practices. V. I. Hydrology – from measurement to hydrological information. 6th ed. – Geneva: World Meteorological Organization, 2008. – 296 p.
15. Improved method for hydrochemical exploration of mineral resources / Nguyen Van Luyen, O.G. Savichev, V.A. Domarenko, Quach Duc Tin // Vietnam Journal of Earth Sciences. – 2017. – № 39 (2). – P. 167–180. DOI: 10.15625/0866-7187/39/2/9703.
16. Нгуен Ван Луен. Эколого-геохимическое состояние подземных и речных вод, донных отложений водотоков в северной части Вьетнама (на примере уезда Чодонь, провинция Баккан): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2017. – 22 с.
17. Nguyen Van Luyen, Savichev O.G. Assessing the influence of the mining operations on the state of streams in the northern part of the Red River Basin (Viet Nam) // Geography and natural resources. – 2018. – V. 39. – № 2. – P. 182–188. DOI: 10.1134/S1875372818020129.
18. Минералого-геохимические особенности донных отложений малых рек в междуречье рек Ло и Кау (Северный Вьетнам) / О.Г. Савичев, В.А. Домаренко, Е.В. Перегудина, Нгуен Ван Луен, М.В. Шалдыбин, А.В. Канаки // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 9. – С. 102–113.
19. СП 33-101-2003. Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М.: Госстрой России, 2004. – 72 с.
20. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. – М.: Наука, 2004. – 677 с.
21. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh groundwater in the main landscape zones of the Earth // Geochemistry International. – 2008. – V. 46. – № 13. – P. 1285–1398.
22. Poyang Lake basin water environment management project. Consolidated Environmental Assessment Report. SFG2444 V2. 2016.8. – Beijing: Consignor Jiangxi Province Office of Urban

- Construction & Foreign Capital Utilization Consignee: CERI eco Technology Co., Ltd., 2006. – 23 p. DOI: 10.1002/joc.1307.
23. Shankman N D., Keim B. D., Song Jie. Flood frequency in China's Poyang lake region: trends and teleconnections // *International journal of climatology*. – 2006. – V. 26. – P. 1255–1266.
 24. Солдатова Е.А. формирование химического состава подземных вод района озера Поянху (Китай): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2016. – 22 с.
 25. Li Y., Zhang Qi Historical and predicted variations of baseflow in China's Poyang Lake catchment // *River Resources and Applications*. – 2018. – P. 1–12. DOI: 10.1002/tra.3379.
 26. Assessment of water storage response to surface hydrological connectivity in a large floodplain system (Poyang Lake, China) using hydrodynamic and geostatistical analysis / Y. Li, Qi Zhang, J. Yao, Z. Tan, X. Liu // *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. – 2019. – № 33. – P. 2071–2088. DOI: 10.1007/s00477-019-01740-9.
 27. Official site of the Department of Water Resources of Jiangxi Province, People's Republic of China. Jiangxi water resources Bulletin. 10.2020. URL: <http://slt.jiangxi.gov.cn/col/col27420/index.html> (поступила 15.03.2021).
 28. Official site of the Department of Water Resources of Jiangxi Province, People's Republic of China. Jiangxi Bulletin of soil and water conservation. 03.12.2020. URL: http://slt.jiangxi.gov.cn/art/2020/12/3/art_27420_2953883.html (поступила 15.03.2021).
 29. Influences of the timing of extreme precipitation on floods in Poyang Lake, China / X. Li, Qi Hu, R. Wang, D. Zhang, Qi Zhang // *Hydrology Research*. – 2021. – P. 1–17. DOI: 10.2166/hh.2021.078.
 30. Гришанин К.В. Устойчивость речных русел и кинематические волны // *Труды Государственного гидрологического института*. Вып. 190. Исследования морфологии и гидравлики речных русел, пойм и водоёмов для нужд строительного проектирования. – Л.: Гидрометеоздат, 1972. – С. 37–56.
 31. Алёкин О.А. Основы гидрохимии. – Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1970. – 444 с.
 32. ГОСТ 17.1.2.04–77. Показатели состояния и правила таксации рыбохозяйственных водных объектов. – М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1977. – 17 с.
 33. Савичев О.Г., Колоколова О.В., Жуковская Е.А. Состав и равновесие донных отложений р. Томь с речными водами // *Геоэкология*. – 2003. – № 2. – С. 108–119.
 34. Size fractionation of trace elements in the surface water and groundwater of the Ganjiang River and Xiushui River basins, China / E.A. Soldatova, N.V. Guseva, Z. Sun, I.S. Mazurova // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2015. – V. 27 (1). – 012037. DOI: 10.1088/1755-1315/27/1/012037.
 35. Evolution of the groundwater chemical composition in the Poyang Lake catchment, China / S. Shvartsev, Z. Shen, Z. Sun, G. Wang, E. Soldatova, N. Guseva // *Environmental Earth Sciences*. – 2016. – V. 75 (18). – P. 1239. DOI: 10.1007/s12665-016-6065-8.
 36. Geochemical conditions of natural wetland and paddy fields in the Poyang Lake area, China / E. Soldatova, Y. Dong, J. Li, I. Ivanova, A. Toropov, I. Gromyak, D. Dogadkin, Z. Sun // *Applied Sciences*. – 2021. – № 3 (1). DOI: 10.1007/s42452-020-04060-8.
 37. Nitrogen transformation and pathways in the shallow groundwater–soil system within agricultural landscapes / E. Soldatova, Y. Dong, J. Li, Y. Liu, J. Zan, P. Boeckx, Z. Sun // *Environmental Geochemistry and Health*. – 2021. – № 43 (1). – P. 441–459. DOI: 10.1007/s10653-020-00733-w.
 38. Трофимов В.В., Манихин В.И. Имитационная модель, описывающая миграцию химических веществ в системе «вода – донные отложения» и пути ее численного решения // *Гидрохимические материалы. Т. ХСII. Основные направления работ в области гидрохимии*. – Л.: Гидрометеоздат, 1984. – С. 65–72.
 39. Banwart S.A. Aqueous speciation at the interface between geological solids and groundwater // *Modelling in Aquatic Chemistry* / Eds. I. Grenthe, I. Puigdomenech. – Paris, France: OECD, Nuclear Energy Agency, 1997. – P. 245–288.
 40. Solubility, mobility, and bioaccumulation of trace elements: abiotic processes in the rhizosphere / B. Robinson, N. Bolan, S. Mahimairaja, B. Clothier // *Trace elements in the environment: biogeochemistry, biotechnology, and bioremediation* / Eds. M.N.V. Prasad, Ravi Naidu, Kenneth S. Sajwan. – New York, USA: Taylor & Francis Group, 2006. – P. 97–110.
 41. Фунг Тхай Зыонг. Эколого-геохимическое состояние дельты реки Меконг (республика Вьетнам) по результатам изучения донных отложений: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2015. – 25 с.
 42. ГОСТ 19179–73. Гидрология суши. Термины и определения. – М.: Госстандарт СССР, 1988. – 47 с.
 43. Ephraim J.H., Allard B. Metal ion binding by humic substances // *Modelling in Aquatic Chemistry* / Eds. I. Grenthe, I. Puigdomenech. – Paris, France: OECD, Nuclear Energy Agency, 1997. – P. 207–244.
 44. Chemical immobilization of metals and metalloids by phosphates / E.G. Hafsteinsdottir, D. Camenzuli, A.L. Rocavert, J. Walworth, D.B. Gore // *Applied Geochemistry*. – 2015. – V. 59. – P. 47–62. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2015.03.014.
 45. Zhang Y., Liu P. Comprehensive manual of water environmental capacity. – Beijing: Tsinghua University Press., 1991. – 1222 p.
 46. Calculation theory and application of water environment capacity / Y. Pang, G. Lu et al. – Beijing: Science Press, 2010. – 220 p.

Поступила 19.04.2021 г.

Информация об авторах

Савичев Олег Геннадьевич, доктор географических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Чжоу Дань, аспирант отделения геологии инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 556.314:556.535.8

METHOD FOR ASSESSING ALLOWABLE CONCENTRATIONS OF POLLUTING SUBSTANCES WITH CONDITIONS OF RIVER SEDIMENTS

Oleg G. Savichev¹,
OSavichev@mail.ru

Zhou Dan¹,
929177582@qq.com

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

The relevance of the research is determined by the need to take into account the interactions of river waters with bottom sediments when normalizing anthropogenic impacts on water bodies

The aim of the research is to develop the model of transformation of polluting substances in water objects with the account of waste dilution and interaction of river waters and sediments and development of sewage normalization technique.

Methods: mathematical modelling of hydrochemical processes.

Results and conclusions. The mathematical model of transformation of polluting substances in water objects with the account of sewage dilution interaction of river waters and river sediments is developed. Its approbation by the example of the small rivers in northern part of Vietnam (the Ban Thi and Dai rivers in the Hong river basin) has shown that the chemical composition of waters of researched rivers is determined more than on 60 % by interactions of river waters with sediments as a result of sedimentation of poorly soluble substances and sorption of some trace elements. It results in appreciable decrease of concentration of many substances on sites up to 4,5–5,0 kms. Influence of water flow is shown first of all, in changes of a bed-material discharge, to a lesser degree it is a regulation of intrawater processes for which more long time of balance establishment in a solution is required. On the basis of the offered model its simplified version and a technique of normalization of sewage for variants of presence and absence of observation data is developed. Thus, the influence of interactions with river sediments is taken into account indirectly through structure of model and value of its parameters. Approbation of the simplified model is executed on the example of the Jinjiang river in the Poyang lake basin (China).

Key words:

Mathematical model, transformation of polluting substances, dilution, river waters, river sediments, the Hong river basin, the Poyang lake basin.

The research was financially supported by the RFBR grants no. 18-55-80015.

REFERENCES

1. *Metodicheskie osnovy otsenki i reglamentirovaniya antropogenogo vliyaniya na kachestvo poverkhnostnykh vod* [Methodological foundations for assessing and regulating anthropogenic impact on the quality of surface waters]. Ed. by A.V. Karaushev. Leningrad, Gidrometeoizdatpubl., 1987. 285 p.
2. *Voda Rossii. Matematicheskoe modelirovanie v upravlenii vodopolzovaniem* [Water of Russia. Mathematical modeling in water management]. Ed. by A.M. Chernyaev. Yekaterinburg, Akvapress Publ., 2001. 520 p.
3. Loucks D.P., Van Beek E. *Water resources systems planning and management. An Introduction to Methods, Models and Applications*. Turin, UNESCO Publ., printed by Ages Arti Grafiche, 2005. 679 p.
4. *Geologicheskaya evolyutsiya i samoorganizatsiya sistemy voda-poroda* [Geological evolution and self-organization of the water-rock system]. In 5 vol. Vol. 1. *Sistema voda-poroda v zemnoy kore: vzaimodeystvie, kinetika, ravnovesie, modelirovanie* [The water-rock system in the earth's crust: interaction, kinetics, equilibrium, modeling]. Ed. by S.L. Shvartsev. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2005. 244 p.
5. Lekhov A.V. *Fiziko-khimicheskaya gidrogeodinamika* [Physicochemical hydrogeodynamics]. Moscow, KDU Publ., 2010. 500 p.
6. Benedini M., Tsakiris G. *Water quality modelling for rivers and streams*. Dordrecht, Springer, 2013. 288 p.
7. RD 52.24.622-2017. *Poryadok provedeniya rascheta usloynykh fonovykh kontsentratsiy khimicheskikh veshchestv v vode vodnykh ob'yektov dlya ustanovleniya normativov sbrosov stochnykh vod* [Procedure for calculating the background concentrations of chemicals in the water of water bodies in order to establish standards for wastewater discharges]. Moscow, Rostov-on-Don, Rosgidromet, FGBU «SCHI» Publ., 2017. 96 p.
8. *Metodika razrabotki normativov dopustimyykh sbrosov veshchestv i mikroorganizmov v vodnye obyekt dlya vodopolzovateley* [Methodology for developing standards for permissible discharges of substances and microorganisms into water bodies for water users]. Moscow, Ministry of Nature Resources of Russia Publ., 2020. 26 p.
9. GB3838-2002. *State Environmental Protection Administration. Environmental quality standards for surface water*. Beijing, China Environmental Science Press., 2002. 12 p.
10. *Chinese Academy of Environmental Planning. National technical manual of water environmental capacity calculation*. Beijing, Chinese Academy of Environmental Planning, 2003. pp. 42–69.
11. GB3838-2002. *State Environmental Protection Administration. Environmental quality standards for surface water*. Beijing, China Environmental Science Press, 2002. 43 p.
12. Reymers N.F. *Prirodopolzovanie* [Nature management]. Moscow, Mysl Publ., 1990. 637 p.
13. *Water quality assessments. A guide to use of biota, sediments and water in environmental monitoring*. 2nd ed. Ed. by D. Chapman. London, Chapman & Hall, 1996. 651 p.
14. *Guide to hydrological practices. Vol. I. Hydrology – from measurement to hydrological information*. 6th ed. Geneva, World Meteorological Organization, 2008. 296 p.
15. Nguyen Van Luyen, Savichev O.G., Domarenko V.A., Quach Duc Tin. Improved method for hydrochemical exploration of mineral resources. *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 2017, no. 39 (2), pp. 167–180. DOI: 10.15625/0866-7187/39/2/9703.
16. Nguen Van Luen. *Ekologo-geokhimicheskoe sostoyanie podzemnykh i rechnykh vod, donnykh otlozheniy vodotokov v severnoy chasti Vjetnama (na primere uezda Chodon, provintsiya Bakkan)* Dis. Kand. nauk [Ecological and geochemical condition of ground and river waters, river sediments of the minor rivers in the Northern part of Vietnam (by the example of Chodon district, Bacchan province)]. Cand. Diss. Tomsk, 2017. 22 p.

17. Nguyen Van Luyen, Savichev O.G. Assessing the influence of the mining operations on the state of streams in the northern part of the Red River Basin (Viet Nam). *Geography and natural resources*, 2018, vol. 39, no. 2, pp. 182–188. DOI: 10.1134/S1875372818020129.
18. Savichev O.G., Domarenko V.A., Peregudina 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.
19. SP 33-101-2003. *Svod pravil po proektirovaniyu i stroitelstvu. Opredelenie osnovnykh raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik* [Code of rules for design and construction. Determination of the main calculated hydrological characteristics]. Moscow, Gosstroy of Russia Publ., 2004. 72 p.
20. Kravynov S.R., Ryzhenko B.N., Shvets V.M. *Geokhimiya podzemnykh vod: teoreticheskie, prikladnye i ekologicheskie aspekty* [Geochemistry of ground waters: theoretical, applied and environmental aspects]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 677 p.
21. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh groundwater in the main landscape zones of the Earth. *Geochemistry International*, 2008, vol. 46, no. 13, pp. 1285–1398.
22. *Poyang Lake Basin Water Environment Management Project. Consolidated Environmental Assessment Report*. SFG2444 V2. 2016.8. Beijing, Consignor Jiangxi Province Office of Urban Construction & Foreign Capital Utilization Consignee: CERI eco Technology Co., Ltd., 2006. 23 p. DOI: 10.1002/joc.1307.
23. Shankman N.D., Keim B.D., Song Jie. Flood frequency in china's Poyang lake region: trends and teleconnections. *International journal of climatology*, 2006, vol. 26, pp. 1255–1266.
24. Soldatova E.A. *Formirovanie khimicheskogo sostava podzemnykh vod rayona ozera Poyankhu (Kitay)*. Dis. Kand. nauk [Formation of the chemical composition of groundwater in the Poyang Lake area (China). Cand. Diss.]. Tomsk, 2016. 22 p.
25. Li Y., Zhang Qi Historical and predicted variations of baseflow in China's Poyang Lake catchment. *River Resources and Applications*, 2018, pp. 1–12. DOI: 10.1002/rra.3379.
26. Li Y., Zhang Qi, Yao J., Tan Z., Liu X. Assessment of water storage response to surface hydrological connectivity in a large floodplain system (Poyang Lake, China) using hydrodynamic and geo-statistical analysis. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2019, no. 33, pp. 2071–2088. DOI: 10.1007/s00477-019-01740-9.
27. *Official site of the Department of Water Resources of Jiangxi Province, People's Republic of China*. Jiangxi water resources Bulletin. 10.2020. Available at: <http://slt.jiangxi.gov.cn/col/col27420/index.html> (accessed 15 March 2021).
28. *Official site of the Department of Water Resources of Jiangxi Province, People's Republic of China*. Jiangxi Bulletin of soil and water conservation. 03.12.2020 Available at: http://slt.jiangxi.gov.cn/art/2020/12/3/art_27420_2953883.html (postupila 15 March 2021).
29. Li X., Hu Qi, Wang R., Zhang D., Zhang Qi Influences of the timing of extreme precipitation on floods in Poyang Lake, China. *Hydrology Research*, 2021, pp. 1–17. DOI: 10.2166/nh.2021.078.
30. Grishanin K.V. *Ustoychivost rechnykh rusel i kineticheskie volny* [Stability of river channels and kinematic waves]. *Trudy Gosudarstvennogo gidrologicheskogo instituta. Vyp. 190. Issledovanie morfologii i gidravliki rechnykh rusel, poim i vodoemov dlya nuzhd stroitel'nogo proektirovaniya* [Materials of the State hydrological institute. Iss. 190. Researches of morphology and hydraulics of river channel, flood plain and reservoirs for needs of building designing]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1972. pp. 37–56.
31. Alekin O.A. *Osnovy gidrokhimii* [Bases of hydrochemistry]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1970. 444 p.
32. GOST 17.1.2.04–77. *Pokazateli sostoyaniya i pravila taksatsii rybnokhozyaystvennykh vodnykh ob'yektov* [Indicators of the state and rules of taxation of fishery water bodies]. Moscow, Gosstandart of the USSR Publ., 1977. 17 p.
33. Savichev O.G., Kolokolova O.V., Zhukovskaya E.A. Sostav i ravnovesie donnykh otlozheniy r. Tom s rechnymi vodami [Composition and balance of river sediments of the Tom river with river waters]. *Geoekologia*, 2003, no. 2, pp. 108–119.
34. Soldatova E.A., Guseva N.V., Sun Z., Mazurova I.S. Size fractionation of trace elements in the surface water and groundwater of the Ganjiang River and Xiushui River basins, China. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 27 (1), 012037. DOI: 10.1088/1755-1315/27/1/012037.
35. Shvartsev S., Shen Z., Sun Z., Wang G., Soldatova E., Guseva N. Evolution of the groundwater chemical composition in the Poyang Lake catchment, China. *Environmental Earth Sciences*, 2016, vol. 75 (18), p. 1239. DOI: 10.1007/s12665-016-6065-8.
36. Soldatova E., Dong Y., Li J., Ivanova I., Toropov A., Gromyak I., Dogadkin D., Sun Z. Geochemical conditions of natural wetland and paddy fields in the Poyang Lake area, China. *Applied Sciences*, 2021, no. 3 (1). DOI: 10.1007/s42452-020-04060-8.
37. Soldatova E., Dong Y., Li J., Liu Y., Zan J., Boeckx P., Sun Z. Nitrogen transformation and pathways in the shallow groundwater-soil system within agricultural landscapes. *Environmental Geochemistry and Health*, 2021, no. 43 (1), pp. 441–459. DOI: 10.1007/s10653-020-00733-w.
38. Trofimov V.V., Manikhin V.I. Imitatsionnaya model, opisuyvayushchaya migratsiyu khimicheskikh veshchestv v sisteme «voda – donnyye otlozheniya» i puti ee chislennoogo resheniya [A simulation model describing the migration of chemicals in the «water – bottom sediments» system and the ways of its numerical solution]. *Gidrokhimicheskie materialy. T. XCII. Osnovnye napravleniya rabot v oblasti gidrokhimii* [Hydrochemical materials. Vol. XCII. The main directions of work in the field of hydrochemistry]. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1984. pp. 65–72.
39. Banwart S.A. *Aqueous speciation at the interface between geological solids and groundwater. Modelling in Aquatic Chemistry*. Eds. I. Grenthe, I. Puigdomenech. Paris, France, OECD, Nuclear Energy Agency, 1997. pp. 245–288.
40. Robinson B., Bolan N., Mahimairaja S., Clothier B. Solubility, mobility, and bioaccumulation of trace elements: abiotic processes in the rhizosphere. *Trace elements in the environment: biogeochemistry, biotechnology, and bioremediation*. Eds. M.N.V. Prasad, Ravi Naidu, Kenneth S. Sajwan. New York, USA, Taylor & Francis Group, 2006. pp. 97–110.
41. Phung Thai Duong. *Ekologo-geokhimicheskoe sostoyanie delty reki Mekong (respublika Vyetnam) po rezul'tatam izucheniya donnykh otlozheniy*. Dis. Kand. nauk [Ecological and geochemical state of the Mekong River Delta (Republic of Vietnam) based on the results of studying bottom sediments. Cand. Diss.]. Tomsk, 2015. 25 p.
42. GOST 19179-73. *Gidrologiya sushi. Terminy i opredeleniya* [Hydrology of land. Terms and definitions]. Moscow, Gosstandart of the USSR Publ., 1988. 47 p.
43. Ephraim J.H., Allard B. Metal ion binding by humic substances. *Modelling in Aquatic Chemistry*. Eds. I. Grenthe, I. Puigdomenech. Paris, France, OECD, Nuclear Energy Agency, 1997. pp. 207–244.
44. Hafsteinsdottir E.G., Camenzuli D., Rocavert A.L., Walworth J., Gore D.B. Chemical immobilization of metals and metalloids by phosphates. *Applied Geochemistry*, 2015, vol. 59, pp. 47–62. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2015.03.014.
45. Zhang Y., Liu P. *Comprehensive manual of water environmental capacity*. Beijing, Tsinghua University Press, 1991. 1222 p.
46. Pang Y., Lu G. *Calculation theory and application of water environment capacity*. Beijing, Science Press, 2010. 220 p.

Received: 19 April 2021.

Information about the authors

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

Zhou Dan, graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 553.493:550.42

МИНЕРАЛОГИЯ И ГЕОХИМИЯ ТОНШТЕЙНОВ В УГЛЯХ ЧЕРНОГОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ МИНУСИНСКОГО БАСЕЙНА

Вергунов Алексей Викторович,
alexeivergunov@rambler.ru

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

Актуальность работы обусловлена необходимостью определения роли пирокластического материала в формировании геохимического фона редких элементов в угле.

Цель: изучить минералогические и геохимические особенности тонштейнов и вмещающих углей черногорской свиты Черногорского месторождения Минусинского бассейна.

Объекты: тонштейны и вмещающие угли черногорской свиты Черногорского месторождения Минусинского бассейна.

Методы: опробование угольных пластов Черногорского месторождения Минусинского бассейна; химический состав определен методами масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS), атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-AES), инструментальным нейтронно-активационным анализом; минеральный состав изучен методами оптической микроскопии, сканирующей электронной микроскопии, рентгеновской дифрактометрии.

Результаты. Рассмотрены минеральные и геохимические особенности тонштейнов черногорской свиты Черногорского месторождения Минусинского угольного бассейна. Каолинит является преобладающим в составе изученных тонштейнов. В меньшем количестве встречаются кварц, полевые шпаты, фосфаты. Комплексный минералого-геохимический подход позволил восстановить состав пирокластического материала, из которого сформировались изученные тонштейны. Наибольшее распространение в угольных пластах Черногорского месторождения имеют тонштейны, образовавшиеся из пеллов кислого состава. Также отмечается присутствие тонштейнов, сформированных с участием пирокластике кислого состава щелочного ряда. Редко встречаются разности, сформированные из пирокластике среднего и основного составов. На основе выявленных тонштейнов восстановлена последовательность изменения состава пирокластического материала, поступавшего в процессе торфонакопления. В ходе исследования установлено, что пирокластический материал оказал существенное влияние на накопление группы литофильных редких металлов, в том числе аномально высоких содержаний РЗЭ, Zr, Hf, Nb, Y, Th.

Ключевые слова:

Уголь, тонштейны, геохимия, вулканогенная пирокластика, Минусинский бассейн.

Введение

Вулканогенный пепловый материал широко распространен в составе угленосных отложений Минусинского бассейна. Впервые на наличие вулканогенного материала в виде тонких прослоев туфов в углях Минусинского бассейна указывал В.М. Богомазов [1].

Впоследствии А.В. Ван при изучении Бейского и Изыхского разрезов Минусинского бассейна установил значительное количество пирокластического материала. В отложениях черногорской свиты бассейна пирокластический материал диагностирован в виде туфов и туффигов [2]. В работе И.Б. Волковой впервые для бассейна были описаны каолиновые прослои в угольных пластах под термином «тонштейны». В исследовании приводилось мнение о водоосадочном генезисе изученных тонштейнов [3]. Л.А. Адмакин провел детальные исследования тонштейнов Минусинского бассейна [4]. Исследования ограничили каолиновыми прослоями, выявленными в угольных пластах черногорской свиты – Гигант, Мощный, Великан. Л.А. Адмакин провел типизацию выявленных тонштейнов и изучил их минеральный состав, а также на основании петрографо-геохимических критериев установил, что тонштейны образовались из пирокластического материала кислого (риолитового) состава.

С.И. Арбузов и В.В. Ершов доказали, что пепловый материал сыграл значительную роль в обогащении углей Сибири редкими металлами [5]. На примере пластов Двухаршинного и Великан-I Черногорского ме-

сторождения было установлено, что вулканогенный материал способен формировать достаточно контрастные аномалии редких металлов в углях вблизи тонштейнов. Было установлено, что набор элементов, которыми обогащены вмещающие тонштейны угли, характерен для кислой или щелочной пирокластике [6].

В то же время о наличии в Минусинском бассейне тонштейнов, образовавшихся из пирокластике щелочного ряда, ранее не сообщалось.

Данная работа посвящена восстановлению состава пирокластического материала, послужившего источником для формирования тонштейнов, а также редких металлов, которыми обогащены угольные пласты черногорской свиты Черногорского месторождения

Геология региона

Минусинский каменноугольный бассейн расположен в южной части Центрально-Сибирского региона. В геологическом плане он приурочен к межгорному Минусинскому прогибу и ограничен с запада, востока и юга структурами Кузнецкого Алатау, Восточного и западного Саяна [7]. Угленосная формация бассейна представлена отложениями от нижнего карбона до верхней перми (рис. 1).

Строение угленосной толщи

Черногорское месторождение находится в северо-западной части Минусинского угольного бассейна. Оно является одним из основных промышленных ме-

сторождений бассейна. Продуктивная толща сложена ниже-верхнекаменноугольными отложениями от соленозерской свиты до нижних горизонтов белоярской включительно (рис. 1).

В черногорской свите выделяется две подсвиты. Нижняя представлена мощной пачкой песчаников, выше которой расположены алевролиты с прослоями песчаников, 12 угольными пластами и пропластками

[7]. Верхняя подсвита – самая угленасыщенная часть разреза продуктивной толщи и содержит промышленные запасы углей. Подсвита состоит из алевролитов с прослоями песчаников, линзами конгломератов, гравелитов. В разрезе отмечается значительное количество прослоев углистых аргиллитов и до 12–15 угольных пластов и пропластков. Мощность нижней подсвиты 90–110 м, верхней – 140–150 м [7].

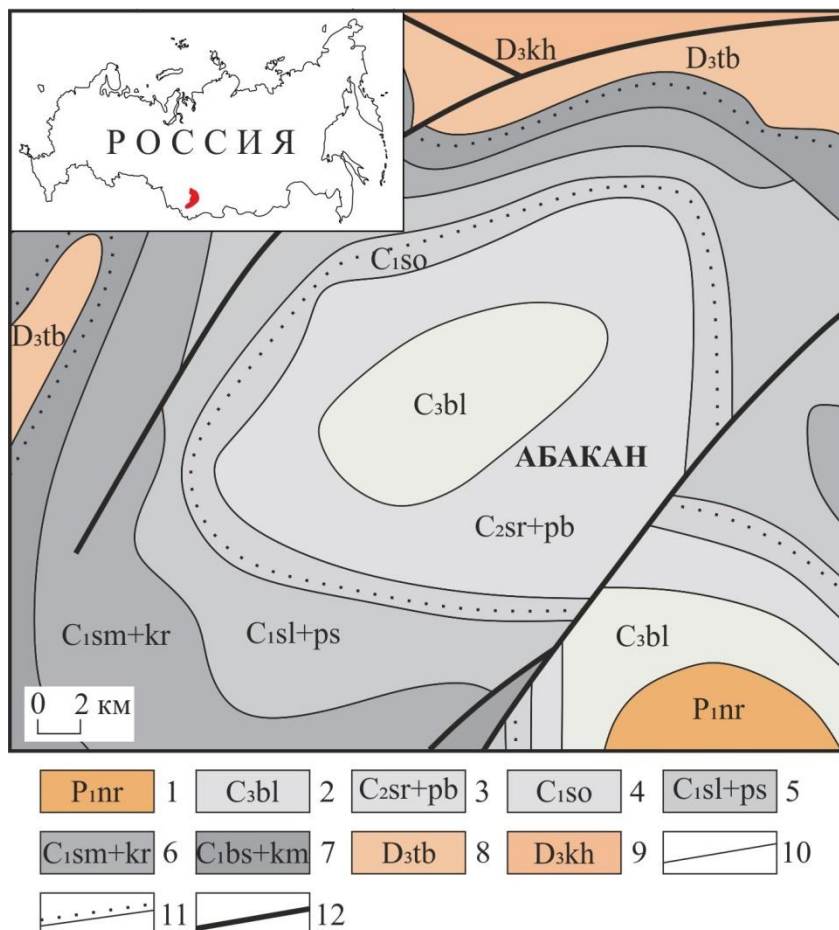


Рис. 1. Геологическая карта Черногорского месторождения [8]: 1 – пермские отложения: нарылковская свита; 2–7 – отложения карбонового возраста: 2 – белоярская свита, 3 – сарская, черногорская и побережная свиты объединенные, 4 – серпуховский ярус, соленозерская свита, 5 – визейский ярус, соломенская, ямкинская, байновская свиты объединенные, 6 – турнейский ярус, самохвальская и кривинская свиты объединенные, 7 – быстринская, алтайская и камышитинская свиты объединенные; 8, 9 – отложения девонского возраста: 8 – фаменинский ярус, тубинская свита, 9 – франкийский ярус, кохайская свита; 10, 11 – геологические границы: 10 – согласного залегания, 11 – несогласного залегания; 12 – разрывные нарушения

Fig. 1. Geological map of the Chernogorskoye deposit [8]: 1 – Permian sediments: Narylkovskaya suite; 2–7 – Carboniferous sediments: 2 – Beloyarskaya suite, 3 – Sarskaya, Chernogorskaya and Poberezhnaya combined suites, 4 – Serpukhovian stage, Solenoozerskaya suite, 5 – Vizean stage, Solomenskaya, Yamkinskaya, Baynovskaya combined suites, 6 – Tournaisian stage, Samokhvalskaya and Krivinskaya combined suites, 7 – Bystryanskaya, Altayskaya and Kamyshtinskaya combined suites; 8, 9 – Devonian sediments: 8 – Famennian stage, Tubinskaya suite, 9 – Frasnian stage, Kokhayskaya suite; 10, 11 – geologic boundaries: 10 – concordant bedding, 11 – discordant bedding; 12 – faults

Продуктивная толща содержит 48–50 угольных пластов и пропластков, из них 10 промышленного значения. Наибольшую промышленную ценность представляют пласты Великан-I-II, Мощный, Новый, Двухаршинный, Совхозный.

Максимальную угленасыщенность имеет черногорская свита. Она содержит 22 угольных пласта и

пропластка общей мощностью 26–30 м. В верхнечерногорской подсвите расположены рабочие пласты угля (рис. 2). Они группируются по трем основным горизонтам: нижний горизонт сложен угольными пластами Гигант-I-III, с междупластиями, выполненными алевролитами или мелкозернистыми песчаниками. Средний охватывает серию сближенных пластов

угля – Мощный, Безымянный, Великан-I-II, переслаивающихся с углистыми аргиллитами, алевролитами и единичными прослоями песчаников. Третий горизонт охватывает интервал от почвы пласта Двухаршинный до кровли пласта Непостоянный и представлен чередующимися алевролитами и песчаниками [7].

Положение тонштейнов в угольных пластах

В ходе полевых исследований в угольных отложениях черногорской свиты Черногорского месторождения диагностировано 25 тонштейнов. Характерной особенностью таких породных прослоев является четкий контакт с вмещающим углем, а также светло-серая окраска прослоев на фоне темного угля. Благодаря этим особенностям тонштейны легко выявить при визуальной диагностике разрезов угольных пластов. Мощность выявленных тонштейнов составила от 0,3–6 см. При идентификации угольных пластов Гигант-I и Великан-II используются тонштейны, являющиеся реперными для данных пластов. На рис. 3 приведена схема расположения тонштейнов в угольных пластах Черногорского месторождения.

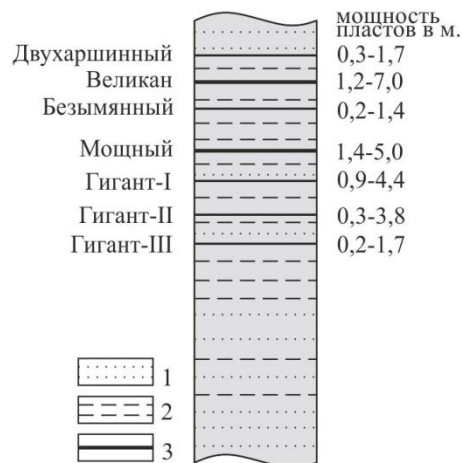


Рис. 2. Схема размещения угольных пластов в разрезе угленосных отложений Черногорского месторождения: 1 – песчаники; 2 – алевролиты, аргиллиты; 3 – уголь

Fig. 2. Layout of coal seams in the section of coal-bearing deposits of the Chernogorskoe field: 1 – sandstones; 2 – aleurolite, argillite; 3 – coal

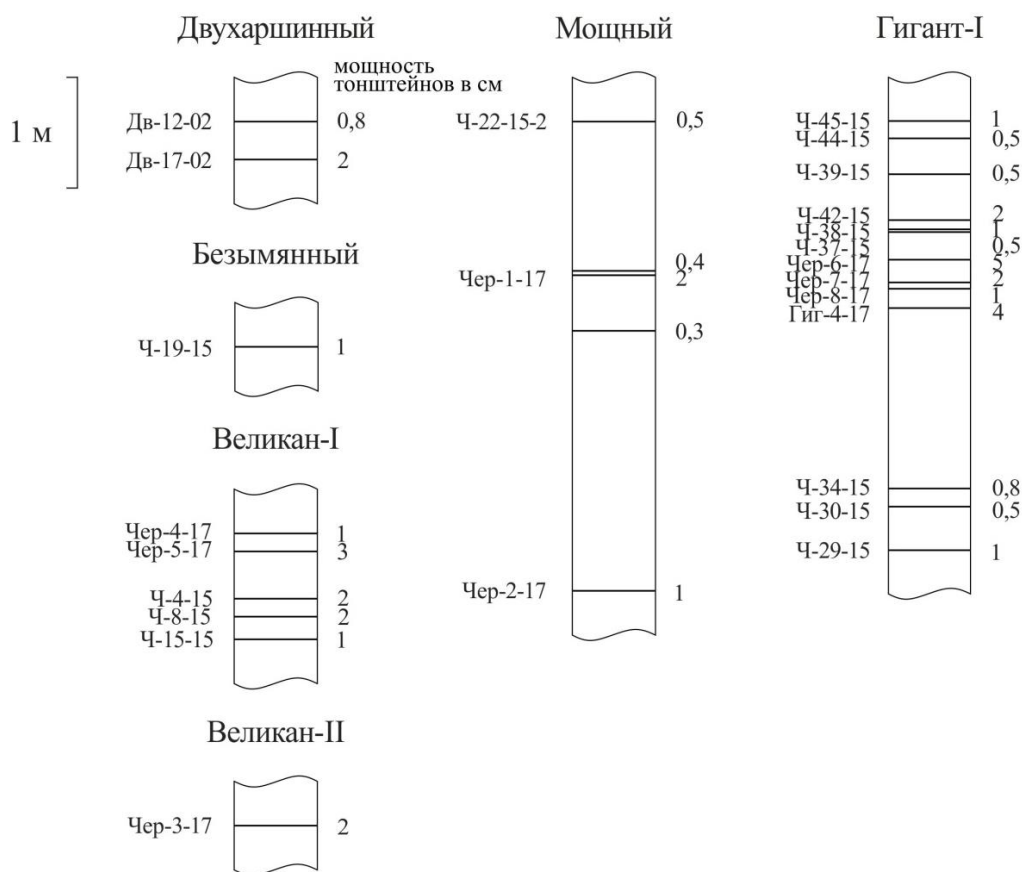


Рис. 3. Схема размещения тонштейнов в угольных пластах Черногорского месторождения

Fig. 3. Layout of tonsteins in the coal beds of the Chernogorskoe deposit

Методы исследования

Материалом для исследования послужили тонштейны и вмещающие их угли черногорской свиты Черногорского месторождения Минусинского бассейна. Для исследования было отобрано 25 тонштей-

нов мощностью от 0,3 до 6 см. Отдельные породные прослои опробованы в нескольких сечениях для выявления латеральной изменчивости минерального и химического состава.

Для изучения характера распределения минералов в тонштейнах, анализа их текстурно-структурных

особенностей выполнено петрографическое изучение шлифов. Диагностика состава глинистого вещества тонштейнов проводилась с помощью рентгенофазового анализа на порошковом дифрактометре Bruker D2 Phaser в Международном инновационном научно-образовательном центре (МИНОЦ) «Урановая геология» в отделении геологии ТПУ (исполнитель А.В. Вергунов) и в лаборатории седиментологии АО «ТомскНИПИнефть» с использованием рентгеновского дифрактометра RIGAKU Ultima IV с реализацией съемки рентгенограмм в геометрии Брегга-Брентано (исполнитель Ю.М. Лопушняк).

Определение элементного состава тонштейнов и вмещающих их углей произведено с применением нейтронно-активационного анализа (ИНАА), масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS), атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-AES) и рентгенофлуоресцентного анализа (РФА).

ИНАА проводился в ядерно-геохимической лаборатории МИНОЦ «Урановая геология» на базе исследовательского ядерного реактора ИРТ-Т НИ ТПУ (аналитик А.Ф. Судыко).

ICP-MS и ICP-AES выполнен в аналитическом центре ДВГИ ДВО РАН, г. Владивосток (аналитик Н.В. Зарубина) и в химико-аналитическом центре «Плазма», г. Томск (аналитик Н.В. Федюнина).

Анализ состава петрогенных элементов тонштейнов и золы угля выполнен РФА в лаборатории рентгеноспектральных методов анализа ИГМ СО РАН, г. Новосибирск (аналитик Н.Г. Карманова). Все лаборатории аккредитованы в системе аккредитации аналитических лабораторий Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии.

Определение содержания ртути в образцах выполнено методом беспламенной абсорбции на приборе РА-915+ с пиролитической приставкой ПИРО-915 (метод пиролиза).

Изучение микроминеральных форм элементов в образцах производилось на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N в МИНОЦ «Урановая геология» в отделении геологии ТПУ. Состав включений устанавливался с помощью энерго-дисперсионного спектрометра Bruker XFlash 4010/5010 для проведения рентгеноспектрального анализа.

Минеральный состав тонштейнов

В результате исследования было установлено, что основным пороодообразующим минералом тонштейнов Черногорского месторождения является каолинит (56–57 %). В образцах он представлен преимущественно в виде скрытокристаллической основной массы, псевдоморфоз по слюдам и полевым шпатам, а также в виде кристаллов. В составе тонштейнов также присутствуют кварц, апатит, гоацит, полевые шпаты.

Присутствие апатита, а также высокие концентрации минералов гоацит-горсейскит-крандаллит-флоренсит являются свидетельством вулканического вклада при формировании породы [9–12]. Указанные минералы диагностировались в некоторых тонштейнах мира [13–15].

В составе изученных тонштейнов обнаружено наличие эпигенетических минералов, таких как сидерит, кальцит и хлорит.

Химический состав тонштейнов

По результатам анализа химического состава тонштейнов Черногорского месторождения установлено, что содержание SiO_2 в них изменяется от 17,94 до 61,38 % (табл. 1). Концентрация Al_2O_3 колеблется в пределах 19,03–43,61 %. Согласно данным показателям, изученные тонштейны можно условно разделить на две группы. К первой группе относятся прослой, близкие по составу к каолиниту, что выражается в обогащении их SiO_2 (45,77–61,38 %) и Al_2O_3 (33,76–43,61 %). Ко второй – тонштейны с малым содержанием SiO_2 (17,94–41,88 %) и Al_2O_3 (19,03–33,65 %). Тонштейны второй группы характеризуются повышенным содержанием Ca и P. Подобная закономерность и группировка тонштейнов была выявлена ранее для тонштейнов черногорской свиты Бейского месторождения Минусинского бассейна [16].

Значение алюмокремниевого модуля ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) для каолинита составляет 1,18. Для изученных прослоев отношение SiO_2 к Al_2O_3 изменяется от 0,94 до 1,82.

Величина титанового модуля ($\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) для изученных образцов изменяется в пределах 0,007–0,081. Такой диапазон отношения TiO_2 к Al_2O_3 характерен как для тонштейнов Минусинского бассейна [4, 16, 17], так и для тонштейнов мира [18, 19].

Величина титанового модуля успешно применяется при идентификации первичного состава пирокластического материала, из которого сформировались тонштейны. Согласно данным Д.А. Спирса и Р. Канариса-Сотириу [20], тонштейны, образованные из риолитовой пирокластике, характеризуются величиной $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ меньше 0,02, из основной – больше 0,06. Величина титанового модуля для пирокластике среднего и щелочного составов находится в пределах от 0,02 до 0,06. Согласно этим показателям, среди тонштейнов Черногорского месторождения можно выделить три группы прослоев. К первой группе относятся прослой с низким значением $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (0,007–0,020), ко второй – с промежуточным (0,023–0,048), к третьей – с высоким значением титанового модуля (0,061–0,081). Такой разброс величины титанового модуля может свидетельствовать о разнообразном составе исходной пирокластике, сформировавшей тонштейны.

По сравнению со средним составом глинистых сланцев изученные тонштейны в целом отличаются повышенным содержанием PЗЭ, Cu, Zn, Ga, As, Sr, Y, Zr, Nb, Sn, Ba, Hf, Ta, W, Hg, Pb, Th, U (табл. 2). В то же время концентрация микроэлементов в тонштейнах Черногорского месторождения неоднородна, что объясняется различным составом исходной пирокластике.

Для идентификации состава пирокластического материала используется комплекс методов, основывающихся на малоподвижных в зоне гипергенеза химических элементах. Помимо титанового модуля, комплекс методов включает в себя диаграмму Дж.А. Винчестера и Р.А. Флойда ($\text{Nb}/\text{Y}-\text{Zr}/\text{TiO}_2$), нормирование PЗЭ, исследование содержания и соотношения радиоактивных элементов [23].

Таблица 1. Породообразующие оксиды (вес. %) в тонштейнах Черногорского месторождения

Table 1. Rock-forming oxides (wt. %) in tonsteins of the Chernogorskoe deposit

Оксид Oxide	ДВ-12-02	ДВ-17-02	Чер-4-17	Чер-5-17	Ч-4-15	Ч-8-15	Ч-15-15	Чер-3-17	Ч-22-15-2	Чер-1-17	Чер-2-17	Ч-45-15
SiO ₂	52,32	52,22	30,17	17,94	41,48	53,57	54,08	53,43	48,76	51,09	52,78	32,05
TiO ₂	0,29	1,15	1,29	0,56	1,09	0,80	1,56	1,25	0,63	1,40	0,85	0,23
Al ₂ O ₃	41,92	41,63	21,19	19,03	33,65	35,16	41,49	42,20	40,34	41,34	42,95	32,38
Fe ₂ O ₃	3,83	0,36	5,00	15,12	9,15	3,83	0,58	0,52	1,06	4,31	1,28	1,58
MnO	0,10	0,01	0,15	0,32	0,16	0,05	0,01	0,01	0,01	0,08	0,01	0,02
MgO	0,88	0,20	7,41	11,62	5,14	2,01	0,38	0,37	0,43	0,34	0,35	0,56
CaO	0,25	2,03	25,55	28,40	7,19	1,93	0,42	0,42	4,53	0,28	0,18	15,00
Na ₂ O	0,15	0,42	0,16	0,16	0,13	0,42	0,17	0,24	0,32	0,24	0,23	0,37
K ₂ O	0,09	0,14	0,29	0,05	0,28	0,84	0,35	0,30	0,16	0,21	0,22	0,30
P ₂ O ₅	0,09	1,58	8,47	6,55	0,17	0,09	0,23	0,28	2,88	0,12	0,20	14,90
ППП/LOI	46,48	25,34	24,04	37,10	25,78	19,45	22,53	25,24	50,08	26,73	30,84	35,69
Сумма/Sum	99,92	99,73	99,68	99,78	98,42	98,71	99,26	99,02	99,15	99,39	99,03	97,39
TiO ₂ /Al ₂ O ₃	0,007	0,028	0,061	0,029	0,032	0,023	0,037	0,030	0,016	0,034	0,020	0,007
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	1,25	1,25	1,42	0,94	1,23	1,52	1,30	1,27	1,21	1,24	1,23	0,99
Оксид Oxide	Ч-44-15	Ч-39-15	Ч-42-15	Чер-6-17	Чер-7-17	Чер-8-17	Гиг-4-17	Ч-38-15	Ч-34-15	Ч-30-15	Ч-29-15	
SiO ₂	55,72	61,38	56,51	56,48	52,98	54,98	53,54	41,88	51,06	53,08	51,86	
TiO ₂	0,35	0,49	0,39	1,90	0,82	0,31	1,03	2,69	1,32	0,50	3,21	
Al ₂ O ₃	34,61	33,76	38,62	39,28	43,07	42,77	43,61	33,33	42,16	43,61	42,04	
Fe ₂ O ₃	5,59	1,84	1,88	0,67	1,16	0,45	0,79	2,47	1,58	1,01	1,06	
MnO	0,04	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,02	0,01	0,02	0,01	
MgO	1,95	1,07	0,79	0,15	0,34	0,16	0,25	0,43	0,48	0,35	0,34	
CaO	0,46	0,15	0,21	0,10	0,14	0,11	0,15	10,90	1,35	0,32	0,30	
Na ₂ O	0,57	0,41	0,24	0,23	0,26	0,25	0,25	0,60	0,35	0,46	0,31	
K ₂ O	0,50	0,79	0,49	0,15	0,26	0,25	0,17	0,17	0,14	0,18	0,19	
P ₂ O ₅	0,06	0,05	0,05	0,09	0,07	0,05	0,12	6,34	0,77	0,06	0,11	
ППП/LOI	49,83	30,21	25,47	25,31	28,09	28,12	29,83	68,11	40,81	57,64	35,24	
Сумма/Sum	99,86	99,96	99,20	99,08	99,09	99,33	99,90	98,83	99,21	99,59	99,43	
TiO ₂ /Al ₂ O ₃	0,010	0,015	0,010	0,048	0,019	0,007	0,024	0,081	0,031	0,012	0,076	
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	1,61	1,82	1,46	1,44	1,23	1,29	1,23	1,26	1,21	1,22	1,23	

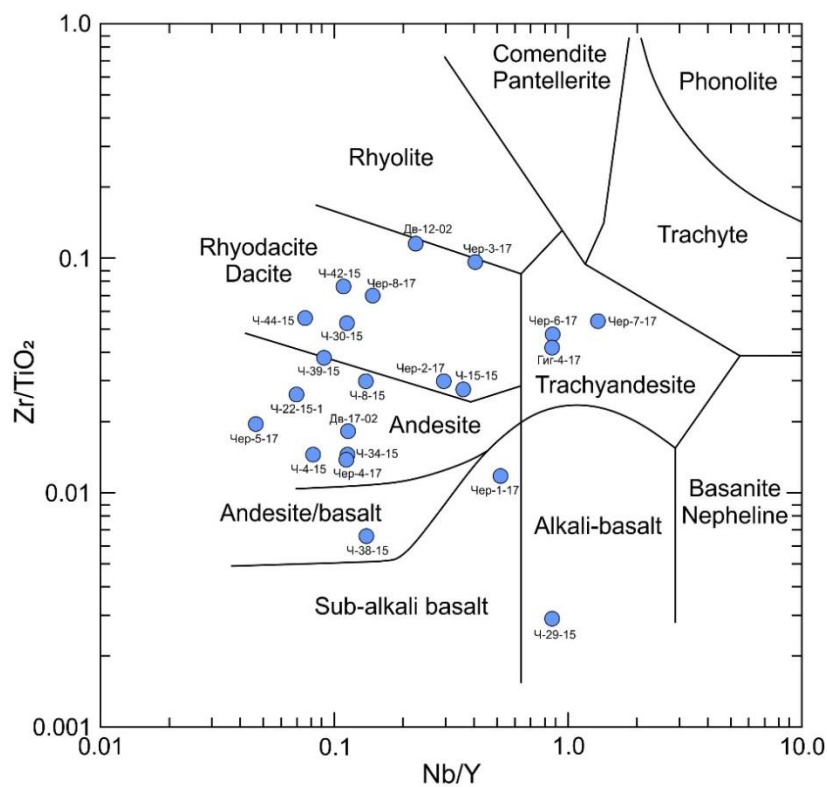


Рис. 4. Классификационная диаграмма тонштейнов Черногорского месторождения [24]

Fig. 4. Discriminant diagram of tonsteins of the Chernogorskoe deposit [24]

Таблица 2. Содержание химических элементов в тонштейнах Черногорского месторождения, г/т

Table 2. Content of chemical elements in the Chernogorskoe deposit, ppm

Элементы Elements	Кларк глинистых сланцев [21] Clark for shales [21]	риодацит rhyodacite				андезит andesite	базальт basalt	щелочные alkaline			
		ДВ-12-02	Ч-42-15	Чер-8-17	Ч-30-15	Чер-4-17	Ч-29-15	Ч-4-15	Ч-8-15	Ч-15-15	ДВ-17-02
Be	2,8	1,47	0,53	0,59	1,48	2,26	0,28	1,02	1,29	1,01	1,17
Sc	15	1,19	3,13	3,4	13,3	48,9	12,8	9,74	7,83	9,31	3,83
V	120	6,2	16,8	6,67	14,2	84,2	20,2	6,54	26,2	17,8	7,97
Cr	76	35,5	37,6	15,8	22	45	14,2	13,9	47,1	23,2	21,5
Co	19	16,6	2,55	1,01	1,81	36,7	1,31	3,96	5,52	2,47	5,9
Ni	47	41,2	13,3	10,9	24,3	84,3	8,26	14,9	42,7	33,8	76,6
Cu	36	–	–	45,6	92,3	50,5	49,6	–	–	–	–
Zn	52	33,2	19,8	11,5	38,8	94,2	50	83,1	204	59,3	21,5
Ga	16	45,4	25,4	29,8	29	19,2	39,1	21,6	28,2	61,4	48,4
As	9	–	3,7	1,4	2,42	20,5	0,72	20,4	14,7	28,7	–
Rb	130	3,17	15,5	6,99	4,91	5,44	5,09	5,4	20,6	7,7	3,46
Sr	240	98	61	65	195	1367	142	152	76	144	865
Y	31	8,4	29,1	24,3	21,2	92,5	9,8	61,3	54	79,6	48,9
Zr	190	206	177	129	161	109	56	95	143	258	126
Nb	11	1,86	3,14	3,53	2,38	10,37	8,26	4,93	7,26	28,1	5,55
Mo	1,6	2,37	1,14	–	1,6	2,73	1,09	1,18	1,29	1,61	1,83
Cd	1	0,52	1,01	0,47	0,81	0,33	0,81	0,43	0,9	1,51	0,68
Sn	3,5	9,8	3,21	10,38	5,12	1,58	3,12	4,75	5,62	5,93	5,63
Sb	1	–	0,3	0,51	0,18	0,98	0,04	0,33	0,62	0,17	–
Cs	10	0,17	1,96	2,53	1	0,13	0,32	0,23	0,96	0,32	0,2
Ba	460	162	178	208	474	698	721	1278	425	442	614
La	48	8,6	98	44,8	22,9	57,9	5,1	119	103	84,3	65,7
Ce	75	26,7	166	102	108	104	19	250	215	181	118
Pr	10	3,1	17,2	11,27	15,1	11,8	2,45	29,8	24,9	21,5	13,1
Nd	36	14,8	60,5	41,6	66,6	47,1	11,8	112	85,1	85,3	46,7
Sm	8	4,1	9,92	8,13	12,4	9,18	3,4	20,6	16,8	18,3	11,1
Eu	1,2	0,54	1,67	1,01	2,18	3,03	0,71	2,19	2,45	3,62	1,86
Gd	5,8	3	8,41	7,08	10,6	12	2,68	17,3	14,7	18,1	11,9
Tb	0,8	0,45	1,04	0,89	1,05	1,92	0,37	2,33	2,11	2,56	1,69
Dy	4,4	2,49	5,74	5,64	5,94	11,9	2,28	11,6	11,4	16,4	7,63
Ho	0,7	0,32	1,12	1,07	1,14	2,55	0,34	2,42	2,14	3,32	1,63
Er	1,9	1,11	3	3,18	2,41	7,31	1,57	6,56	5,51	7,53	3,81
Tm	0,6	0,16	0,39	0,45	0,38	0,93	0,2	0,86	0,87	1,07	0,49
Yb	2,5	1,05	2,74	3,13	2,1	5,39	1,25	5,13	5,35	7,23	2,76
Lu	0,4	0,15	0,36	0,43	0,32	0,8	0,19	0,8	0,74	1,01	0,45
Hf	5	6,8	5,2	5	6,5	4,2	2,6	3,5	4,9	11,4	3,7
Ta	1,4	3,4	1,5	0,5	1,7	0,02	1,3	2,7	2	5,2	2,1
W	2,6	1,15	2,14	1,99	1,44	0,99	2,23	1,97	1,88	2,98	3,79
Au	0,0065	–	0,0287	33,7	0,0349	0,0017	0,0326	0,0329	0,0171	0,0084	–
Hg, ppb	89	967	418	20	–	94	51	175	431	77	753
Pb	14	29,3	31,5	17,8	39	17,3	9,4	38,6	88,7	21,8	19,7
Th	10	148	23,8	18,4	20,6	7	6,6	21,7	26,7	26,9	26,1
U	4,5	4,1	8,6	7,6	3,3	2,3	1,6	5,5	6,6	11,1	1,7
∑РЗЭ	195	67	376	230	251	276	51	582	490	451	287
Th/U	2,2	35,7	2,8	2,4	6,3	3	4,2	4	4	2,4	15,2
Eu/Eu*	–	0,47	0,56	0,41	0,58	0,88	0,72	0,35	0,48	0,61	0,5

значение (value) $Eu/Eu^ = Eu_N / [(Sm_N)(Gd_N)^{1/2}]$ по (according to) [22].

Как видно на рис. 4, большинство образцов тонштейнов Черногорского месторождения занимают поля классификационной диаграммы, соответствующие риодацитам и андезитам. К полно трахиандезитов относятся три образца. Использование диаграммы имеет ограничения, так как элементы, на отношении которых основана диаграмма, имеют различную подвижность в условиях палеоболота. Так, ниобий и цирконий в процессе преобразования пеплового материала выносятся значительно, чем титан и иттрий. Корректировки данных с учетом выносимого вещества из прошлая в уголь показывают, что результаты

интерпретации для исследованных проб смещаются в сторону возрастания щелочности и кислотности [23].

Дополнительным критерием восстановления состава пеллов является нормирование РЗЭ. На рис. 5, а показаны графики нормирования РЗЭ на хондрит для тонштейнов Черногорского месторождения. Нормированные на хондрит графики распределения РЗЭ для большинства изученных образцов характеризуются отчетливой отрицательной европиевой аномалией. Ее величина варьирует в пределах 0,35–0,65. На кривых распределения РЗЭ отмечается преобладание легких РЗЭ над тяжелыми. Подобные графики распределе-

ния с отрицательной европиевой аномалией характерны для пирокластике кислого состава.

Среди изученных тонштейнов выделены разности, нормированные графики которых имеют сложную конфигурацию со слабо выраженной отрицательной

европиевой аномалией (рис. 5, б). Такие графики распределения могут свидетельствовать о вкладе пирокластического материала среднего или основного состава при формировании прослоя.

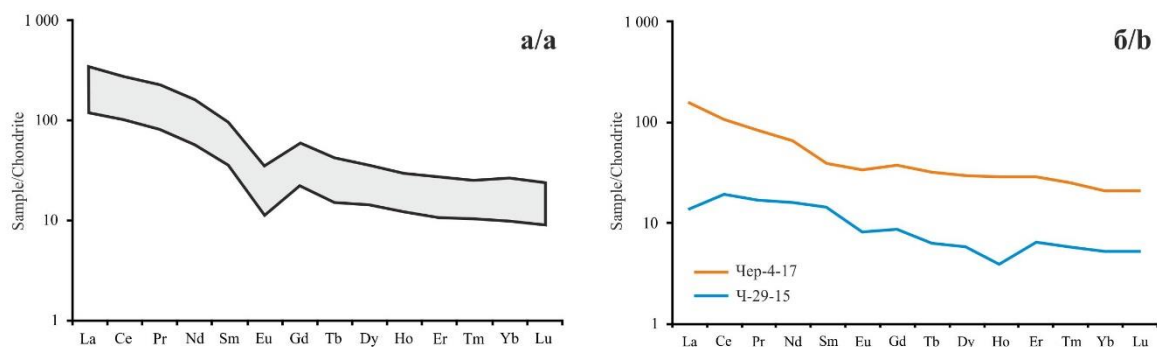


Рис. 5. Нормированные графики распределения РЗЭ в тонштейнах Черногорского месторождения: а) тонштейны кислого состава; б) тонштейны среднего и основного состава. Нормировано на хондрит [25]

Fig. 5. Chondrite-normalized REE patterns in tonsteins of the Chernogorskoe deposit: а) felsics tonsteins; б) intermediate and mafics tonsteins. Chondrite data from [25]

Обсуждение результатов

Наибольшее распространение в угольных пластах Черногорского месторождения имеют тонштейны, которые образовались с участием пирокластике кислого состава. Для таких прослоев характерны высокие концентрации тория. В связи с тем, что этот элемент отличается низкой миграционной способностью в зоне гипергенеза, его концентрация в тонштейнах сопоставима с исходными породами. В то же время с высокой концентрацией Th связана повышенная радиоактивность прослоев. Она регистрируется при гамма-каротаже, а также при применении малогабаритного радиометрического оборудования в горных выработках. Еще одной отличительной особенностью тонштейнов, сформированных из пеплов кислого состава, является низкое значение титанового модуля. В большинстве случаев такие тонштейны соответствуют полям риолитов, риодацитов на диаграмме Винчестера и Флойда. На графиках распределения РЗЭ, нормированных на хондрит, отмечается ярко выраженная отрицательная европиевая аномалия.

Среди изученных тонштейнов были выделены разности, образованные из пирокластике щелочного ряда. Для таких пород характерна высокая концентрация Y, Zr, Nb, Hf, Ta, Th, РЗЭ. Они характеризуются повышенным значением титанового модуля по сравнению с породами кислого состава. Графики распределения РЗЭ, нормированных на хондрит, характеризуются отрицательной европиевой аномалией. Классификационная диаграмма Винчестера и Флойда применима для таких пород не во всех случаях. Иногда среди тонштейнов, образованных из пирокластике щелочного ряда, диагностируются разности с высокой концентрацией P, Sr, и Ba, а в их минеральном составе присутствуют фосфаты (апатит, гоэцит). Так, в угольном пласте Двухаршинный диагностировано два тонштейна (Дв-12-02, Дв-17-02). Тонштейн Дв-12-02 образовался из пирокластике риолитового со-

става. Концентрация тория в породном прослое составляет 68 г/т, а в золе угля на контакте с тонштейном – 99 г/т над и 269 г/т под прослоем. Концентрация РЗЭ в тонштейне – 67 г/т, в золе угля над прослоем – 0,24 %, под ним – 0,07 %. Содержание циркония в золе угля, вмещающего прослой, составляет 942–1330 г/т (рис. 6). Тонштейн Дв-17-02 сформировался при участии пирокластике кислого состава щелочного ряда. Данный прослой имеет меньшую концентрацию тория – 26 г/т, а зола угля, вмещающего тонштейн, также имеет меньшие его концентрации, чем зола угля на контакте с тонштейном Дв-12-02. Однако значение суммы РЗЭ в прослое достигает 287 г/т, а в золе под прослоем – 0,38 %. Концентрация циркония в золе угля непосредственно на контакте с тонштейном составляет 0,2 %, а на удалении от прослоя (2 см) увеличивается до 0,4 %. Схема накопления ниобия в золе угля такая же, как и циркония. Наибольшие значения достигают 170 г/т (рис. 6). В углях раннепермского возраста Кузнецкого и Минусинского бассейна известны редкометалльно-угольные месторождения, связанные с пирокластикой кислого состава щелочного ряда [26, 27].

Наличие высокой концентрации тория для риолитовой пирокластике и более значительное накопление РЗЭ, Zr и Nb для кислой пирокластике щелочного ряда может служить индикатором при восстановлении исходного состава тонштейнов, а также для выявления пеплового материала в угле, представленного в рассеянном виде.

Тонштейны в месторождении представлены также разностями среднего и основного состава. Такие разности характеризуются высоким значением титанового модуля, а на классификационной диаграмме Zr/TiO₂-Nb/Y занимают поля андезитов, базальтов. Для таких тонштейнов характерна относительно низкая концентрация Th – 8 г/т. Отличительной чертой является кривая распределения РЗЭ, нормированных

на хондрит. Нормированные кривые таких разновидностей тонштейнов характеризуются незначительным преобладанием легких РЗЭ над тяжелыми и отсутствием отрицательной Eu аномалии.

В пласте Великан-I выявлено три тонштейна (Ч-4-15, Ч-8-15, Ч-15-15). Они расположены на близком рас-

стоянии друг от друга и образуют пачку. Эти прослои сформировались из кислой пирокластике. Зола углей, находящихся на контакте с указанными тонштейнами, характеризуется аномально высоким содержанием РЗЭ – 0,16 %, Ga – 929 г/т, Y – 568 г/т, Zr – 2,5 %, Nb – 0,1 %, Hf – 615 г/т, Ta – 75 г/т, Th – 87 г/т, U – 93 г/т.

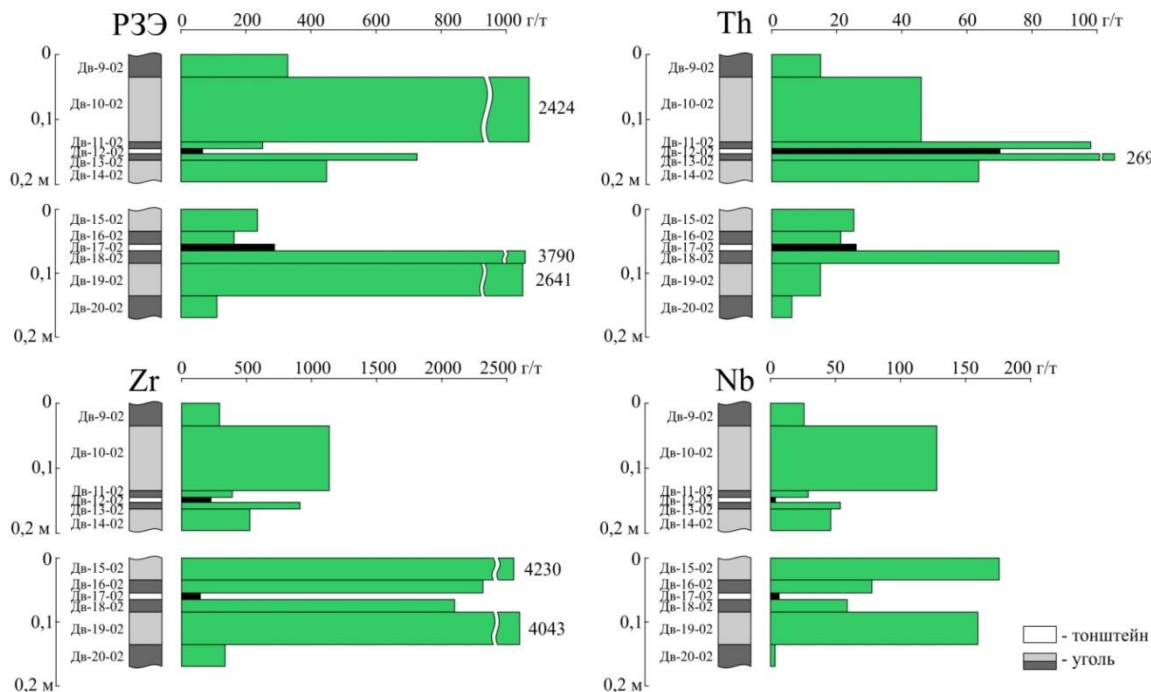


Рис. 6. Распределение РЗЭ, Th, Zr, Nb в золе угля в вертикальном разрезе пласта Двухаршинный
Fig. 6. REE, Th, Zr, Nb distribution in coal ash in a vertical cross-section of the Dvukharshinny seam

Для пласта Гигант отмечено наличие наибольшего числа тонштейнов из всех пластов черногорской свиты данного месторождения. Тонштейн Ч-42-15 образовался из пирокластике кислого состава. Зола угля на контакте с этим прослоем обогащена РЗЭ – 706 г/т, Ga – 424 г/т, Y – 338 г/т, Zr – 0,4 %, Nb – 335 г/т, Hf – 109 г/т, Ta – 30 г/т, Th – 396 г/т, U – 165 г/т. Тонштейны Ч-34-15 и Ч-30-15 также сформировались из кислой пирокластике. Они находятся на небольшом расстоянии друг от друга (15 см), а зола угля, находяще-

гося между ними, характеризуется аномально высокими концентрациями РЗЭ – 0,2 %, Ga – 204 г/т, Y – 187 г/т, Zr – 0,4 %, Nb – 170 г/т, Hf – 107 г/т, Ta – 4 г/т, Th – 80 г/т, U – 39 г/т.

При исследованиях микроминерального состава тонштейнов встречаются кристаллы цирконов, иногда со следами коррозии [16]. РЗЭ встречаются в форме агрегатов и отдельных кристаллов, подверженных растворению. Такие образования обогащены РЗЭ, Th и P (рис. 7).

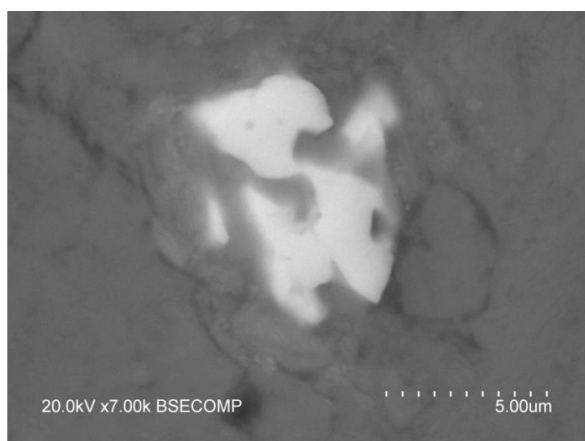
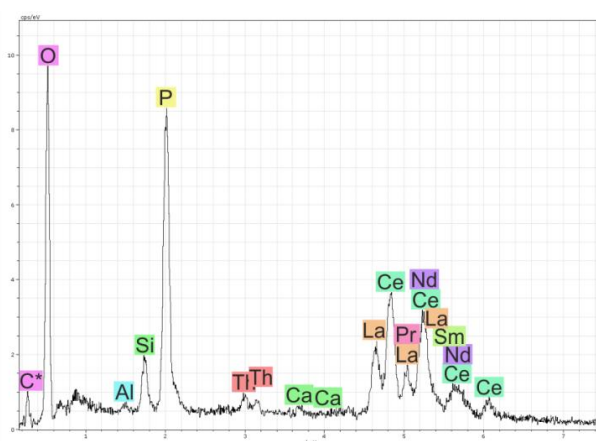


Рис. 7. Фосфат РЗЭ в тонштейне
Fig. 7. REE phosphate in tonstein



Торий в тонштейнах встречается в составе фосфатов (рис. 8). Формы минералов, подверженных выщелачиванию, которые диагностируются в составе тон-

штейнов, свидетельствуют о перераспределении вещества из пеплового прослоя во вмещающее пространство.

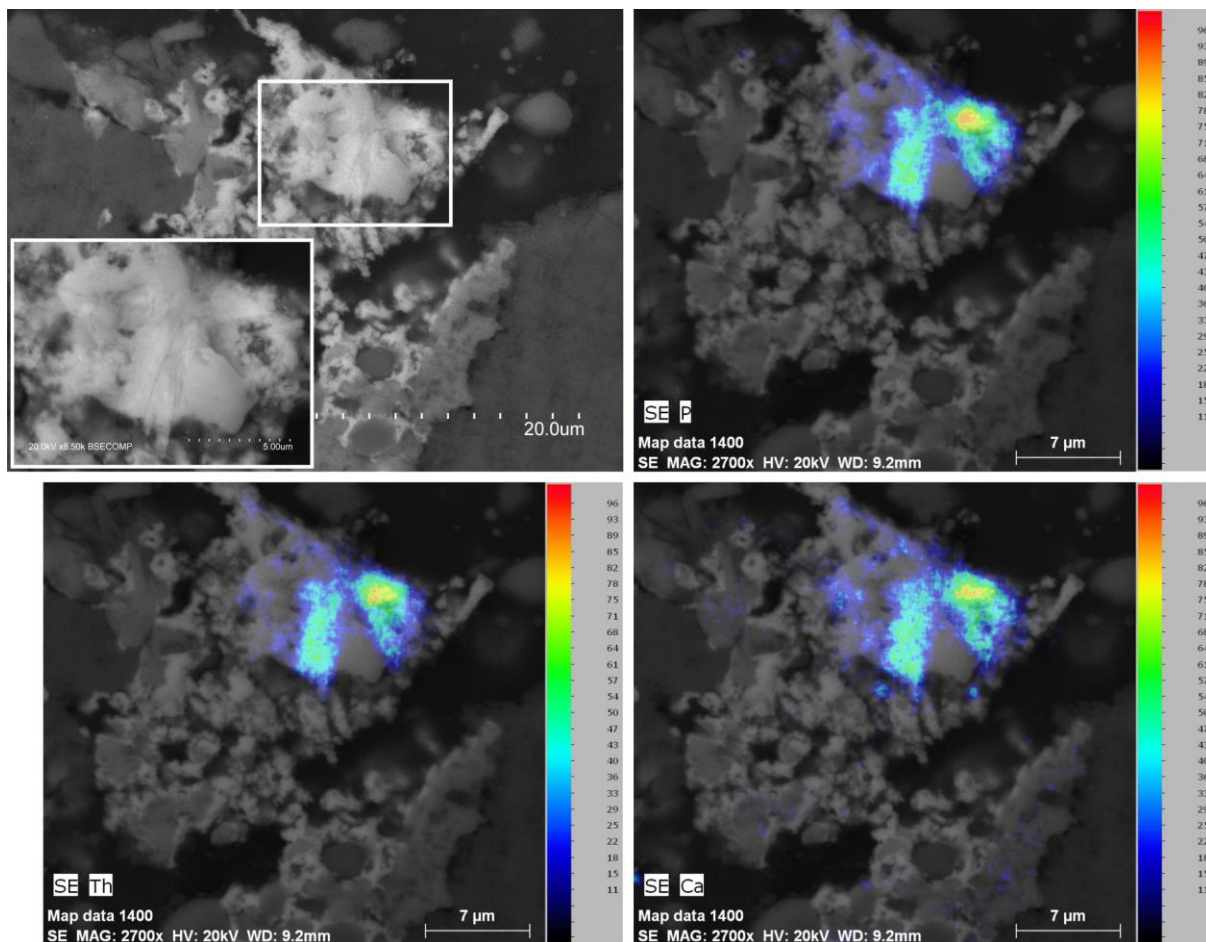


Рис. 8. Фосфат тория в тонштейне
Fig. 8. Thorium phosphate in tonstein

Используя минералого-геохимические особенности тонштейнов, обнаруженных в пластах Черногорского месторождения, можно восстановить цикличность изменения состава пеплового материала, поступавшего в палеоболотную среду. Нижняя часть пласта Гигант характеризуется наличием пеплового материала среднего состава, щелочность которого возрастает вверх по разрезу. Затем состав пироклаستيки изменяется до кислого, также с повышением щелочности в верхней части пласта.

В пласте Мощный, находящемся выше по разрезу, отмечается наличие кислой пироклаستيки, состав которой вверх по разрезу изменяется до среднего, а также характеризуется повышенной щелочностью.

В вышележащем пласте Великан наблюдается наличие пеплов кислого состава щелочного ряда, со снижением щелочности вверх по разрезу. В верхней части пласта состав пироклаستيки изменяется до среднего. Угольные пласты, лежащие выше (Безмянный, Двухаршинный) и в некоторых случаях имеющие следы повышенной щелочности, характеризуются наличием пеплов кислого состава.

Заключение

В ходе исследования было установлено, что тонштейны Черногорского месторождения обладают минералого-геохимическими особенностями, свидетельствующими об их вулканогенной апопепловой природе. Каолинит является преобладающим минералом в составе изученных тонштейнов. В меньшем количестве встречаются кварц, полевые шпаты, фосфаты.

С использованием комплекса критериев удалось восстановить состав исходного пирокластического материала, из которого были сформированы тонштейны. Большинство изученных тонштейнов являются продуктами преобразования кислой пироклаستيки. Среди этих прослоев выявлены разности щелочного ряда. В малой степени распространены тонштейны, образовавшиеся из пеплов среднего и основного составов.

Исследования показали, что с пирокластическим материалом в углях Черногорского месторождения связано накопление группы литофильных редких металлов, в том числе аномально высокие содержания РЗЭ, Zr, Hf, Nb, Y, Th.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-90010.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богомазов В.М. Стратиграфия и условия образования доугленосных и угленосных отложений карбона и перми Минусинского бассейна // Вопросы геологии угленосных отложений азиатской части СССР. – М.; Л.: Изд-во Академии наук СССР, 1961. – С. 79–116.
2. Ван А.В. Вулканогенный пепел в угленосных отложениях верхнего палеозоя Средней Сибири // Литология и полезные ископаемые. – 1972. – № 1. – С. 40–51.
3. Волкова И.Б. Тонштейны в угольных пластах Минусинского бассейна // Угольные бассейны и условия их формирования: Тез. докладов VI Всесоюз. геол. угольн. совещ. – Львов, 1980. – С. 121–122.
4. Адмакин Л.А. Типы тонштейнов в угольных пластах Минусинского бассейна // Литология и полезные ископаемые. – 1992. – № 2. – С. 49–56.
5. Арбузов С.И., Ершов В.В. Геохимия редких элементов в углях Сибири. – Томск: ИД «Д-Принт», 2007. – 468 с.
6. Comments on the geochemistry of rare-earth elements (La, Ce, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu) with examples from coals of north Asia (Siberia, Russian Far East, North China, Mongolia, and Kazakhstan) / S.I. Arbuзов, I.Y. Chekryzhov, R.B. Finkelman, Y.Z. Sun, C.L. Zhao, S.S. P'enok, M.G. Blokhin, N.V. Zarubina // International Journal of Coal Geology. – 2019. – V. 206. – P. 106–120.
7. Угольная база России. Т. 3. Угольные бассейны и месторождения Восточной Сибири. – М.: ООО «Геонформцентр», 2002. – 488 с.
8. Государственная геологическая карта РФ. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Алтае-Саянская. Лист N46 – Абакан. – СПб.: Картофабрика Всероссийского научно-исследовательского геологического института, 2008.
9. Geologic setting and characterization of coals and the modes of occurrence of selected elements from the Franklin coal zone, Puget Group, John Henry No. 1 mine, King County, Washington, USA / M.E. Brownfield, R.H. Affolter, J.D. Cathcart, S.Y. Johnson, I.K. Brownfield, C.A. Rice // International Journal of Coal Geology. – 2005. – V. 63. – P. 247–275.
10. A preliminary study of mineralogy and geochemistry of four coal samples from northern Iran / F. Goodarzi, H. Sanei, L.D. Stasiuk, H. Bagheri-Sadeghi, J. Reyes // International Journal of Coal Geology. – 2006. – V. 65. – P. 35–50.
11. Mardon S.M., Hower J.C. Impact of coal properties on coal combustion by-product quality: examples from a Kentucky power plant // International Journal of Coal Geology. – 2004. – V. 59. – P. 153–169.
12. Mineralogy of the volcanic influenced Great Northern coal seam in the Sydney Basin, Australia / L. Zhao, C.R. Ward, D. French, I.T. Graham // International Journal of Coal Geology. – 2012. – V. 94. – P. 94–110.
13. Spears D.A., Duff P.McL.D., Caine P.M. The West Waterberg tonstein, South Africa // International Journal of Coal Geology. – 1988. – V. 9. – P. 221–233.
14. Bohor B.F., Triplehorn D.M. Altered volcanic ash layers in coal bearing sequences // Tonsteins: altered volcanic ash layers in coal-bearing sequences. – 1993. – V. 285 (Special Paper). – 42 p.
15. Rao P.D., Walsh D.E. Nature and distribution of phosphorus minerals in Cook Inlet coals, Alaska // International Journal of Coal Geology. – 1997. – V. 33. – P. 19–42.
16. Вергунов А.В., Арбузов С.И., Соболенко В.М. Минералогия и геохимия тонштейнов в углях Бейского месторождения Минусинского бассейна // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 2. – С. 155–166.
17. An unusual occurrence of ferroan magnesite in a tonstein from the Minusinsk Basin in Siberia, Russia / L.N. Thompson, R.B. Finkelman, S.I. Arbuзов, D.H. French // Chemical Geology. – 2021. – V. 568. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120131> (дата обращения 15.05.2021).
18. Altered volcanic ashes in coal and coal-bearing sequences: a review of their nature and significance / S. Dai, C.R. Ward, I.T. Graham, D. French, J.C. Hower, L. Zhao, X. Wang // Earth-Science Reviews. – 2017. – V. 175. – P. 44–74.
19. Spears D.A., Arbuзов S.I. A geochemical and mineralogical update on two major tonsteins in the UK Carboniferous Coal Measures // International Journal of Coal Geology. – 2019. – V. 210. URL: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2019.05.006> (дата обращения 15.05.2021).
20. Spears D.A., Kanaris-Sotiriou R. A geochemical and mineralogical investigation of some British and other European tonsteins // Sedimentology. – 1979. – V. 26. – P. 407–425.
21. Grigorev N.A. Average concentrations of chemical elements in rocks of the upper continental crust // Geochemistry International. – 2003. – V. 41. – № 7. – P. 711–718.
22. Taylor S.R., McLennan S.M. The continental crust: its composition and evolution. – Oxford: Blackwell Scientific, 1985. – 312 p.
23. Минералого-геохимическая идентификация продуктов эксплозивного вулканизма в углях Минусинского бассейна / С.И. Арбузов, С.С. Ильенко, А.В. Вергунов, М.В. Шалдыбин, В.М. Соболенко, П.Е. Некрасов // Петрология магматических и метаморфических комплексов. Вып. 9. Материалы IX Всероссийской петрографической конференции с международным участием. – Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2017. – С. 35–37.
24. Winchester J.A., Floyd P.A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements // Chemical Geology. – 1977. – V. 20. – P. 325–343.
25. McDonough W.F., Sun S.-s. The composition of the Earth // Chemical Geology. – 1995. – V. 120. – P. 223–253.
26. Geochemistry, mineralogy and genesis of rare metal (Nb-Ta-Zr-Hf-Y-REE-Ga) coals of the seam XI in the south of Kuznetsk Basin, Russia / S.I. Arbuзов, D.A. Spears, A.V. Vergunov, S.S. P'enok, A.M. Mezhibor, V.P. Ivanov, N.A. Zarubina // Ore Geology Reviews. – 2019. – V. 113. URL: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103073> (дата обращения 15.05.2021).
27. Вергунов А.В., Арбузов С.И., Еремеева В.В. Минералогия, геохимия и генезис редкометалльного Zr-Nb-Hf-Ta-P3Э-Ga оруденения в пласте XXX Минусинского бассейна // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 7. – С. 49–62.

Поступила 26.05.2021 г.

Информация об авторах

Вергунов А.В., инженер-исследователь отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 553.493:550.42

MINERALOGY AND GEOCHEMISTRY OF TONSTEINS IN COALS OF CHERNOGORSKOE DEPOSIT OF THE MINUSINSK BASIN

Alexey V. Vergunov,
alexeivergunov@rambler.ru

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

The relevance of the research is determined by the necessity for assessment of volcanic pyroclastic material impact on formation of geochemical background of rare elements in coal.

The main aim of the research is to study the mineralogical and geochemical features of tonsteins and enclosing coals of chernogorskaya suite in the Chernogorskoe coal deposit (Minusinsk coal basin).

Objects of the research are tonsteins and enclosing coals of chernogorskaya suite in the Chernogorskoe coal deposit (Minusinsk coal basin).

Methods: sampling of coal seams of chernogorskaya suite in the Chernogorskoe coal deposit; chemical composition is estimated with inductively coupled plasma mass-spectrometry, instrumental neutron activation analysis, x-ray fluorescence methods; mineral composition is defined with optical microscopy, scanning electron microscopy, x-ray diffractometry.

Results. The paper studies mineralogical and geochemical characteristics of the tonsteins in chernogorskaya suite of the Chernogorskoe coal deposit (Minusinsk coal basin). Kaolinite is predominant in the composition of the studied tonsteins. Quartz, feldspar, and phosphates are found in smaller amounts. Integrated mineral and geochemical analysis allow determining the composition of the initial ash material, which served as a source for formation of tonsteins. Tonsteins formed from felsic volcanogenic pyroclastics are predominant. Tonsteins of felsic alkali-type volcanic genesis are less widespread. Tonsteins formed from intermediate and mafic volcanic material are rare. On the basis of the identified tonsteins, the sequence of changes in the composition of the pyroclastic material received during peat accumulation was restored. The study found that the pyroclastic material had a significant impact on accumulation of a group of lithophilic rare metals, including abnormally high concentrations of REE, Zr, Hf, Nb, Y, and Th.

Key words:

Coal, tonstein, geochemistry, volcanogenic pyroclastics, Minusinsk basin.

The reported study was funded by the RFBR, project number 19-35-90010.

REFERENCES

- Bogomazov V.M. Stratigrafiya i usloviya obrazovaniya douglenosnykh i ugleunosnykh otlozheniy karbona i permi Minusinskogo basseyna [Stratigraphy and conditions for the formation of pre-carboniferous and coal-bearing carbon and permian deposits of the Minusinsk basin]. *Voprosy geologii ugleunosnykh otlozheniy aziatskoy chasti SSSR* [Geology of coal-bearing sediments in the Asian part of the USSR]. Moscow, Leningrad, Academy of Sciences of the USSR Publ., 1961. pp. 79–116.
- Van A.V. Vulkanogenny pepel v ugleunosnykh otlozheniyakh verkhnego paleozoya Sredney Sibiri [Volcanogenic ash in coal-bearing sediments of the Upper Paleozoic of Middle Siberia]. *Lithology and mineral*, 1972, no. 1, pp. 40–51.
- Volkova I.B. Tonshteyny v ugolnykh plastakh Minusinskogo basseyna [Tonsteins in coal beds of the Minusinsk basin]. *Ugolnye basseyny i usloviya ikh formirovaniya. Tezisy dokladov VI Vsesoyuznogo geologicheskogo ugolnogo soveshchaniya* [Coal basins and their formation conditions. Proc. of the VI All-Union geological coal meeting]. Lvov, 1980. pp. 121–122.
- Admakin L.A. Tipy tonshteynov v ugolnykh plastakh Minusinskogo basseyna [Types of tonsteins in coal beds of the Minusinsk basin]. *Lithology and minerals*, 1992, no. 2, pp. 49–56.
- Arbuzov S.I., Ershov V.V. *Geokhimiya redkikh elementov v uglyakh Sibiri* [Geochemistry of rare elements in coals of Siberia]. Tomsk, D-Print Publ. house, 2007. 468 p.
- Arbuzov S.I., Chekryzhov I.Y., Finkelman R.B., Sun Y.Z., Zhao C.L., Il'enok S.S., Blokhin M.G., Zarubina N.V. Comments on the geochemistry of rare-earth elements (La, Ce, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu) with examples from coals of north Asia (Siberia, Russian far East, North China, Mongolia, and Kazakhstan). *International Journal of Coal Geology*, 2019, vol. 206, pp. 106–120.
- Ugolnaya baza Rossii. T. 3. *Ugolnye basseyny i mestorozhdeniya Vostochnoy Sibiri* [Coal base of Russia. Vol. III. Coal basins and deposits of Eastern Siberia]. Moscow, Geoinformtsentr Publ., 2002. 488 p.
- Gosudarstvennaya geologicheskaya karta RF. *Masshtab 1:1000000 (treyte pokolenie). Seriya Altaye-Sayanskaya. List N46, Abakan* [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). Series Altai-Sayan. Sheet N-46, Abakan]. St-Petersburg, Cartridge factory Russian Geological Research Institute, 2008.
- Brownfield M.E., Affolter R.H., Cathcart J.D., Johnson S.Y., Brownfield I.K., Rice C.A. Geologic setting and characterization of coals and the modes of occurrence of selected elements from the Franklin coal zone, Puget Group, John Henry No. 1 mine, King County, Washington, USA. *International Journal of Coal Geology*, 2005, vol. 63, pp. 247–275.
- Goodarzi F., Sanei H., Stasiuk L.D., Bagheri-Sadeghi H., Reyes J. A preliminary study of mineralogy and geochemistry of four coal samples from northern Iran. *International Journal of Coal Geology*, 2006, vol. 65, pp. 35–50.
- Mardon S.M., Hower J.C. Impact of coal properties on coal combustion by-product quality: examples from a Kentucky power plant. *International Journal of Coal Geology*, 2004, vol. 59, pp. 153–169.
- Zhao L., Ward C.R., French D., Graham I.T. Mineralogy of the volcanic influenced Great Northern coal seam in the Sydney Basin, Australia. *International Journal of Coal Geology*, 2012, vol. 94, pp. 94–110.
- Spears D.A., Duff P.McL.D., Caine P.M. The West Waterberg tonstein, South Africa. *International Journal of Coal Geology*, 1988, vol. 9, pp. 221–233.
- Bohor B.F., Triplehorn D.M. Tonsteins: altered volcanic ash layers in coal bearing sequences. *Geological Society of America*, 1993, vol. 285 Special Paper, pp. 42.
- Rao P.D., Walsh D.E. Nature and distribution of phosphorus minerals in Cook Inlet coals, Alaska. *International Journal of Coal Geology*, 1997, vol. 33, pp. 19–42.
- Vergunov A.V., Arbuzov S.I., Sobolenko V.M. Mineralogy and geochemistry of tonsteins in the Beysk coal deposit of the Minusinsk coal basin. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*.

- Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 2, pp. 155–166. In Rus.
17. Thompson L.N., Finkelman R.B., Arbuzov S.I., French D.H. An unusual occurrence of ferroan magnesite in a tonstein from the Minusinsk Basin in Siberia, Russia. *Chemical Geology*, 2021, vol. 568. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120131> (accessed 15 May 2021).
 18. Dai S., Ward C.R., Graham I.T., French D., Hower J.C., Zhao L., Wang X. Altered volcanic ashes in coal and coal-bearing sequences: a review of their nature and significance. *Earth-Science Reviews*, 2017, vol. 175, pp. 44–74.
 19. Spears D.A., Arbuzov S.I. A geochemical and mineralogical update on two major tonsteins in the UK Carboniferous Coal Measures. *International Journal of Coal Geology*, 2019, vol. 210. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2019.05.006> (accessed 15 May 2021).
 20. Spears D.A., Kanaris-Sotiriou R. A geochemical and mineralogical investigation of some British and other European tonsteins. *Sedimentology*, 1979, vol. 26, pp. 407–425.
 21. Grigorev N.A. Average concentrations of chemical elements in rocks of the upper continental crust. *Geochemistry International*, 2003, vol. 41, no. 7, pp. 711–718.
 22. Taylor S.R., McLennan S.M. *The Continental crust: its composition and evolution*. Oxford, Blackwell Scientific, 1985. 312 p.
 23. Arbuzov S.I., Ilenok S.S., Vergunov A.V., Shaldybin M.V., Sobolenko V.M., Nekrasov P.E. Mineralogo-geokhimicheskaya identifikatsiya produktov eksplozivnogo vulkanizma v uglyakh Minusinskogo basseyna [Mineralogical and geochemical identification of products of explosive volcanism in the coals of the Minusinsk basin]. *Petrologiya magmaticheskikh i metamorficheskikh kompleksov. Vyp. 9. Materialy IX Vserossiyskoy petrograficheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem* [Petrology of magmatic and metamorphic complexes. Iss. 9. Materials of the IX All-Russian Petrographic Conference with international participation]. Tomsk, Tomsk scientific and technical information center Publ., 2017. pp. 35–37.
 24. Winchester J.A., Floyd P.A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 1977, vol. 20, pp. 325–343.
 25. McDonough W.F., Sun S.-s. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 1995, vol. 120, pp. 223–253.
 26. Arbuzov S.I., Spears D.A., Vergunov A.V., Ilenok S.S., Mezhibor A.M., Ivanov V.P., Zarubina N.A. Geochemistry, mineralogy and genesis of rare metal (Nb-Ta-Zr-Hf-Y-REE-Ga) coals of the seam XI in the south of Kuznetsk Basin, Russia. *Ore Geology Reviews*, 2019, vol. 113. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103073> (accessed 15 May 2021).
 27. Vergunov A.V., Arbuzov S.I., Eremeeva V.V. Mineralogy, geochemistry and genesis of rare metal Zr-Nb-Hf-Ta-REE-Ga mineralization of the seam XXX of Minusinsk basin. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 7, pp. 49–62. In Rus.

Received: 26 May 2021.

Information about the authors

Alexey V. Vergunov, research engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 622.24.062

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ БУРОВЫХ РАСТВОРОВ С НАНОДОБАВКАМИ

Давуди Шадфар¹,
davoodis@hw.tpu.ru

Еремян Грачик Араикович¹,
eremyanga@hw.tpu.ru

Степико Артем Вадимович¹,
stepikoav@hw.tpu.ru

Рукавишников Валерий Сергеевич¹,
rukavishnikovvs@hw.tpu.ru

Минаев Константин Мадестович¹,
minaevkm@tpu.ru

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

Актуальность исследования связана с необходимостью увеличения успешности буровых работ за счёт применения высокоэффективных и экономически рентабельных добавок для создания буровых растворов с улучшенными свойствами. В настоящее время различные наночастицы, благодаря их уникальным физическим свойствам, активно используются во многих отраслях промышленности. За счёт своей высокой удельной поверхности и размера наноматериалы являются хорошими кандидатами для улучшения фильтрационных и реологических свойств бурового раствора. Однако при исследовании возможности применения наноматериалов в качестве добавки к буровому раствору необходимо учитывать их стоимость как один из наиболее важных факторов.

Цель: исследовать влияние наноразмерного диоксида кремния и графена на фильтрационные и реологические свойства бурового раствора в стандартных и пластовых условиях; оценить фактическую стоимость бурового раствора с добавлением наночастиц; провести сравнительный анализ технических и экономических характеристик исследуемых растворов с добавлением наноматериалов и промышленного бурового раствора.

Объект: буровые растворы на водной основе.

Методы: лабораторные исследования фильтрационных и реологических свойств буровых растворов на водной основе.

Результаты. Полученные результаты демонстрируют улучшение реологических и фильтрационных свойств бурового раствора при добавлении наноматериалов. С увеличением концентрации наночастиц происходит постепенное снижение водоотдачи. Образец с самой высокой концентрацией наноразмерного диоксида кремния по сравнению с базовой жидкостью показал уменьшение объема фильтрата в стандартных и пластовых условиях на 72,2 и 61,1 %, соответственно, относительно промышленного бурового раствора с добавлением полианионной низковязкой целлюлозы снижение составило 34,1 и 27,3 %. Исследуемые растворы с добавлением графена демонстрируют сравнимую реологию, но имеют большие объемы потерь жидкости в сравнении с промышленным раствором с полианионной целлюлозой низкой вязкости. Проведенная экономическая оценка показывает, что добавление наноматериалов к буровому раствору даже в минимальных концентрациях приводит к чрезвычайному увеличению его фактической стоимости. Стоимость буровых растворов с наноразмерным диоксидом кремния или графеном в два–три раза выше, чем у базового и промышленного бурового раствора с полианионной целлюлозой низкой вязкости, что делает их использование экономически нецелесообразным.

Ключевые слова:

Буровые растворы на водной основе, фильтрационные свойства, реология, наножидкости, графен, наноразмерный диоксид кремния, наночастицы, полианионная целлюлоза низкой вязкости.

Введение

Правильный подбор бурового раствора очень важен при выполнении операций бурения скважин, так как он имеет большой диапазон функций: вынос шлама с забоя скважины, контроль пластового давления, смазка и охлаждение бурового инструмента и колонны, стабилизация ствола скважины [1–4]. Использование бурового раствора с неподходящими свойствами может привести к осложнениям при бурении. Правильно подобранный буровой раствор выполняет очень важные функции при бурении, и с достаточной степенью точности его можно сравнить с кровью в сосудах тела [5, 6]. Технические свойства,

стоимость и экологичность являются тремя наиболее важными факторами, которые нужно учитывать при подборе бурового раствора. Затраты на буровой раствор составляют порядка 10 % от всего бюджета на буровые работы, что также значительно влияет на общие экономические показатели [7–9]. Мировой рынок жидкостей для бурения активно расширяется, его рост составляет до 10,3 % в год.

Буровые растворы можно разделить на три основные группы: на водной основе, на нефтяной основе и синтетические. Наиболее распространены растворы на водной основе, так как они более дешёвые, безопасны для окружающей среды и просты в пригото-

лении и использовании. Благодаря этому буровые растворы на водной основе широко применяются для бурения скважин, порядка 80 % всех скважин пробурены с помощью данного типа растворов.

В каждом конкретном случае буровой раствор должен иметь подходящие характеристики: плотность, смазывающая способность, pH, фильтрационные и реологические свойства. Корректный подбор фильтрационных свойств и реологии уменьшает вероятность осложнений при бурении и обеспечивает высокую успешность операций [10–13]. Для улучшения свойств к буровым растворам добавляют различные присадки. Например, для уменьшения водоотдачи и изменения реологии в буровой раствор добавляют натуральные и синтетические полимеры. Наиболее используемые полимерные добавки для буровых растворов на водной основе: полианионная целлюлоза низковязкая (ПАЦ НВ), крахмал, карбоксиметил крахмал, карбоксиметил целлюлоза, гуаровая камедь, полиакрилаты, гидроксиэтил целлюлоза, полиакриламид [6, 13–16].

За прошедшее десятилетие для наночастиц было найдено большое количество применений в сфере добычи нефти и газа, они предлагаются для увеличения нефтеотдачи [17, 18], цементации скважин [19, 20], для повышения продуктивности пласта [21] и в качестве модификаторов свойств буровых растворов [22]. Любой раствор, содержащий добавки с дисперсными частицами размера от 1 до 100 нанометров, может называться нанофлюидом [23]. За счёт своего маленького размера данные частицы имеют очень большую удельную поверхность, зачастую также они имеют более выраженные свойства и реактивную способность, чем частицы большего размера. Эти особые характеристики наночастиц делают их уникальными химическими и физическими агентами. Наноматериалы являются прекрасным связывающим агентом и могут эффективно блокировать наноразмерные поры [24]. В дополнение к этому наночастицы, которые имеют высокую чувствительность и реактивную способность к бентониту, могут стабилизировать реологические свойства буровых растворов, что улучшает очистку забоя и вынос шлама [25].

Множество исследований посвящено применению наночастиц как добавки для улучшения фильтрационных, реологических, смазывающих свойств буровых флюидов, а также ингибирования глин. В статье [26] описано два типа нанорастворов для бурения, которые содержат многослойные углеродные нанотрубки (МУНТ) и наноразмерный диоксид кремния (НДК) как добавки для улучшения свойств буровых растворов. Флюиды, содержащие МУНТ и НДК, демонстрируют лучшие фильтрационные и реологические свойства по сравнению с контрольным флюидом без наноматериалов.

В работе [27] для приготовления бурового раствора на водной основе был использован НДК, проводилось исследование влияния концентрации наночастиц на вязкость и несущую способность флюида. Результаты исследования показывают, что наличие частиц НДК значительно снижает водоотдачу и увеличивает

вязкость бурового раствора, что улучшает возможности флюида по выносу бурового шлама.

В 2020 г. проводились исследования буровых растворов с добавлением наночастиц диоксида титана TiO_2 . Результаты демонстрируют, что наличие наночастиц TiO_2 достоверно снижает потерю фильтрата и улучшает реологию [28].

В табл. 1 приведены результаты успешных исследований по применению различных видов наноматериалов в качестве добавок к буровым растворам для улучшения их свойств. Для каждой из работ указан вид наночастиц, тип бурового раствора, целевые показатели качества, условия проведения теста и ссылка на исследование. Эксперименты проводились для двух основных типов условий: API (American Petroleum Institute) – поверхностные условия по регламенту American petroleum institute; НР-НТ (high pressure – high temperature) – условия высокого давления и температуры, воспроизводящие условия пласта. Для опытов НР-НТ дополнительно указываются конкретные значения температуры и давления.

В приведенных статьях описывается позитивный эффект от использования нанодобавок, однако ни в одной из работ не оценивалось влияние включения наноконпонентов на итоговую стоимость бурового раствора. Кроме этого, все положительные эффекты от применения наночастиц в буровых растворах получены в относительно простых лабораторных экспериментах.

Цель данного исследования заключается в определении эффекта применения графена и НДК в качестве добавки к буровому раствору с технической и экономической точки зрения.

Для достижения данной цели была проведена серия экспериментов в поверхностных условиях и условиях, моделирующих пластовые, где для четырех различных концентраций частиц были измерены реологические и фильтрационные свойства образцов буровых растворов.

Кроме этого, приведено сравнение характеристик растворов на основе графена и НДК с промышленным буровым раствором с добавлением ПАЦ НВ для снижения водоотдачи.

В заключение была исследована степень влияния наноматериалов на конечную стоимость бурового раствора, приведена экономическая оценка, где сравнивается стоимость бурового раствора на основе НДК и графена и раствора с добавлением ПАЦ НВ.

Методология

Материалы, выбранные для приготовления образцов бурового раствора и проведения экспериментов: вода, карбонат натрия, хлорид натрия, ксантановая камедь, модифицированный крахмал, гидроксид натрия, ПАЦ НВ, карбонат кальция. Порошки наноразмерного диоксида кремния и нанопластики графена были приобретены у US Research Nanomaterials Inc., Хьюстон, Техас, США. Никакой дополнительной обработки или модификации перечисленных компонентов не проводилось. Характеристики наноматериалов приведены в табл. 2.

Таблица 1. Предлагаемые нанодобавки для использования в буровых растворах и цель их применения

Table 1. Nanomaterials proposed to be used in drilling fluids and their purpose(s) of application

Нanomaterial Nanomaterial	Тип раствора Fluid type	Целевой показатель Purposes	Условия теста Test condition	Работа Ref.
Титанат цинка Zinc titanite (ZnTiO ₃)	Водный Water-based	Улучшение реологии Контроль фильтрации Rheology improvement Filtration controlling	API	[29]
Оксид магния Magnesium oxide (MgO)	Водный Water-based	Улучшение реологии Rheology improvement	API, НР-НТ (121 °С, 34 атм)	[30]
Оксид алюминия Aluminum oxide (Al ₂ O ₃)	Водный Water-based	Улучшение реологии Rheology improvement	API, НР-НТ (121 °С, 34 атм)	[30]
Оксид меди Copper oxide (CuO)	Водный Water-based	Улучшение реологии Контроль фильтрации Rheology improvement Filtration controlling	API, НР-НТ (121 °С, 34 атм)	[31]
Оксид титана Titanium oxide (TiO ₂)	Нефтяной Oil-based	Ингибирование глин Shale inhibition Улучшение реологии Rheology improvement	API, НР-НТ (130 °С, 34 атм)	[32]
Оксид кремния Nanosilica (SiO ₂)	Нефтяной Oil-based	Улучшение реологии Контроль фильтрации Rheology improvement Filtration controlling	API, НР-НТ (121 °С, 34 атм)	[24]
Оксид кремния Nanosilica (SiO ₂)	Водный Water-based	Контроль фильтрации Filtration controlling	API, НР-НТ (130 °С, 34 атм)	[21]
МУНТ Multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs)	Водный Water-based	Контроль фильтрации Filtration controlling	API	[33]
МУНТ MWCNTs	Водный Water-based	Смазывающие свойства Улучшение реологии Контроль фильтрации Lubricity enhancement Rheology improvement Filtration controlling	API	[34]
МУНТ MWCNTs	Водный Water-based	Улучшение реологии Контроль фильтрации Rheology improvement Filtration controlling	API, НР-НТ (93 °С, 34 атм)	[35]
Графен Graphene nanoplates (GNPs)	Водный Water-based	Улучшение реологии Контроль фильтрации Rheology improvement Filtration controlling	API, НР-НТ (130 °С, 34 атм)	[36]

Таблица 2. Характеристики графена и НДК, используемых для приготовления растворов

Table 2. Specification of GNPs and SNPs used for nanofluids preparation

Параметр Specification	Графен GNPs	НДК SNPs
Чистота/Purity, %	95	98
Плотность, г/см ³ Bulk density, g/cm ³	0,05–0,081	< 0,10
Внешний вид Appearance	Черный Black	Белый White
Удельная поверхность, м ² /г Specific surface area, m ² /g	500–1200	160–600
Размер частиц, нм/Particle size, nm	–	60–70
Отношение C/O C/O ratio	C=99,7 % O<0,3 %	–
Количество слоев/Number of layers	3–6	–
Толщина, нм/Thickness, nm	2,8	–

Для приготовления и исследования образцов буровых растворов было использовано следующее оборудование: миксер Hamilton Beach, ротационный вискозиметр OFIT, весы для определения плотности бурового раствора, фильтр-пресс Fann API, фильтр-пресс высокого давления OFITE НР-НТ, штангенциркуль, рН-метр, секундомер.

В данном исследовании в качестве базового флюида для сравнения был выбран буровой раствор на водной основе, используемый для бурения на одном из месторождений на юге Ирана. Базовый буровой раствор на 1 кубический метр воды включает в себя 1,4 кг соды; столько же каустической соды; 31,4 кг модифицированного крахмала; 1,85 кг ксантановой камеди; 71,3 кг KCl; 285,3 кг NaCl и 142,6 кг CaCO₃.

Лабораторные образцы растворов готовились на основе 350 мл воды, в неё добавлялось по полграмма обычной и каустической соды. После добавления каждого из компонентов раствор перемешивался в течение пяти минут. На следующем этапе в раствор добавлены 20 г KCl и 90 г NaCl, после чего перемешивание – 20 минут. Далее были добавлены 0,6 г ксантановой камеди и 9 г модифицированного крахмала, раствор размешан в течение 15 минут до равномерного распределения полимеров. Следующим шагом было добавление 2 г ПАЦ НВ или необходимого количества исследуемых наночастиц, раствор перемешивался 30 минут. На конечном этапе для получения необходимой плотности (1246,19 кг/м³) было добавлено 60 г CaCO₃, раствор перемешивался 15 минут.

Для определения влияния нанодобавок на свойства бурового раствора были подготовлены растворы с различными концентрациями наночастиц. Составы образцов бурового раствора приведены в табл. 3. Для исследования подготовлены 10 образцов: базовый буровой раствор (ББР), промышленный буровой раствор (ПБР) с добавлением присадки ПАЦ НВ для снижения водоотдачи, а также по четыре раствора с различными концентрациями наночастиц каждого типа.

Таблица 3. Составы промышленного бурового раствора (ПБР) и буровых растворов с наночастицами (НБР)

Table 3. Formulation of field-applicable reference fluid (FRF), and nanofluids containing GNPs and SNPs

Концентрация кг/м ³ Concentration, kg/m ³	ПБР/FRF	НДК Nanofluids with SNPs				Графен Nanofluids with GNPs			
		НБР1 NF1	НБР2 NF2	НБР3 NF3	НБР4 NF4	НБР5 NF5	НБР6 NF6	НБР7 NF7	НБР8 NF8
ПАЦ НВ PAC-LV	5,7	–	–	–	–	–	–	–	–
НДК SNPs	–	1	2	3	4	–	–	–	–
Графен GNPs	–	–	–	–	–	1	2	3	4

Реологические свойства бурового раствора, такие как пластическая вязкость (ПВ), предел текучести (ПТ) и прочность геля (ПГ), для каждого образца флюида определялись с помощью вискозиметра. Вискозиметр измеряет скорость сдвига бурового раствора на шести разных режимах: 600, 300, 200, 100, 6 и 3 оборота в минуту. Для лучшей воспроизводимости измерения проводились трижды, средние значения заносились в отчёт. ПВ, ПТ, а также ПГ для 10 с и 10 мин определялись на основе Бингамовской модели пластического флюида по выражениям (1) и (2)

$$PV = \theta_{600} - \theta_{300}, \quad (1)$$

Таблица 4. Реологические свойства для образцов флюидов ББР, ПБР и нанорастворов

Table 4. Rheological properties for base fluid, field-applicable reference fluid, and nanofluids containing GNPs and SNPs

Реологические свойства Rheological properties	ББР BF	ПБР FRF	Буровой раствор с НДК Nanofluids with SNPs				Буровой раствор с графеном Nanofluids with GNPs			
			НБР1 NF1	НБР2 NF2	НБР3 NF3	НБР4 NF4	НБР5 NF5	НБР6 NF6	НБР7 NF7	НБР8 NF8
Пластическая вязкость, сП Plastic viscosity, cP	15,0	18,0	20,1	20,9	21,9	23,9	15,4	16,9	18,5	20,6
Предел текучести, Па Yield point, Pa	19,8	27,4	22,7	24,5	25,8	28,2	23,3	25,2	26,4	27,8
Прочность геля 10 с, Па Gel strength 10s, Pa	5,9	7,8	8,6	9,8	9,8	11,9	5,9	6,5	7,4	8,8
Прочность геля 10 мин, Па Gel strength 10 min, Pa	3,9	5,9	6,5	6,8	7,8	9	4,9	4,9	4,9	5,9

На основе величин реологических свойств, приведенных в табл. 4, можно утверждать, что добавление наночастиц обоих типов привело к увеличению всех реологических свойств. Вязкость и предел текучести в базовом растворе составляли 15 сП и 19,8 Па соответственно. Образцы бурового раствора

где θ_{600} и θ_{300} – показания вискозиметра при 600 и 300 оборотах в минуту соответственно; PV – пластическая вязкость, сП; YP – предел текучести, фунт/100 кв. футов.

Потери воды определялись при давлении 6,8 атм и комнатной температуре в течение 30 минут. Объем воды, которую теряет образец, замерялся каждые пять минут, осадок удалялся с фильтра, толщина слоя осадка измерялась цифровым штангенциркулем. В пластовых условиях измерения проводились при давлении 34 атм и температуре 104 °С, на фильтр-прессе высокого давления. Потери объема фильтрата замерялись через равные промежутки времени, эксперимент был завершён через 30 минут. Отложившийся осадок на фильтр-бумаге был просеян и замерен.

Результаты

Реологические свойства буровых флюидов определяют способность флюида к транспорту бурового шлама от забоя к поверхности. Пластическая вязкость, предел текучести и прочность геля – три составляющих Бингамовской модели пластической жидкости, с помощью которой можно определить ее реологические свойства. Пластическая вязкость – это способность жидкости сопротивляться течению в результате механического трения между твёрдыми и жидкими фазами бурового раствора. Другой фактор, влияющий на сопротивление жидкости к течению, по Бингамовской модели – предел текучести, который обусловлен электрохимическими силами между частицами. Эти силы являются результатом взаимодействия зарядов, находящихся на поверхности частиц в флюиде. Третий компонент – это прочность геля, которая определяется как величина силы притяжения частиц, которая обуславливает гелеобразование в статическом состоянии. В табл. 4 приведены величины реологических свойств буровых растворов с наночастицами и без них.

с добавлением НЧК и графена в максимальной концентрации (2 кг/м³) демонстрируют наибольшее значение вязкости – 23,9 и 20,6 сП. Как и в случае с вязкостью, предел текучести и стойкость геля также увеличились при добавлении наночастиц относительно базового раствора. На основе этого можно

сделать вывод, что добавление наночастиц в буровой раствор увеличивает возможность флюида к транспорту бурового шлама. Это улучшение реологических свойств объясняется высокой степенью эффективного взаимодействия между частицами наноматериалов с полимерами в буровом растворе в результате большой удельной поверхности. Частицы наноматериалов служат центрами образования функциональных групп [37, 38].

Для оценки технических характеристик растворов НДК и графена реологические свойства нанофлюидов сравнивались со свойствами промышленного бурового раствора с добавлением ПАЦ НВ. Пластическая вязкость для образцов с наибольшей концентрацией наночастиц увеличилась на 32,7 % для НДК и на

12,62 % для графена. Для всех остальных образцов зафиксированы более низкие показатели, чем промышленный буровой раствор с ПАЦ НВ.

По результатам сравнения можно сказать, что добавление наночастиц не привело к значительному увеличению несущей способности бурового раствора относительно уже используемых составов.

Для оценки влияния НДК и графена на фильтрационные свойства бурового раствора на водной основе были приготовлены образцы буровых растворов с концентрациями наночастиц от 1 до 4 кг/м³, после чего произведены замеры фильтрационных свойств в стандартных и пластовых условиях. На рис. 1 приведены объемы фильтрата бурового раствора, полученного при опытах.

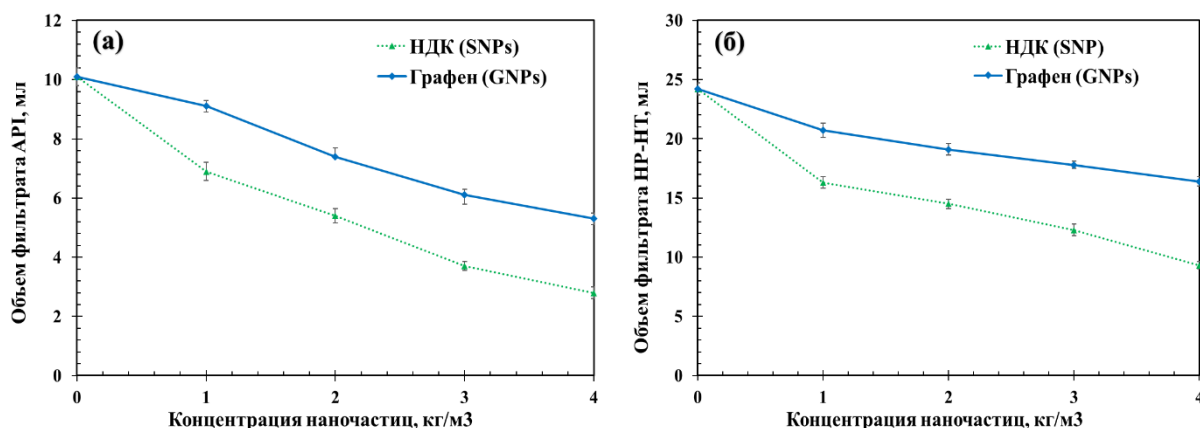


Рис. 1. Влияние добавок НДК и графена на водоотдачу бурового раствора: а) объем фильтрата в стандартных условиях б) объем фильтрата при 34 атм и 104 °С

Fig. 1. Effect of SNPs and GNPs on fluid loss behaviors of water drilling fluid: a) API filtrate volumes; b) HP-HT filtrate volume at 500 psi and 220 °F temperature

Как показано на рис. 1, а, введение обоих наноматериалов, графена и НДК, в базовый раствор привело к снижению характеристик фильтрации в поверхностных условиях. Объемы фильтрата для нанорастворов уменьшались по мере увеличения концентрации наноматериалов. Базовый раствор имел объем фильтрата 10,1 мл; в то время как наножидкости, которые содержали максимальные исследуемые концентрации НДК или графена, имели объемы фильтрата 2,8 и 5,3 мл соответственно. Снижение объемов потери жидкости составило 72,2 и 47,5 % по сравнению с базовым буровым раствором. Снижение водоотдачи происходит и при повышенной температуре и давлении. Объем фильтрата, полученный для ББР, равнялся 24,2 мл, объем потерь жидкости для образцов с максимальной концентрацией наночастиц уменьшился на 61,6 и 32,2 %. Наблюдаемое снижение водоотдачи для НБР может быть связано со способностью наночастиц перекрывать поры глинистой корки [24, 26, 29].

Чтобы оценить технические характеристики наноматериалов при контроле фильтрации, результаты для образцов НБР1–НБР8 сравнивались с показателями промышленного бурового раствора с ПАЦ НВ (рис. 2). Сравнение объемов фильтрата показывает, что объемы фильтрата, полученные для буровых растворов с добавлением графена (НБР5–НБР8), были

выше, чем у ПБР. Объем фильтрата для образца с максимальной концентрацией графена составлял 16,4 и 5,3 мл для стандартных и пластовых условий соответственно, тогда как объем фильтрата для образца ПБР составил 12,8 и 3,8 мл. Буровые растворы с добавлением НДК в концентрации 1 и 2 кг/м³ также имеют большие объемы фильтрата, чем образец ПБР. НБР5 и НБР6, которые содержали 3 и 4 кг/м³ НДК, показали сопоставимые и более низкие объемы фильтрата по сравнению с образцом ПБР. Образец НБР4 – 2,5 и 9,3 мл фильтрата, что на 34,1 и 27,3 % ниже, чем у образца ПБР.

В целом сравнительное исследование, проведенное в отношении фильтрующих характеристик наноматериалов, показало, что введение НДК и графена в буровой раствор на водной основе привело к значительному снижению водоотдачи относительно базового раствора. Сравнение показателей исследуемых нанорастворов с характеристиками ПБР ПАЦ НВ показало, что только раствор с максимальной исследуемой концентрацией НДК (4 кг/м³) превосходит ПБР с точки зрения снижения фильтрации.

Результаты реологических и фильтрационных экспериментов показали, что добавление НДК и графена к базовой жидкости улучшает реологические свойства и характеристики фильтрации бурового раствора

на водной основе. Однако способность добавки улучшать характеристики бурения не может отдельно оправдывать ее применимость в промышленности. Как уже упоминалось ранее, существует множество исследований, которые в лабораторных условиях демонстрируют эффективность применения нанодобавок как регуляторов фильтрации, модификаторов реологии и ингибиторов глин. Тем не менее они име-

ют очень высокую стоимость. Как правило, буровая промышленность ищет буровые растворы, которые обладают достаточными техническими характеристиками для обеспечения успеха буровых работ, но при этом имеют минимально возможную стоимость. Высокая стоимость является основным недостатком наноматериалов, из-за чего их применение ограничивается лабораторной средой.

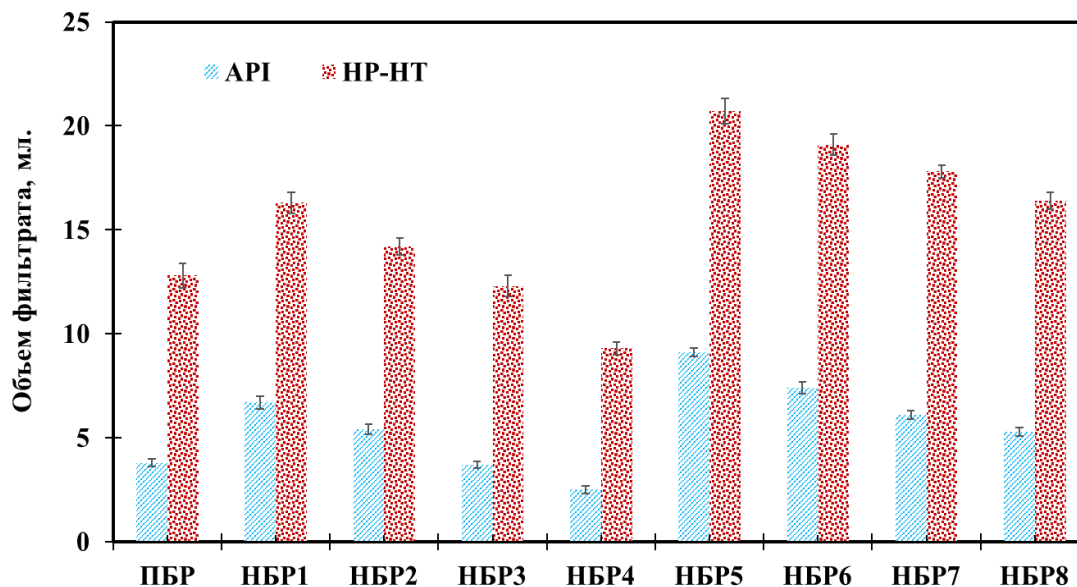


Рис. 2. Сравнение фильтрационных свойств наножидкостей и промышленного бурового раствора с добавлением ПАЦ НВ. API – в поверхностных, HP-HT – в пластовых условиях

Fig. 2. Comparison of API and HP-HT filtration properties of nanofluids and field applicable fluid containing PAC-LV (FRF)

В данном исследовании проводилась экономическая оценка влияния наноматериалов НДК и графена на фактическую стоимость бурового раствора на водной основе. В табл. 5 приведена удельная стоимость компонентов бурового раствора и наноматериалов. Как было показано ранее, эффективность применения ПАЦ НВ сравнима с исследуемыми наноматериалами, но при этом ее удельная стоимость значительно ниже.

Таблица 5. Удельная стоимость компонентов бурового раствора и наноматериалов

Table 5. Specific cost of drilling fluid components used

Компонент бурового раствора Drilling fluid component	Удельная стоимость, \$/кг Specific cost, \$/kg
Сода/Soda ash	0,3
Сода каустическая/Caustic soda	0,9
Крахмал модифицированный HT starch	1,2
Камедь ксантановая/XC polymer	1,5
KCl	0,1
NaCl	0,0
CaCO ₃	0,4
ПАЦ НВ/PAC-LV	1,7
НДК/SNPs	100,0
Графен/GNPs	200,0

Сравнение фактических затрат, необходимых для приготовления одного барреля базового бурового раствора (ББР), промышленного бурового раствора

(ПБР) и наножидкостей, содержащих НДК (НБР1-НБР4) и графен (НБР5-НБР8), представлено на рис. 3.

С первого взгляда на рис. 3 очевидно, что введение наноматериалов в буровой раствор привело к значительному увеличению фактической стоимости бурового раствора даже при очень низких концентрациях. Фактическая стоимость, оцененная для НБР1 и НБР5, которые соответственно содержали НДК и графен в концентрации 1 кг/м³, составила около 34 и 50 долларов за баррель, что на 89 и 177 % больше фактической стоимости базового раствора. Фактическая стоимость промышленного бурового раствора с ПАЦ НВ составляет около 19,5 долларов за баррель. Как было сказано ранее, результат сравнения технических характеристик образца ПБР и исследуемых наножидкостей показал, что только НБР4 с максимальной исследуемой концентрацией НДК продемонстрировал лучшие характеристики водоотдачи по сравнению с ПБР. При этом фактическая стоимость образца НБР4 равна 81,5 доллара за баррель, что более чем в четыре раза выше, чем стоимость образца ПБР.

Проведенный анализ экономической эффективности подтвердил, что НДК и графен не являются подходящими кандидатами для применения в буровых растворах на водной основе в качестве добавки из-за их высокой стоимости по сравнению с коммерчески доступными добавками для буровых растворов, такими как ПАЦ НВ.

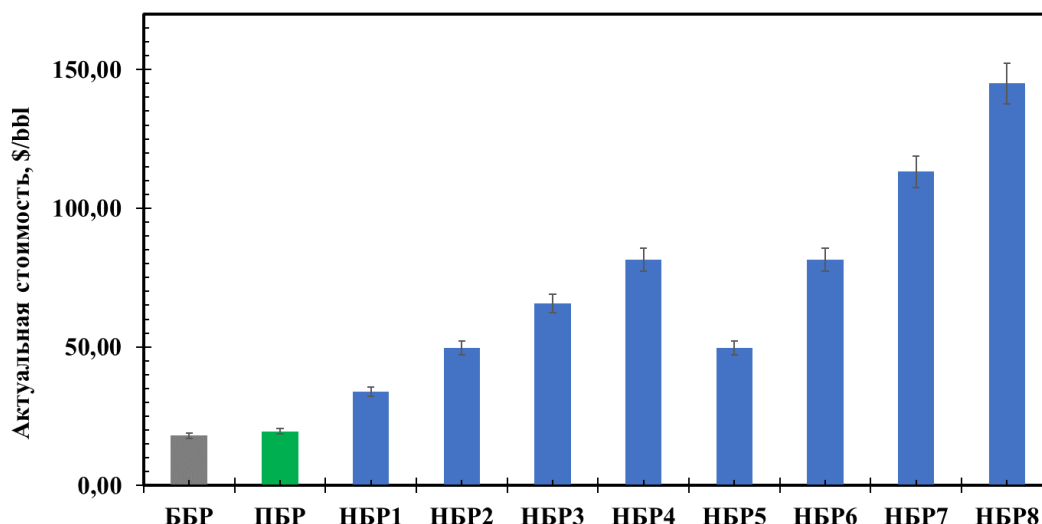


Рис. 3. Актуальная стоимость буровых растворов. Слева направо: базовый раствор, промышленный буровой раствор с ПАЦ НВ, нанофлюиды на основе НДК (НБР1–НБР4) и на основе графена (НБР5–НБР8)

Fig. 3. Actual cost of drilling fluids with and without nanomaterials (left to right): base fluid (BF), field-applicable reference fluid (FRF), SNPs-containing nanofluids (NF1–NF4), GNPs-containing nanofluids (NF5–NF8)

Заключение

Была проведена оценка влияния добавок наноразмерного диоксида кремния и графена на фильтрационные и реологические свойства бурового раствора. Выполнен сравнительный анализ технических характеристик и стоимости полученных растворов с базовым буровым раствором и с промышленным буровым раствором с добавлением ПАЦ НВ.

По результатам исследования можно заключить, что добавление НДК и графена в качестве присадок к буровому раствору привело к значительному снижению его водоотдачи. По сравнению с базовым, снижение водоотдачи раствора с максимальной исследуемой концентрацией НДК составило 72,2 и 61,1 % в поверхностных и пластовых условиях соответственно. Для бурового раствора с добавлением частиц графена аналогичные показатели равны 32,2 и 47,5 %. Также стоит отметить некоторое улучшение реологических свойств буровых растворов при добавлении НДК или графена. В свою очередь сравнение исследуемых растворов и промышленного бурового раствора с добавлением ПАЦ НВ демонстрирует, что среди всех об-

разцов только образец с наибольшей концентрацией НДК превосходит промышленный раствор с точки зрения снижения водоотдачи.

Экономический анализ показал, что использование НДК и графена в качестве добавок к буровому раствору, даже при низких концентрациях, значительно увеличивает его фактическую стоимость. Буровые растворы с концентрацией наночастиц 1 кг/м³ имеют стоимость в два–четыре раза выше, чем базовый и промышленный раствор с ПАЦ НВ. Из этого можно сделать вывод, что, несмотря на улучшение физических свойств буровых растворов, стоимость наноматериалов является основным ограничением, препятствующим их практическому применению. Также стоит отметить, что уже существующие коммерческие добавки для контроля водоотдачи и изменения реологии намного дешевле, но при этом обеспечивают сравнимый с добавками из наноматериалов эффект. При текущей стоимости производства наноматериалов их применимость в сфере буровых растворов будет ограничена лабораторными испытаниями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ghaderi S., Ramazani S.A., Haddadi S.A. Applications of highly salt and highly temperature resistance terpolymer of acrylamide/styrene/maleic anhydride monomers as a rheological modifier: rheological and corrosion protection properties studies // *Journal of Molecular Liquids*. – 2019. – V. 294. – Article number 111635.
- Moghaddam A.K., Saadatabadi A.R. Mesoscopic rheological modeling of drilling fluids: effects of the electrolyte // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2020. – V. 195. – Article number 107880.
- Влияние условий синтеза эмульгатора на свойства гидрофобно-эмульсионного бурового раствора / В.А. Яновский, А.Д. Фензель, М.О. Андропов, Р.С. Фахрисламова, А.С. Захаров, Р.А. Чуркин, К.М. Минаев // *Нефтяное хозяйство*. – 2018. – № 6. – С. 93–97.
- A hybrid nanocomposite of poly (styrene-methyl methacrylate-acrylic acid)/clay as a novel rheology-improvement additive for drilling fluids / N. Mohamadian, H. Ghorbani, D.A. Wood, M.A. Khoshmardan // *Journal of Polymer Research*. – 2019. – V. 26. – № 2. – Article number 33.
- Testing carrageenans with different chemical structures for water-based drilling fluid application / V. de Oliveira, K. dos Santos Alves, A. da Silva-Junior, R. Araújo, R. Balaban, L. Hilliou // *Journal of Molecular Liquids*. – 2020. – V. 299. – Article number 112139.
- Application of sustainable saffron purple petals as an eco-friendly green additive for drilling fluids: A rheological, filtration, morphological, and corrosion inhibition study / S. Ghaderi, S.A. Haddadi, S. Davoodi, M. Arjmand // *Journal of Molecular Liquids*. – 2020. – V. 315. – Article number 113707.
- Zoveidavianpoor M., Samsuri A. The use of nano-sized Tapioca starch as a natural water-soluble polymer for filtration control in water-based drilling muds // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2016. – V. 34. – P. 832–840.
- Application of a novel acrylamide copolymer containing highly hydrophobic comonomer as filtration control and rheology modifier additive in water-based drilling mud / S. Davoodi, S.A. Ramazani,

- A. Soleimani, A. Fellah Jahromi // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2019. – V. 180. – P. 747–755.
9. A novel field applicable mud formula with enhanced fluid loss properties in high pressure-high temperature well condition containing pistachio shell powder / S. Davoodi, S.A. Ramazani, A. Soleimani, A. Fellah Jahromi // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2018. – V. 162. – P. 378–385.
 10. Minimizing the HTHP filtration loss of oil-based drilling fluid with swellable polymer microspheres / H. Zhong, G. Shen, Z. Qiu, Y. Lin, L. Fan, X. Xing, J. Li // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2019. – V. 172. – P. 411–424.
 11. Влияние химической природы эмульгаторов ряда производных жирных кислот и этаноламинов на свойства гидрофобно-эмульсионных буровых растворов / В.А. Яновский, М.О. Андропов, Р.А. Чуркин, Р.С. Фахрисламова, А.Д. Фензель, К.М. Минаев // *Нефтяное хозяйство*. – 2018. – № 1. – С. 42–47.
 12. Insights into application of acorn shell powder in drilling fluid as environmentally friendly additive: filtration and rheology / S. Davoodi, S.A. Ramazani, V. Rukavishnikov, K. Minaev // *International Journal of Environmental Science and Technology*. – 2021. – V. 18. – № 4. – P. 835–848.
 13. Cellulose nanoparticles as modifiers for rheology and fluid loss in bentonite water-based fluids / M.-C. Li, Q. Wu, K. Song, Y. Qing, Y. Wu // *ACS applied materials & interfaces*. – 2015. – V. 7. – № 8. – P. 5006–5016.
 14. Сравнительное исследование понизителей фильтрации на основе карбоксиметильных эфиров крахмала и целлюлозы в современных системах буровых растворов / К.М. Минаев, В.А. Яновский, Д.О. Минаева, А.С. Захаров, Р.П. Сагитов, М.О. Андропов, С.К. Пандей // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 5. – С. 57–66.
 15. Исследование понизителей фильтрации буровых растворов на основе карбоксиметильных эфиров крахмала и целлюлозы / Р.П. Сагитов, К.М. Минаев, А.С. Захаров, А.С. Королев, Д.О. Минаева // *Нефтяное хозяйство*. – 2017. – № 11. – С. 102–105.
 16. Synthesis of Carboxymethyl Starch for increasing drilling mud quality in drilling oil and gas wells / К.М. Минаев, Д. Мартынова, А.С. Захаров, Р. Сагитов, А.А. Бер, О.С. Ульянова // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2016. – V. 43. – № 11. – Article number 012071.
 17. Biosynthesis of silica nanoparticle using *Saccharomyces cerevisiae* and its application on enhanced oil recovery / H. Zamani, A. Jafari, S.M. Mousavi, E. Darezereshki // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2020. – V. 190. – Article number 107002.
 18. Rheological and filtration characteristics of drilling fluids enhanced by nanoparticles with selected additives: an experimental study / N. Mohamadian, H. Ghorbani, D.A. Wood, H.K. Hormozi // *Advances in Geo-Energy Research*. – 2018. – V. 2. – № 3. – P. 228–236.
 19. Kovalchuk V., Nikolaev N. Carbon additives for high-quality well cementing // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2021. – V. 677. – № 5. – Article number 052035.
 20. Maagi M.T., Lupyana S.D., Jun G. Nanotechnology in the petroleum industry: focus on the use of nanosilica in oil-well cementing applications – a review // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2020. – V. 193. – Article number 107397.
 21. Elochukwu H., Gholami R., Sham Dol S. An approach to improve the cuttings carrying capacity of nanosilica based muds // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2017. – V. 152. – P. 309–316.
 22. Nanomaterial-based drilling fluids for exploitation of unconventional reservoirs: a review / M. Ali, H.H. Jami, A. Aftab, A.R. Ismail, N.M.C. Saady, M.F. Sahito, A. Keshavarz, S. Iglauer, M. Sarmadivaleh // *Energies*. – 2020. – V. 13. – № 13. – Article number 3417.
 23. How different nanoparticles affect the rheological properties of aqueous Wyoming sodium bentonite suspensions / Z. Vryzas, L. Nalbandian, V.T. Zaspalis, V.C. Kelessidis // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2019. – V. 173. – P. 941–954.
 24. Improving the performance of oil based mud and water based mud in a high temperature hole using nanosilica nanoparticles / A. Katende, N.V. Boyou, I. Ismail, D.Z. Chung, F. Sagala, N. Hussein, M.S. Ismail // *Colloids and surfaces A: physicochemical and engineering aspects*. – 2019. – V. 577. – P. 645–673.
 25. Kazemi-Beydokhti A., Hajiabadi S.H. Rheological investigation of smart polymer/carbon nanotube complex on properties of water-based drilling fluids // *Colloids and surfaces A: physicochemical and engineering aspects*. – 2018. – V. 556. – P. 23–29.
 26. The novel approach for the enhancement of rheological properties of water-based drilling fluids by using multi-walled carbon nanotube, nanosilica and glass beads / A. Ismail, A. Aftab, Z. Ibupoto, N. Zolkifile // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2016. – V. 139. – P. 264–275.
 27. Experimental investigation of the effects of silica nanoparticle on hole cleaning efficiency of water-based drilling mud / A.O. Gbadamosi, R. Junin, Y. Abdalla, A. Agi, J.O. Oseh // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2019. – V. 172. – P. 1226–1234.
 28. Effect of high temperature ageing on TiO₂ nanoparticles enhanced drilling fluids: A rheological and filtration study / M. Beg, P. Kumar, P. Choudhary, S. Sharma // *Upstream Oil and Gas Technology*. – 2020. – V. 5. – Article number 100019.
 29. Effect of zinc titanate nanoparticles on rheological and filtration properties of water based drilling fluids / S. Perween, M. Beg, R. Shankar, S. Sharma, A. Ranjan // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2018. – V. 170. – P. 844–857.
 30. Application of nanoparticles in improving rheological properties of water based drilling fluids / M. Al-Saba, A. Al Fadhli, A. Marafi, A. Hussain, F. Bander, M. Al Dushaishi // *Society of Petroleum Engineers – SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual technical symposium and exhibition*. – Dammam, Saudi Arabia, 2018. – Paper Number SPE-192239-MS
 31. Effect of ferric oxide nanoparticles on the properties of filter cake formed by calcium bentonite-based drilling muds / O. Mahmoud, H.A. Nasr-El-Din, Z. Vryzas, V. Kelessidis // *SPE Drilling and Completion*. – 2018. – V. 33. – № 4. – P. 363–376.
 32. Parizad A., Shahbazi K., Tanha A.A. Enhancement of polymeric water-based drilling fluid properties using nanoparticles // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2018. – V. 170. – P. 813–828.
 33. Improve performance of water-based drilling fluids using nanoparticles / A.R. Ismail, T.C. Seong, N.A. Buang, W.R.W. Sulaiman // *The 5th Sriwijaya International Seminar on Energy-Environmental Science and Technology*. – Palembang, Indonesia, 2014. – P. 43–47.
 34. Ismail A., Rashid M., Thameem B. Application of nanomaterials to enhanced the lubricity and rheological properties of water based drilling fluid // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – V. 380. – P. 012021.
 35. Sajjadian M., Sajjadian V.A., Rashidi A. Experimental evaluation of nanomaterials to improve drilling fluid properties of water-based muds HP/HT applications // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2020. – V. 190. – Article number 107006.
 36. Aramendiz J., Imqam A. Water-based drilling fluid formulation using silica and graphene nanoparticles for unconventional shale applications // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2019. – V. 179. – P. 742–749.
 37. A novel approach to enhance rheological and filtration properties of water-based mud using polypropylene-silica nanocomposite / J.O. Oseh, M.M. Norddin, I. Ismail, A.O. Gbadamosi, A. Agi, H.N. Mohammed // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2019. – V. 181. – Article number 106264.
 38. Effect of amphiphilic polymer/nano-silica composite on shale stability for water-based muds / Z. Qiu, J. Xu, P. Yang, X. Zhao, T. Mou, H. Zhong, W. Huang // *Applied Sciences*. – 2018. – V. 8. – № 10. – Article number 1839.

Поступила 26.05.2021 г.

Информация об авторах

Давуди Ш., инженер-исследователь Центра подготовки и переподготовки специалистов нефтегазового дела при Национальном исследовательском Томском политехническом университете.

Еремян Г.А., инженер лаборатории геологии месторождений нефти и газа Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Степико А.В., инженер лаборатории геологии месторождений нефти и газа Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Рукавишников В.С., PhD, директор Центра подготовки и переподготовки специалистов нефтегазового дела Томского политехнического университета.

Минаев К.М., кандидат химических наук, заведующий испытательной научно-инновационной лабораторией «Буровые промывочные и тампонажные растворы» Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 622.32:519.8

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE PHYSICAL PROPERTIES AND ECONOMIC EFFICIENCY OF DRILLING FLUIDS WITH NANO-ADDITIVES

Shadfar Davoodi¹,
davoodis@hw.tpu.ru

Grachik A. Eremyan¹,
eremyanga@hw.tpu.ru

Artem V. Stepiko¹,
stepikoav@hw.tpu.ru

Valeriy S. Rukavishnikov¹,
rukavishnikovvs@hw.tpu.ru

Konstantin M. Minaev¹,
minaevkm@tpu.ru

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

The relevance of this study is caused by the need for high-performance and economically viable additives to formulate drilling fluids with desirable properties for successfully conducting a drilling operation. Nanomaterials have found their applications as very unique, sensitive materials in different industries due to their tiny size and exceptionally high surface area to volume ratio. Owing to these characteristics, nanomaterials can be good candidates for improving drilling fluid performance with respect to filtration and rheological properties. However, cost as one of the most influential factors in decision-making on the selection of drilling fluid additive must be considered in the investigation of nanomaterials for practical application in drilling fluid.

The main aim of this research is to evaluate the influence of two nanomaterials at four different concentrations (1 to 4 kg/m³), graphene nanoplates and silica nanoparticles, on the filtration properties under low pressure – low temperature and high pressure – high temperature conditions, rheological behavior, and actual cost of a field-applicable water-based drilling fluid. Besides, the technical performance and financial impact of the studied nanomaterials were compared with that of commercial additive commonly used in drilling fluids.

Object: technical performance and financial impact of graphene nanoplates and silica nanoparticles in a field-applicable drilling fluid.

Methods. Experimental investigation was performed in drilling fluid laboratory to determine filtration properties and rheological characteristics under low pressure – low temperature and high pressure – high temperature conditions.

Results. The experimental outcomes obtained in this study demonstrated that both the rheological and the filtration properties of the drilling fluid system were improved in the presence of nanomaterials. For both conditions, filtration was reduced with an incremental increase of nanosilica and graphene nanoplates in the base fluid system. Where the sample with the highest concentration of nanosilica (4 kg/m³) demonstrated under low pressure – low temperature conditions – 72,2 and at high pressure – high temperature conditions – 61,1 % reduction in the volume of the filtrates when compared to the base fluid. The studied nanofluid systems with graphene nanoplates presented comparable rheology but greater fluid loss volume in comparison to that of the low-viscosity polyanionic cellulose containing fluid. As for the nanofluids containing nanosilica, the obtained results displayed only the nanofluid sample with 4 kg/m³ outperformed the field applicable fluid containing low-viscosity polyanionic cellulose in terms of filtration by showing 34,1 and 27,3 % less fluid loss for low pressure – low temperature and high pressure – high temperature conditions respectively. The financial impact assessment provided demonstrated that the introduction of nanomaterials resulted in the enormously high actual cost, where the nanofluids cost with only 1 kg/m³ nanographene or nanosilica was approximately two to three times higher than those of the base fluid and low-viscosity polyanionic cellulose containing fluid. The results of the study revealed that the huge cost of the studied nanomaterials is their major disadvantage, hindering them from practical application in drilling fluids industry.

Key words:

Filtration properties, rheology, nanofluids, graphene nanoplates, silica dioxide nanoparticles, water-based fluid, low-viscosity polyanionic cellulose.

REFERENCES

- Ghaderi S., Ramazani S.A., Haddadi S.A. Applications of highly salt and highly temperature resistance terpolymer of acrylamide/styrene/maleic anhydride monomers as a rheological modifier: rheological and corrosion protection properties studies. *Journal of Molecular Liquids*, 2019, vol. 294, Article number 111635.
- Moghaddam A.K., Saadatabadi A.R. Mesoscopic rheological modeling of drilling fluids: Effects of the electrolyte. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, vol. 195, Article number 107880.
- Yanovsky V., Fenzel A., Andropov M., Fakhislamova R., Zakharov A., Churkin R., Minaev K. The effect of synthesis conditions of emulsifier on the properties of oil-based drilling muds. *Oil Industry*, 2018, no. 6, pp. 93–97. In Rus.
- Mohamadian N., Ghorbani H., Wood D.A., Khoshmardan M.A. A hybrid nanocomposite of poly (styrene-methyl methacrylate-acrylic acid)/clay as a novel rheology-improvement additive for drilling fluids. *Journal of Polymer Research*, 2019, vol. 26, no. 2, Article number 33.
- De Oliveira V., Dos Santos Alves K., Da Silva-Junior A., Araújo R., Balaban R., Hilliou L. Testing carrageenans with different chemical structures for water-based drilling fluid application. *Journal of Molecular Liquids*, 2020, vol. 299, Article number 112139.
- Ghaderi S., Haddadi S.A., Davoodi S., Arjmand M. Application of sustainable saffron purple petals as an eco-friendly green additive

- for drilling fluids: a rheological, filtration, morphological, and corrosion inhibition study. *Journal of Molecular Liquids*, 2020, vol. 315, Article number 113707.
7. Zoveidavianpoor M., Samsuri A. The use of nano-sized Tapioca starch as a natural water-soluble polymer for filtration control in water-based drilling muds. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, vol. 34, pp. 832–840.
 8. Davoodi S., Ramazani S.A., Soleimanian A., Fellah Jahromi A. Application of a novel acrylamide copolymer containing highly hydrophobic comonomer as filtration control and rheology modifier additive in water-based drilling mud. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 180, pp. 747–755.
 9. Davoodi S., Ramazani S.A. A., Soleimanian A., Fellah Jahromi A. A novel field applicable mud formula with enhanced fluid loss properties in high pressure-high temperature well condition containing pistachio shell powder. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 162, pp. 378–385.
 10. Zhong H., Shen G., Qiu Z., Lin Y., Fan L., Xing X., Li J. Minimizing the HTHP filtration loss of oil-based drilling fluid with swellable polymer microspheres. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 172, pp. 411–424.
 11. Yanovsky V., Andropov M., Churkin R., Fakhriislamova R., Fenzel A., Minaev K. The effect of the chemical nature of emulsifiers of some fatty acid derivatives and ethanolamines on the oil-based drilling fluids properties. *Oil Industry*, 2018, no. 1, pp. 42–47. In Rus.
 12. Davoodi S., Ramazani S.A. A., Rukavishnikov V., Minaev K. Insights into application of acorn shell powder in drilling fluid as environmentally friendly additive: filtration and rheology. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2021, vol. 18, no. 4, pp. 835–848.
 13. Li M.-C., Wu Q., Song K., Qing Y., Wu Y. Cellulose nanoparticles as modifiers for rheology and fluid loss in bentonite water-based fluids. *ACS applied materials & interfaces*, 2015, vol. 7, no. 8, pp. 5006–5016.
 14. Minaev K.M., Yanovsky V.A., Minaeva D.O., Zakharov A.S., Sagitov R.R., Andropov M.O., Pandey S.K. Comparative research of filtration reducers based on carboxymethyl esters of starch and cellulose in modern drilling mud systems. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 5, pp. 57–66. In Rus.
 15. Sagitov R., Minaev K., Zakharov A., Korolev A., Minaeva D. The study of the drilling mud fluid loss reducing agents based on carboxymethyl starch and cellulose. *Oil Industry*, 2017, no. 11, pp. 102–105. In Rus.
 16. Minaev K.M., Martynova D., Zakharov A.S., Sagitov R., Ber A.A., Ulyanova O.S. Synthesis of Carboxymethyl Starch for increasing drilling mud quality in drilling oil and gas wells. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43, no. 11, Article number 012071.
 17. Zamani H., Jafari A., Mousavi S.M., Darezereshki E. Biosynthesis of silica nanoparticle using *Saccharomyces cerevisiae* and its application on enhanced oil recovery. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, vol. 190, Article number 107002.
 18. Mohamadian N., Ghorbani H., Wood D.A., Hormozi H.K. Rheological and filtration characteristics of drilling fluids enhanced by nanoparticles with selected additives: an experimental study. *Advances in Geo-Energy Research*, 2018, vol. 2, no. 3, pp. 228–236.
 19. Kovalchuk V., Nikolaev N. Carbon additives for high-quality well cementing. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 677, no. 5, Article number 052035.
 20. Maagi M.T., Lupyana S.D., Jun G. Nanotechnology in the petroleum industry: Focus on the use of nanosilica in oil-well cementing applications – a review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, vol. 193, Article number 107397.
 21. Elochukwu H., Gholami R., Sham Dol S. An approach to improve the cuttings carrying capacity of nanosilica based muds. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 152, pp. 309–316.
 22. Ali M., Jarni H.H., Aftab A., Ismail A.R., Saady N.M.C., Sahito M.F., Keshavarz A., Iglauer S., Sarmadivaleh M. Nanomaterial-based drilling fluids for exploitation of unconventional reservoirs: a review. *Energies*, 2020, vol. 13, no. 13, Article number 3417.
 23. Vryzas Z., Nalbandian L., Zaspalis V.T., Kelessidis V.C. How different nanoparticles affect the rheological properties of aqueous Wyoming sodium bentonite suspensions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 173, pp. 941–954.
 24. Katende A., Boyou N.V., Ismail I., Chung D.Z., Sagala F., Hussein, N. Ismail M.S. Improving the performance of oil based mud and water based mud in a high temperature hole using nanosilica nanoparticles. *Colloids and surfaces A: physicochemical and engineering aspects*, 2019, vol. 577, pp. 645–673.
 25. Kazemi-Beydokhti A., Hajiabadi S.H. Rheological investigation of smart polymer/carbon nanotube complex on properties of water-based drilling fluids. *Colloids and surfaces A: physicochemical and engineering aspects*, 2018, vol. 556, pp. 23–29.
 26. Ismail A., Aftab A., Ibutopo Z., Zolkifile N. The novel approach for the enhancement of rheological properties of water-based drilling fluids by using multi-walled carbon nanotube, nanosilica and glass beads. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2016, vol. 139, pp. 264–275.
 27. Gbadamosi A.O., Junin R., Abdalla Y., Agi A., Oseh J.O. Experimental investigation of the effects of silica nanoparticle on hole cleaning efficiency of water-based drilling mud. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 172, pp. 1226–1234.
 28. Beg M., Kumar P., Choudhary P., Sharma S. Effect of high temperature ageing on TiO₂ nanoparticles enhanced drilling fluids: a rheological and filtration study. *Upstream Oil and Gas Technology*, 2020, vol. 5, Article number 100019.
 29. Perween S., Beg M., Shankar R., Sharma S., Ranjan A. Effect of zinc titanate nanoparticles on rheological and filtration properties of water based drilling fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 170, pp. 844–857.
 30. Al-Saba M., Al Fadhli A., Marafi A., Hussain A., Bander F., Al Dushaishi M. Application of nanoparticles in improving rheological properties of water based drilling fluids. *Society of Petroleum Engineers – SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual technical symposium and exhibition*. Dammam, Saudi Arabia, 2018. Paper Number SPE-192239-MS
 31. Mahmoud O., Nasr-El-Din H.A., Vryzas Z., Kelessidis V. Effect of ferric oxide nanoparticles on the properties of filter cake formed by calcium bentonite-based drilling muds. *SPE Drilling and Completion*, 2018, vol. 33, no. 4, pp. 363–376.
 32. Parizad A., Shahbazi K., Tanha A.A. Enhancement of polymeric water-based drilling fluid properties using nanoparticles. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 170, pp. 813–828.
 33. Ismail A.R., Seong T.C., Buang N.A., Sulaiman W.R.W. Improve performance of water-based drilling fluids using nanoparticles. *The 5th Sriwijaya International Seminar on Energy-Environmental Science and Technology*. Palembang, Indonesia, 2014. pp. 43–47.
 34. Ismail A., Rashid M., Thameem B. Application of nanomaterials to enhanced the lubricity and rheological properties of water based drilling fluid. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 380, pp. 012021.
 35. Sajjadian M., Sajjadian V.A., Rashidi A. Experimental evaluation of nanomaterials to improve drilling fluid properties of water-based muds HP/HT applications. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, vol. 190, Article number 107006.
 36. Aramendiz J., Imqam A. Water-based drilling fluid formulation using silica and graphene nanoparticles for unconventional shale applications. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 179, pp. 742–749.
 37. Oseh J.O., Norddin M.M., Ismail I., Gbadamosi A.O., Agi A., Mohammed H.N. A novel approach to enhance rheological and filtration properties of water-based mud using polypropylene-silica nanocomposite. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 181, Article number 106264.
 38. Qiu Z., Xu J., Yang P., Zhao X., Mou T., Zhong H., Huang W. Effect of amphiphilic polymer/nano-silica composite on shale stability for water-based muds. *Applied Sciences*, 2018, vol. 8, no. 10, Article number 1839.

Received: 26 May 2021.

Information about the authors

Shadfar Davoodi, research engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Grachik A. Eremyan, engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Artem V. Stepiko, engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Valeriy S. Rukavishnikov, PhD, director of Petroleum Learning Centre, National Research Tomsk Polytechnic University.

Konstantin M. Minaev, Cand. Sc., drilling mud laboratory director, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 620.9:538.9

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ НАПОЛНЕННЫХ ПОЛИМЕРОВ ДЛЯ РЕЗИСТОРОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ НАГРУЖЕНИЯ

Минакова Наталья Николаевна¹,
minakova@asu.ru

Ушаков Василий Яковлевич²,
vyush@tpu.ru

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

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

Актуальность работы обусловлена тем, что обеспечение бесперебойного электроснабжения предприятий ресурсодобывающих отраслей является неперенным условием их эффективного функционирования. Последнее, в свою очередь, определяется качеством защиты электропотребляющего оборудования (прежде всего электродвигателей) от токов короткого замыкания и перенапряжений в питающей сети. Их ограничение обеспечивается комплексом мер; важнейшей среди них является использование высоковольтных объемных резисторов, способных рассеивать огромные мощности. В последние годы внимание специалистов привлекли наполненные полимеры как материалы для изготовления таких резисторов. Наряду с такими их достоинствами, как: доступность и дешевизна исходных материалов (высокая ресурсоэффективность), хорошо освоенная технология производства таких композиций, им присущ существенный недостаток – сильная зависимость удельного объемного сопротивления от температуры и, следовательно, от режимов их работы. Из-за многообразия процессов в наполненных полимерах, стимулируемых повышенной температурой, необходимо изучение их поведения в зависимости от условий нагрева. Один из часто встречающихся режимов работы полимерных композиционных материалов – повторно-кратковременное воздействие токовой нагрузки, при котором происходят многократные изменения температурного режима, негативно влияющие на стабильность параметров резисторов. Это делает актуальными исследования динамики объемного электрического сопротивления как важнейшего параметра резистора при сложных режимах токовой нагрузки.

Цель: оценка возможности работы наполненных техническим углеродом каучуков в режиме «нагрев–охлаждение»: исследование разброса величины тока в зависимости от токовой нагрузки, времени работы и паузы при нагреве переменным током. Из-за многокомпонентности структуры стабильность электрофизических характеристик во многом определяется режимом их работы.

Методы: инструментальные измерения электрофизических характеристик резистивных полимерных композиционных материалов, статистическая обработка результатов измерений, оценка временных рядов изменения случайных параметров.

Результаты. Выявлены зависимости величины переменного тока, протекающего в наполненных техническим углеродом бутадиен-нитрильных каучуках, от длительности работы и продолжительности пауз при повторно-кратковременном режиме работы. Установлена также возможность проявления неоднозначного влияния длительности паузы на стабильность величины тока. Подтверждена возможность применения показателя Херста для оценки тенденций временного ряда по изменению токовой нагрузки (объемного электрического сопротивления) в повторно-кратковременном режиме работы. Показана зависимость величины самого показателя Херста от длительности анализируемого временного интервала. На основании проведенных исследований разработаны рекомендации по работе наполненных техническим углеродом каучуков при повторно-кратковременном воздействии токовой нагрузки.

Ключевые слова:

Электроснабжение ресурсодобывающих отраслей, ресурсосбережение, наполненные полимеры, резисторы, объемное электрическое сопротивление, режимы работы, нестабильность характеристик, повышенная температура, показатель Херста.

Введение

Полимерные композиционные материалы вызывают возрастающий интерес разработчиков высоковольтных резисторов, способных рассеивать большие мощности при коротких замыканиях и перенапряжениях (грозовых и коммутационных) в электрических сетях, питающих ответственные потребители. К таковым, несомненно, относятся электродвигатели на предприятиях ресурсодобывающих отраслей. Выход их из строя – это не только потеря дорогостоящего оборудования, но и нарушение технологического процесса с огромным экономическим ущербом из-за недополучения продукции. Сдерживающим фактором

для широкомасштабного использования этих материалов является недостаточная стабильность их свойств при нагреве протекающими по ним токами. Нагрев резистивных полимерных композиционных материалов вызывает разнообразные физико-химические процессы: тепловую эмиссию электронов, термоокислительную деструкцию, структурирование, релаксационные процессы, изменение расстояния между частями электропроводящего компонента из-за различия коэффициентов температурного расширения основных компонентов и т. д. [1–3]. Интенсивность процессов и их последствия зависят от режимов работы защищаемого объекта: длительный, повторно-кратковременный (циклический), импульсный и т. д.

Обычно температурная стабильность резистивных материалов оценивается по величине температурного коэффициента сопротивления [4, 5], определяемого при длительном нагреве до заданной температуры. При этом необходимо учитывать, что воздействие на компоненты полимерной композиции при нагреве электрическим током может отличаться от режима нагрева при определении температурного коэффициента сопротивления. При токовой нагрузке нагрев во многом зависит от локального тепловыделения в единичных электрических контактах, которые, в зависимости от характера распределения электропроводящего наполнителя в многокомпонентной системе, могут быть очень разнообразны [6, 7].

Объекты и методы исследования

В работе исследованы свойства резистивных полимерных композиционных материалов в повторно-кратковременном режиме работы. В качестве объектов исследования выбраны наполненные техническим углеродом каучуки из-за их технологичности и экономической эффективности: доступность исходных компонентов, хорошо освоенная промышленная технология изготовления изделий различной формы (цилиндрических, пластинчатых и т. д.) [4, 7].

При выборе составляющих для изготовления полимерных резисторов для промышленного применения руководствуются следующими критериями: для полимеров – низкая стоимость и высокая стойкость к воздействию агрессивной среды, для углеродного наполнителя – низкая стоимость и доступность (углерод промышленной технологии изготовления) [8]. В этой связи в качестве связующего материала применен бутадиен-нитрильный каучук (NBR по ANSI или СКН-40 – в РФ). Электропроводящий наполнитель – технический углерод П-234 (PIR по ASTM). Каучук СКН-40 хорошо зарекомендовал себя при изготовлении теплостойких изделий, предназначенных для работы в воде, трансформаторном масле, растворителях и некоторых других средах [4]. П-234 выбран из-за того, что он производится в промышленных масштабах; этот высокодисперсный технический углерод способен повышать температурную стабильность композиционного материала [9]. При необходимости регулирования величины объемного электрического сопротивления концентрация П-234 менялась от 40 до 80 весовых частей на 100 весовых частей связующей основы.

Испытания выполнялись при приложении переменного напряжения промышленной частоты. Использована описанная в [6] методика, позволяющая реализовать циклическое воздействие токовой нагрузки на резистор в слабых электрических полях с необходимой длительностью воздействия напряжения и длительностью пауз. Величину тока, протекающего в резисторе, регулировали изменением амплитуды переменного напряжения в зависимости от объемного электрического сопротивления испытуемых образцов. Для измерений использовался измерительный комплект К505. Образцы имели форму цилиндров диаметром 30 мм, длиной 600 мм.

Все испытания выполнялись в одинаковых условиях – оставались неизменными окружающая среда, конструктивное исполнение и геометрические размеры измерительной ячейки. Образцы охлаждались при температуре окружающей среды, соответствующей нормальным условиям испытаний – 20 ± 2 °С. Использовался стабилизатор напряжения, удовлетворяющий требованиям ГОСТ 29322-2014: предельно допустимое отклонение ± 10 % в случае кратковременного отклонения и ± 5 % в случае длительного отклонения. Количество образцов на точку при испытаниях не менее 12. (Определялось по дисперсии исследуемого признака при предельной ошибке не более 5 %). При обработке результатов измерений использованы стандартные статистические пакеты. Статистически значимые отличия при сравнении выборок определялись с помощью T-test (проводился с уровнем значимости 0,05).

Результаты исследования

Один из результатов экспериментов, относящихся к нагреву в первом цикле резисторов, отличающихся величиной исходного сопротивления, представлен на рис. 1.

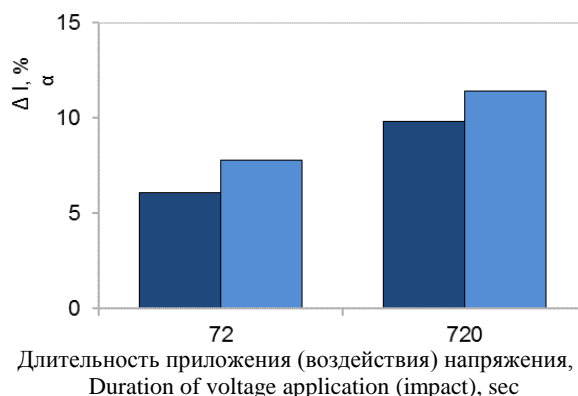


Рис. 1. Зависимость изменения величины тока от времени работы в первом цикле нагрева: левые столбцы – низкоомные резисторы (3917 Ом·м), правые столбцы – высокоомные (9912 Ом·м)

Fig. 1. Dependence of the change in the current value on the operating time in the first heating cycle: the left columns are low-resistance resistors (3917 Ohm-m), the right columns are high-resistance (9912 Ohm-m)

Установлено, что изменение величины тока за первый цикл в зависимости от параметров нагрева соответствует известным для этих материалов закономерностям по влиянию температуры на величину объемного электрического сопротивления, определяемым по изменению температурного коэффициента сопротивления [9]:

- при увеличении приложенного напряжения (начальной величины тока, определяющей температуру нагрева) величина тока со временем (в пределах периода нагружения) уменьшается;
- при увеличении длительности цикла нагрева характер изменения тока сохраняется, а диапазон его изменения расширяется;

- для высокоомных материалов изменение величины тока, отражающее изменение объемного электрического сопротивления, больше, чем для низкоомных.

Оценка влияния времени паузы выполнялась за несколько циклов. На рис. 2 приведены данные за 15 циклов «нагрев–охлаждение».

Изменение величины тока за 15 циклов подчиняется следующим закономерностям:

- на первом цикле закономерности совпадают с представленными ранее: при нагреве ток уменьшается (увеличивается объемное электрическое сопротивление);
- при небольшом значении тока ($I_{нач}=0,06$ А) его величина практически не изменяется в исследованном диапазоне продолжительности фаз нагрузки и паузы;
- при увеличении тока ($I_{нач}=0,5$ А) диапазон его изменения за время работы возрастает;
- увеличение времени работы уменьшает стабильность величины объемного электрического сопротивления резистора.

Влияние длительности паузы для выбранных образцов резисторов 15 циклов «нагрев–охлаждение» подчиняется следующим закономерностям:

- объемное электрическое сопротивление малочувствительно к изменению длительности паузы;
- для низкоомных материалов это проявляется более отчетливо, чем для высокоомных.

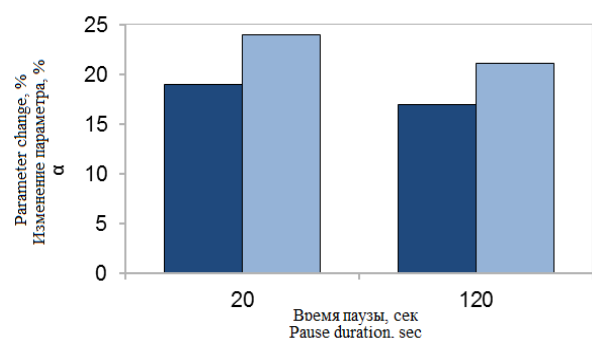


Рис. 2. Зависимость изменения величины тока от времени паузы за 15 циклов при времени работы 100 с: левые столбцы – низкоомные материалы (100 Ом), правые столбцы – высокоомные материалы (1000 Ом)

Fig. 2. Dependence of the current value change on the pause time for 15 cycles with operating time of 100 s: left columns – low-resistance materials (100 Ohm), right columns – high-resistance materials (1000 Ohm)

Известно, что влияние температуры на структуру полимерного композиционного материала во многом зависит от параметров цикла «нагрев–охлаждение» [4, 9–11]. Сделано предположение, что непропорциональное суммарное изменение параметра при изменении длительности паузы обусловлено нестабильностью объёмного электрического сопротивления, которое по циклам может не только уменьшаться, но и увеличиваться. Изменение во времени электрофизи-

ческих параметров материала с многокомпонентной структурой всегда имеет случайную составляющую. Для оценки тенденций временного ряда по изменению величины тока при работе в повторно-кратковременном режиме использовался показатель Херста. Он позволяет оценить характер долгосрочной зависимости стохастического процесса [12, 13].

Для корректной оценки влияния длительности паузы на величину тока была расширена программа эксперимента. По полученным экспериментальным данным за 50 циклов «нагрев–охлаждение» были исследованы временные ряды и построены графики изменения тока по циклам (рис. 3, 4). Применен метод нормированного размаха – (R/S) метод [13]. Временной процесс изменения анализируемого параметра оценивается по величине показателя Херста [13, 14]. Последовательности, для которых $0,50 < H \leq 1,00$, считаются персистентными (трендоустойчивыми). Они сохраняют имеющуюся тенденцию: наблюдаемый в данный момент рост параметра с высокой вероятностью будет наблюдаться и в дальнейшем и, соответственно, наоборот. При возрастании H тенденция усиливается. Диапазон $0 < H < 0,5$ соответствует антиперсистентным рядам: имеющаяся тенденция может смениться на противоположную: после возрастания переменной возможно ее уменьшение и наоборот. Вероятность таких проявлений увеличивается при уменьшении показателя Херста в области менее 0,5.

Испытания проводились по разработанной программе ЭВМ и методике, описанной в [15]. Показатель определялся по двум вариантам аппроксимации:

- 1) «gandom walk» – серия данных рассматривается как случайное блуждание со случайными приращениями (для временных рядов со скачкообразными изменениями благодаря сглаживанию графика при подсчете отклонения от среднего значения);
- 2) «change» – ряд состоит из случайных приращений (для временных рядов с плавными близкими между собой изменениями).

Обрабатывались экспериментальные данные, отражающие изменения величины тока (объемного электрического сопротивления) с течением времени при нагреве в повторно-кратковременном режиме работы. Временной ряд задавался выбором интервала между замерами величины тока при заданной величине напряжения в соответствии с рекомендациями, сформулированными в [15]. На основании полученных данных показатель Херста оценивался по разным циклам. Установлено, что характер аппроксимации существенно не влияет на закономерность изменения показателя Херста для рассматриваемых условий эксперимента и временных интервалов. Статистически значимых отличий при сравнении выборок не наблюдалось. Полученные результаты представлены на рис. 4.

Процесс изменения величины тока в повторно-кратковременном режиме на временном интервале 0–5 циклов характеризуется показателем Херста $0 < H < 0,5$ (рис. 3). Указанная выше тенденция сохраняется для исследованных режимов работы (рис. 4).

Процесс неустойчив в отношении трендов. В диапазоне 5–15 циклов значение H увеличивается и выходит из диапазона $0 < H < 0,5$ (рис. 3).

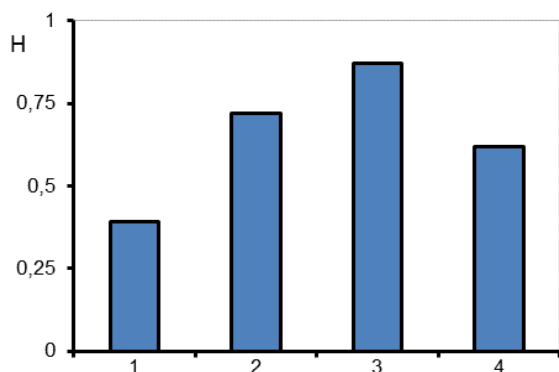


Рис. 3. Показатели Херста на различных временных интервалах: 1) 0–5 циклов; 2) 5–15 циклов; 3) 15–50 циклов; 4) 0–5 циклов после термотренировки

Fig. 3. Hurst exponents at different time intervals: 1) 0–5 cycles; 2) 5–15 cycles; 3) 15–50 cycles; 4) 0–5 cycles after thermal training

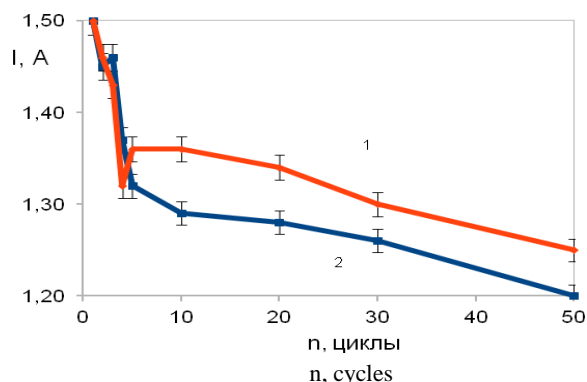


Рис. 4. Зависимость величины тока от количества циклов при разных параметрах режима работы: 1 – $t_p=10$ с; $t_n=110$ с; $t_p=10$ с; $t_n=20$ с

Fig. 4. Current value dependence on the number of cycles for different parameters of the operating mode: 1 – $t_w=10$ s; $t_p=110$ s; $t_w=10$ s; $t_p=20$ s

Данные, полученные в интервале 15–50 циклов (рис. 4), показали, что в этом временном интервале величина объемного электрического сопротивления изменяется значительно слабее, чем в предыдущие временные интервалы. Графики зависимости изменения величины объемного электрического сопротивления от времени характеризуется величиной показателя Херста $0,50 < H \leq 1,00$. Полученные значения дают основание полагать, что это трендоустойчивый временной процесс с долговременными корреляциями между текущим состоянием материала и состоянием его в будущем.

Вывод о возможности прогнозных оценок по показателю Херста для таких материалов проверялся экспериментально для резисторов-образцов при изменении длительности работы и длительности паузы (рис. 4).

Результаты экспериментов подтвердили, что характер изменения объемного электрического сопротивления во времени при увеличении длительности временного интервала существенно не изменяется: он также зависит от длительности временных интервалов, в которых выполнялся анализ.

При увеличенном количестве циклов сохраняются тренды, характерные для начальных циклов: возрастание и уменьшение величины объемного электрического сопротивления сменяют друг друга. На начальных циклах процесс может быть как антиперсистентный, так и персистентный (по крайней мере, в диапазоне величин токов, имеющих место в описываемых экспериментах).

Такая закономерность связана с тем, что в наполненных техническим углеродом каучуках при действии повышенных температур термостимулированные процессы реализуются на различных уровнях: электропроводящая сетка, погруженная в полимерную матрицу, единичный контакт «проводящая фаза – полимер – проводящая фаза». Распределение совокупности единичных контактов по свойствам с учетом их разброса по параметрам зависит от исходных компонентов в смеси [4, 16, 17].

Можно полагать, что изменение тепловой нагрузки на единичный контакт связано с физико-химическими процессами, обусловленными накоплением изменений в структуре материала, которые, в свою очередь, обусловлены длительным пребыванием при повышенной температуре [18–20]. В этой связи представляло интерес оценить возможность минимизации трендоустойчивых процессов с помощью термотренировки. Последняя осуществлялась в режиме интенсивный нагрева: 5 циклов, включающих нагрузку длительностью 100 с в каждом цикле и паузы длительностью 20 с. Начальный ток был равен 1,5 А.

Установлено, что предварительная термотренировка стабилизирует процессы на начальных циклах нагрева. Показатель Херста меняется от 0,39 до 0,62. Нестабильность величины тока после термотренировки уменьшается на 20–22 % по сравнению со значениями до термотренировки.

Заключение

Экспериментальными исследованиями влияния времени работы и времени паузы на изменения величины объемного электрического сопротивления наполненных техническим углеродом каучуков показано, что величина рабочего тока при исследованных временных параметрах уменьшается (объемное электрическое сопротивление увеличивается). Увеличение времени работы сопровождается таким же эффектом. Увеличение длительности паузы в циклическом режиме нагрузки увеличивает температурную стабильность объемного электрического сопротивления. На начальных циклах увеличение длительности паузы может влиять неоднозначно – не только увеличивать стабильность параметра, но и уменьшать ее.

Сделан вывод о том, что показатель Херста как одну из характеристик устойчивости временного ряда можно использовать в качестве дополнительного ин-

струмента для исследования поведения электропроводящих наполненных полимеров в повторно-кратковременном режиме нагрева. По результатам сравнения значений показателя Херста для исследованных временных интервалов выявлено, что его величина зависит от временного диапазона.

Установлено, что характер изменения величины объемного электрического сопротивления в начальных циклах нагрева является антиперсистентным независимо от длительности паузы. Далее временной ряд становится персистентным. Закономерность не зависит от длительности фазы нагрузки и паузы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Electrical conduction hysteresis in carbon black-filled butyl rubber compounds / M. Alzamil, K. Alfaramawi, S. Abboudy, L. Abulnagr // *International Journal of Modern Physics*. – 2018. – V. 32. – № 9. – P. 1–10.
2. Berki P., Göbl R., Karger-Kocsis J. Structure and properties of styrene-butadiene rubber (SBR) with pyrolytic and industrial carbon black // *Polymer Testing*. – 2017. – V. 61. – P. 404–415.
3. Effect of different carbon fillers on the properties of nitrile rubber composites / B. Szadkowski, A. Marzec, M. Zaborski, B. Szadkowski // *Composite Interfaces*. – 2019. – V. 26. – № 8. – P. 729–750.
4. Гуль В.Е., Шенфиль Л.З. Электропроводящие полимерные композиты. – М.: Химия, 1984. – 226 с.
5. Malas A., Das A. Influence of modified graphite flakes on the physical, thermo-mechanical and barrier properties of butyl rubber // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2017. – V. 69. – № 9. – P. 38–46.
6. Минакова Н.Н., Ушаков В.Я. Физико-технические основы создания высоконаполненных полимеров и управления их резистивными свойствами. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 260 с.
7. Минакова Н.Н., Ушаков В.Я. Полимерные композиционные материалы для мощных резисторов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 2. – С. 74–80.
8. Kraus G. Reinforcement of elastomers by carbon black // *Advances in Polymer Science*. – 1971. – V. 8. – P. 155–237.
9. Минакова Н.Н., Ушаков В.Я. Регулирование воспроизведения параметров полимерного резистора при повышенных температурах // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 10. – С. 7–13.
10. Gamlitskii Yu.A., Bass Yu.P. On the description of the phenomenon of filled elastomer strengthening // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2003. – V. 76. – № 3. – P. 591–596.

Сведения об авторах

Минакова Н.Н., доктор физико-математических наук, профессор кафедры прикладной физики, электроники и информационной безопасности Алтайского государственного университета.

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

Наличие трендов и их направленность должны учитываться при разработке материалов для электротехнических устройств, предназначенных для работы в повторно-кратковременных режимах. Минимизацию возможной трендонеустойчивости процесса на начальных этапах нагрева позволяет обеспечить термотренировка. Термотренировка позволяет повысить трендонеустойчивость процессов на начальных этапах нагрева, уменьшить нестабильность температурной зависимости объемного электрического сопротивления на начальном этапе процесса нагрева.

11. Song Yihu, Zheng Qiang. A guide for hydrodynamic reinforcement effect in nanoparticle filled polymers // *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. – 2016. – V. 41. – P. 318–346.
12. Beran J. Statistical methods for data with long-range dependence // *Statistical Science*. – 1992. – V. 7. – № 4. – P. 404–416.
13. Hurst H., Black R. and Simaury Y. Long-term storage. An Experimental Study. – London: Constable, 1965. – 145 p.
14. Столинг В. Современные компьютерные сети. – СПб: Питер, 2003. – 784 с.
15. Minakova N.N., Mansurov A.V. Hurst exponent-based analysis of the behavior of filled polymers in aggressive media. AIP Conference Proceedings, 2019. DOI: doi.org/10.1063/1.5132091
16. Anaraki N.I., Poursalehi R. Shielding effectiveness of polymeric nanocomposites filled with iron // *Procedia Materials Science*. – 2015. – № 11. – P. 700–705.
17. Advances in responsively conductive polymer composites and sensing applications / Chen Jianwen, Zhu Yutian, Huang Jinrui, Zhang Jiaoxia // *Polymer Reviews*. – 2020. – V. 61. – № 1. – P. 1–37.
18. An electrically conductive polymer composite with a co-continuous segregated structure for enhanced mechanical performance / Xu Ying-Te, Wang Yan, Zhou Chang-Ge, Sun Wen-Jin, Dai Kun, Tang Jian-Hua, Lei Jun, Yan Ding-Xiang, Li Zhong-Ming // *Journal of Materials Chemistry C*. – 2020. – V. 8. – P. 11546–11554.
19. Yang Guijun, Park Mira, Park Soo-Jin. Recent progresses of fabrication and characterization of fibers-reinforced composites // *Composites Communications*. – 2019. – V. 14. – P. 34–42.
20. Improved electrical conductivity of polymer/carbon black composites by simultaneous dispersion and interaction-induced network assembly / Zhang Bo-Yuan, Guo Bao-Hua, Jian Yu, Guo Zhao-Xia // *Composites Science and Technology*. – 2019. – V. 179. – P. 106–114.

Поступила 26.05.2021 г.

UDC 620.9: 538.9

FEATURES OF BEHAVIOR OF FILLED POLYMERS FOR RESISTORS UNDER A CYCLIC LOADING MODE

Natalya N. Minakova¹,
minakova@asu.ru

Vasily Ya. Ushakov²,
vush@tpu.ru

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

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

The relevance of the work is caused by the fact that ensuring uninterrupted power supply to enterprises in resource-extracting industries is an indispensable condition for their effective functioning. The latter, in its turn, is determined by the quality of protection of power-consuming equipment (primarily electric motors) from short-circuit currents and overvoltages in the supply network. Their limitation is provided by a set of measures; the most important of them is the use of high voltage bulk resistors capable of dissipating enormous power. In recent years, filled polymers have attracted the attention of specialists as materials for the manufacture of such resistors. Along with such their advantages as: the availability and low cost of starting materials, well-mastered technology for production of such compositions, they have a significant drawback – strong dependence of the specific volumetric resistance on temperature and, consequently, on the modes of their operation. Due to the variety of processes in filled polymers, stimulated by elevated temperatures, it is necessary to study their behavior depending on heating conditions. One of the most common modes of operation of polymer composite materials is repeated short-term exposure to current load, in which multiple changes in temperature occur, negatively affecting the stability of the resistor parameters. This makes it relevant to study the dynamics of volumetric electrical resistance, as the most important parameter of a resistor, in complex current load modes.

The purpose of the work is to assess the possibility of operating rubbers filled with carbon black in the «heating–cooling» mode: studying the spread of the current value depending on the current load, operating time and pause during heating with alternating current. Due to the multicomponent structure, the stability of the electro physical characteristics is largely determined by the mode of their operation.

Methods: instrumental measurements of electro physical characteristics of resistive polymer composite materials, statistical processing of measurement results, assessment of time series of changes in random parameters.

Results. The authors have revealed the dependences of the magnitude of the alternating current flowing in carbon black butadiene-nitrile rubbers on duration of operation and duration of pauses in intermittent operation. The authors established as well the possibility of an ambiguous effect of the pause duration on current value stability. The possibility of using the Hurst exponent for assessing the tendencies of the time series by the change in the current load (volumetric electrical resistance) in intermittent operation was confirmed. The dependence of the value of the Hurst exponent itself on the duration of the analyzed time interval is shown. On the basis of the studies carried out, the authors developed the recommendations for operation of rubbers filled with carbon black under repeated short-term exposure to current load.

Key words:

Power supply of resource-extracting industries, resource saving, filled polymers, resistors, volumetric electrical resistance, operating modes, instability of characteristics, elevated temperature, Hurst exponent.

REFERENCES

- Alzamil M.A., Alfaramawi K., Abboudy S., Abulnaser L. Electrical conduction hysteresis in carbon black-filled butyl rubber compounds. *International Journal of Modern Physics*, 2018, vol. 32, no. 9, pp. 1–10.
- Berki P., Göbl R., Karger-Kocsis J. Structure and properties of styrene-butadiene rubber (SBR) with pyrolytic and industrial carbon black. *Polymer Testing*, 2017, vol. 61, pp. 404–415.
- Szadkowski B., Marzec A., Zaborski M. Effect of different carbon fillers on the properties of nitrile rubber composites. *Composite Interfaces*, 2019, vol. 26, no. 8, pp. 729–750.
- Gul V.E., Shenfil L.Z. *Elektroprovodyashchie polimernye kompozity* [Electrically conducting polymer compositions]. Moscow, Khimiya Publ., 1984. 226 p.
- Malas A., Das A. Influence of modified graphite flakes on the physical, thermo-mechanical and barrier properties of butyl rubber. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, vol. 69, no. 9, pp. 38–46.
- Minakova N.N., Ushakov V.Ya. *Fiziko-tehnicheskie osnovy sozdaniya vysokonapolnennykh polimerov i upravleniya ikh rezistivnymi svoystvami* [Physical and technical foundations for creating highly filled polymers and controlling their resistive properties]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2003. 260 p.
- Minakova N.N., Ushakov V.Ya. Polymers with carbon fillers for powerful resistors. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 2, pp. 74–80. In Rus.
- Kraus G. Reinforcement of elastomers by carbon black. *Advances in Polymer Science*, 1971, vol. 8, pp. 155–237.
- Minakova N.N., Ushakov V.Ya. Regulation of reproduction of polymer resistor parameters at increased temperatures. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 10, pp. 7–13. In Rus.
- Gamlitskii Yu.A., Bass Yu.P. On the description of the phenomenon of filled elastomer strengthening. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2003, vol. 76, no. 3, pp. 591–596.
- Song Yihu, Zheng Qiang. A guide for hydrodynamic reinforcement effect in nanoparticle filled polymers. *Critical reviews in solid state and materials sciences*, 2016, vol. 41, pp. 318–346.
- Beran J. Statistical methods for data with long-range dependence. *Statistical Science*, 1992, vol. 7, no. 4, pp. 404–416.
- Hurst H., Black R. and Simairy Y. *Long-term storage. An experimental study*. London, Constable, 1965. 145 p.
- Stallings V. *Sovremennye kompyuternye seti* [Modern computer networks]. St-Petersburg, Piter Publ., 2003. 784 p.
- Minakova N.N., Mansurov A.V. Hurst exponent-based analysis of the behavior of filled polymers in aggressive media. *AIP Conference Proceedings*, 2019. DOI: doi.org/10.1063/1.5132091.

16. Anaraki N.I., Poursalehi R. Shielding effectiveness of polymeric nanocomposites filled with iron. *Wüstite Nanoparticles. Procedia Materials Science*, 2015, no. 11, pp. 700–705.
17. Chen Jianwen, Zhu Yutian, Huang Jinrui, Zhang Jiaoxia. Advances in responsively conductive polymer composites and sensing applications. *Polymer Reviews*, 2020, vol. 61, no. 1, pp. 1–37.
18. Xu Ying-Te, Wang Yan, Zhou Chang-Ge, Sun Wen-Jin, Dai Kun, Tang Jian-Hua, Lei Jun, Yan Ding-Xiang, Li Zhong-Ming. An electrically conductive polymer composite with a co-continuous segregated structure for enhanced mechanical performance. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, vol. 8, pp. 11546–11554.
19. Yang Guijun, Park Mira, Park Soo-Jin. Recent progresses of fabrication and characterization of fibers-reinforced composites. *Composites Communications*, 2019, vol. 14, pp. 34–42.
20. Zhang Bo-Yuan, Guo Bao-Hua, Jian Yu, Guo Zhao-Xia. Improved electrical conductivity of polymer/carbon black composites by simultaneous dispersion and interaction-induced network assembly. *Composites Science and Technology*, 2019, vol. 179, pp. 106–114.

Received: 26 May 2021.

Information about the authors

Natalya N. Minakova, Dr. Sc., professor, Altai State University.

Vasily Ya. Ushakov, Dr. Sc., Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 504.5:631.4:550.4-032.1

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОЧВ ТЕРРИТОРИИ С ВЫСОКОЙ АЭРОТЕХНОГЕННОЙ НАГРУЗКОЙ

Воробьева Дарья Андреевна¹,
vorobeyda18@gmail.com

Гусева Наталья Владимировна¹,
gusevanv@tpu.ru

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

Актуальность исследования обусловлена тем, что почва, являясь связующим звеном между геосферами Земли, играет важнейшую роль как в экономическом, так и в социальном развитии территорий. Почвы имеют большое экологическое значение, выходящее далеко за сельскохозяйственные рамки, и при этом часто находятся под влиянием техногенных факторов, способных привести к изменению течения геохимических процессов (как, например, на Кольском полуострове, где сконцентрированы купные горнодобывающие и металлургические предприятия). Поэтому встает вопрос о различии геохимических характеристик почв, в том числе фракционного состава соединений химических элементов, техногенно-трансформированных и фоновых территорий.

Цель: оценка геохимической специфики почв, в том числе фракционного состава соединений химических элементов, территории с высокой аэротехногенной нагрузкой.

Объекты: почвы территории с высокой аэротехногенной нагрузкой (район водосбора озера Имандра, Мурманская область).

Методы. Фракционный состав соединений химических элементов в почвах определялся методом последовательных селективных вытяжек из одной навески. Химический анализ вытяжек проводился с использованием масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS). Минералогический состав почв изучался методами рентгенофазового анализа и электронной микроскопии.

Результаты. Исследования показывают, что большинство химических элементов остается связано в остаточной фракции. Однако на рассматриваемой территории основная доля редкоземельных элементов – Na, Rb, Sb, Zr, Pb и U – связана с органическим веществом. Влияние выбросов медно-никелевого комбината отражено в увеличении концентрации меди и никеля в иллювиальном горизонте почв, присутствии микроминеральных фаз оксидов никеля и меди и соединений редкоземельных элементов, а также в увеличении в доли подвижных форм Ni и Cu, Cr, Co, Cd, As, Sb.

Ключевые слова:

Фракционирование, селективные вытяжки, почва, аэротехногенная нагрузка, Кольский полуостров.

Введение

В экосистемах различного масштаба все компоненты связаны между собой потоками вещества и энергии, что обеспечивает цикличность процессов, устойчивость экосистем во времени и высокое качество природных сред. Однако эти же самые процессы способствуют и распространению материальных загрязнителей со всеми вытекающими для экосистем последствиями. Влияние антропогенных факторов может приводить к нарушению естественных потоков и перераспределению химических элементов в компонентах окружающей среды [1–3].

Почва является узлом экологических связей всех приповерхностных геосфер Земли. Она наделена многочисленными глобальными функциями, деградация которых может обернуться для цивилизации самыми тяжелыми последствиями [4]. Экологическое значение почвы выходит далеко за рамки сельскохозяйственных работ. Установлено, что почва является биогеохимическим барьером для проникновения «аэротехногенных» тяжелых металлов в подземную гидросферу [5]. При длительном воздействии происходит снижение сорбционных свойств почвы и ее деградация. Подобная проблема отмечается в районах влияния горно-металлургических заводов во Франции, США, Канаде, Иране, Южной Корее, Китае и др. [6–10].

При поступлении загрязняющих веществ, например тяжелых металлов, с атмосферными осадками определяющим будет их поведение и перераспределение в почвенном горизонте. Процессы осаждения или вторичного высвобождения химических элементов будут оказывать влияние на состояние других компонентов окружающей среды. Решающая роль в распределении, миграции и концентрировании химических элементов принадлежит не столько их валовому содержанию, сколько формам нахождения химических элементов в природных объектах. В результате длительного антропогенного воздействия происходит не только значительное обогащение почв загрязняющими элементами, но и меняется их соотношение в различных формах [11].

В геохимии, геологии, геоэкологии и почвоведении используются различные методы и приемы оценки форм нахождения элементов в горных породах, донных осадках и почвах, среди которых основными являются методы химического фракционирования, в том числе последовательная экстракция из одной навески [12]. Метод постадийных вытяжек нашел применение при изучении структуры геохимических полей, геохимических поисках полезных ископаемых, изучении геохимии почвенного покрова, определении

геохимических аспектов техногенного воздействия и охраны окружающей среды [12–17].

Выявление форм нахождения микроэлементов в почвах позволяет охарактеризовать особенности распределения элементов в почвенных разрезах, находящихся в естественном либо измененном под техногенным воздействием состоянии. Кроме этого, соотношение форм нахождения химических элементов в почвах определяет способность почвы выполнять ее основные экологические функции и как природного тела, и как источника плодородия и защиты природных сред от загрязнения, а также определяет влияние почв на сопредельные геосферы [11].

Целью работы является выявление особенностей соотношения форм нахождения химических элементов в почвах территории с высокой аэротехногенной нагрузкой.

Объект и методы исследования

Район исследования. Районом исследования является западная часть территории водосбора озера Большая Имандра в центральной части Мурманской области (Кольский полуостров, северо-запад России). В геологическом отношении район исследования располагается в пределах восточной части Балтийского щита, сложенного породами кристаллического фундамента, перекрытыми рыхлыми четвертичными отложениями. Территория представляет собой холмистую равнину с участком техногенной пустоши. В геологическом строении здесь принимают участия основные и ультраосновные породы, перекрытые моренными озерно-ледниковыми и флювиогляциальными отложениями [18].

Климат умеренно-холодный, со среднегодовым количеством осадков и температурой 553 мм и $-0,8^{\circ}\text{C}$ соответственно. Преобладающее направление ветра – с севера на юг летом и с юга на север зимой. Основной тип почвы подзолистые. На Кольском полуострове типичны подзолы малой мощности – 15–50 см [19]. Для подзолов характерен дифференцированный профиль, состоящий из подстилки толщиной 3–8 см, беловатого, осветленного за счет удаления красящих соединений железа и перегноя подзолистого или элювиального горизонта (Е) толщиной от 2 до 20–30 см; иллювиального горизонта коричневых или охристых тонов (В), образовавшегося в результате иллювиального накопления алюминиево-железисто-гумусовых комплексных соединений, постепенно переходящего в материнскую породу (С) [20].

На исследуемой территории расположено одно из крупнейших промышленных предприятий Мурманской области – медно-никелевый комбинат «Североникель» (Кольская горно-металлургическая компания, построен в 1930-е гг.), находящийся в Мончегорске. Выбросы Кольской горно-металлургической компании (в совокупности от предприятий «Североникель» в Мончегорске и «Печенганикель» в городах Никель-Заполярный) снизились с 1627,1 т в 1998 г. до 348,9 т в 2017 г. для никеля, с 1062,2 до 486,9 т для меди за тот же период. В настоящее время на комбинате в Мончегорске перерабатывается медно-никелевый

штейн и завершается технологический цикл производства товарной продукции компании [2].

Материалы и аналитические методы. В соответствии с преобладающим направлением ветра во время полевых исследований летом 2016 г. было проведено погоризонтное опробование почв. Точки опробования расположены по мере удаления от источника пылегазовых выбросов (комбината «Североникель»).

Для оценки накопления тяжелых металлов в разных типах почв особое значение имеет структура их вертикального профиля (от поверхности почвы до материнской породы). Как правило, почвенный профиль состоит из нескольких слоев, называемых генетическими горизонтами, поскольку они образовались в результате почвообразовательных процессов, обусловленных генезисом почвы [20]. Сочетание различных горизонтов определяет характер накопления, миграции и перераспределения химических элементов, в том числе загрязняющих веществ, по почвенному профилю.

Для исследования были выбраны два почвенных разреза, относящихся к подзолисто-му типу почв:

- пункт опробования СП-8 ($N\ 67^{\circ}52'22,8''$ $E\ 32^{\circ}47'11,59''$) расположен в 7 км в южном направлении от медно-никелевого комбината (у родника «Габбрский»). Верхний горизонт О эродирован, далее подзолистый горизонт Е (глубиной 1–8 см) и иллювиальный горизонт В (8–24 см).
- пункт опробования СП-10 ($N\ 67^{\circ}51'14,68''$ $E\ 32^{\circ}47'54,42''$) расположен в 15 км в южном направлении от комбината. Почвенный профиль представлен подстилкой О (0–4 см); подзолистым горизонтом Е (4–10 см); иллювиальным горизонтом, который по степени выраженности признаков подразделяется на горизонты В1 (10–17 см) и В2 (17–24 см); горизонтом С (24–48 см). Растительность представлена елью, березой, черникой, вороникой.

Образцы почвы, высушенные естественным путем на воздухе, просеивались через сито с диаметром пор 1 мм для удаления крупных корней растений и гравийного материала. Для определения общей концентрации металлов небольшую порцию каждого образца почвы взвешивали, помещали в полипропиленовый сосуд разложения, а затем обрабатывали HNO_3 в микроволновой печи. Концентрации химических элементов определяли с использованием масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой NexION 300 (Perkin-Elmer, США) в аккредитованной проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии ТПУ.

Определение фракционного состава соединений химических элементов в почвах проводилось методом последовательных селективных вытяжек по R. McLagen и D. Crawford [21] с изменениями Д. Ладонина [22].

В основе этого метода лежит применение экстрагирующих растворов, разрушающих в почвенном образце определенный тип химической связи элементов с твердофазными компонентами или сам компонент, после чего в раствор переходят химические элементы, входящие в одну группу соединений или фракцию [22].

Были выделены следующие шесть фракций [22, 23]:

I. Водорастворимая фракция является легкодоступным источником питания растений и представлена свободными ионами или комплексными соединениями.

II. Обменная фракция – поведение химических элементов определяется процессами ионного обмена. Эта фракция выделяется экстрагированием 0,05 М Ca(NO₃)₂ за счет разрушения слабых электростатических взаимодействий, удерживающих химические элементы.

III. Специфически сорбированная фракция выделяется 2,5 % раствором уксусной кислоты. Сюда относится вся совокупность химических элементов, удерживаемая почвенными компонентами за счет связей, отличных от ионной (то есть необменно), например, при закреплении на дефектах кристаллических решеток.

IV. Фракция, связанная с органическим веществом, выделяется путем его разрушения K₄P₂O₇ в щелочных условиях (рН 11).

V. Фракция, связанная с оксидами и гидроксидами железа и марганца, выделяется с помощью реактива Тамма при облучении ультрафиолетом при рН 3,3 и включает химические элементы, образующие прочные комплексы на поверхности железомарганцевых конкреций.

VI. Остаточная фракция содержит химические элементы, прочно закрепленные в кристаллических решетках минералов почвы, которые невозможно извлечь применением перечисленных выше экстрагентов. Выделяется путем разложения остатка HNO₃ в микроволновой печи.

Для экстракции навеску помещают в центрифужные пробирки и добавляют экстрагирующий раствор (соотношение почва:экстрагирующий раствор 1:10). Пробирки встряхивают 1 час, затем проводят центрифугирование. Получившийся раствор отправляют на аналитические исследования. Остаток почвы после предыдущих обработок заливают следующим экстрагирующим раствором. Химический анализ вытяжек проводился масс-спектрометрическим методом с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS).

Минералогический состав почв изучался методами рентгенофазового анализа и электронной микроскопии в лаборатории МИНОЦ «Урановая геология» ТПУ.

Результаты и их обсуждение

Почва является депонирующей средой, накапливающей химические элементы. Особенную значимость это приобретает в условиях длительной техногенной нагрузки [24]. Почвы Кольского полуострова достаточно хорошо исследованы в разных аспектах в связи с высоким уровнем антропогенного влияния [2, 25–27]. Установлено, что в верхних органических горизонтах почвы зафиксированы чрезвычайно высокие концентрации Ni и Cu [2, 25]. Концентрации Ni, Cu, Cd, Pb, и Co в верхнем горизонте почвы выше, чем в иллювиальном [2]. Это говорит о том, что данные химические элементы поступают из загрязненной атмосферы [2, 8, 28, 29].

В сравнении с кларками верхней части континентальной коры, по А. Ярошевскому [30], для рассматриваемых почв наблюдается пониженное содержание большинства элементов, в том числе редкоземельных. Исключения составляют Br, I и Cl, что объясняется близостью моря, а также Te, Se – элементы, которые попутно извлекают из медно-никелевой руды (табл. 1).

Таблица 1. Значения коэффициентов концентраций химических элементов в почве относительно кларков химических элементов верхней части континентальной коры по А. Ярошевскому [30]

Table 1. Values of the chemical elements concentration coefficients in the soil relative to the chemical elements clarkes of the continental crust upper part according to A. Yaroshevsky [30]

Пункт (расстояние до комбината) Point (distance to the enterprise)	Почвенный горизонт Soil horizon	Геохимические ряды Geochemical series
СП-8/SP-8 (7 км/км)	E	Te _{19,2} -Br _{6,3} -Se _{1,39} -Ag _{1,22} -Cl _{0,8} -I _{0,65} -Cu _{0,54} -As _{0,26} -Pd _{0,2} -Pb _{0,17} -Ni _{0,13} -Cd _{0,12}
	B	Br ₃₀₃ -I _{56,3} -Te _{26,9} -Se _{12,3} -Cl _{5,05} -Cu _{1,26} -Ag _{1,15} -Ni _{1,05} -Cd _{0,85} -Pd _{0,69} -Cr _{0,68} -Ga _{0,38} -As _{0,36} -Fe _{0,35} -Co _{0,31} -Al _{0,28} -P _{0,27} -V _{0,24} -Zn _{0,16} =Li-Pb _{0,15} -In _{0,13} =Mo-Mn _{0,12} =Sc-Mg _{0,11} =Ti
СП-10/SP-10 (15 км/км)	E	Te _{8,34} -Br _{3,2} -Cl _{1,49} -Se _{0,9} -I _{0,69} -Ag _{0,64} -Pb _{0,31} -Cd _{0,28} -Ni _{0,21} =Cu-Pd _{0,2} -As _{0,18}
	B1	Br _{72,8} -I _{30,1} -Te _{10,6} -Se _{7,03} -Cl _{4,69} -Ag _{0,63} -Cr _{0,55} -Fe _{0,5} -Ni _{0,42} -P _{0,41} -V _{0,38} -Pd _{0,36} -Ga _{0,33} -Ti _{0,32} -Cu _{0,31} -Co _{0,28} =Zn-Cd _{0,27} -Al _{0,25} -Li _{0,22} -In _{0,2} -Sc _{0,18} -Eu _{0,15} =Pb=Cs=As-Dy _{0,13} =Mn-Gd _{0,12} -Th _{0,11} =Er=Tm=Tb
	B2	Br _{90,3} -I ₂₃ -Se _{5,85} -Cl _{2,79} -Te _{1,46} -Ag _{1,05} -Cu _{0,65} -Ni _{0,64} -Pd _{0,45} -P _{0,37} -Co _{0,33} -Pr _{0,27} -Li _{0,26} -La _{0,24} =Eu=Nd=Cr-Cd _{0,23} -Gd _{0,22} =Sm-Al _{0,21} -Zn _{0,19} -Fe _{0,18} -Ga _{0,16} =V-Dy _{0,15} =As=Tb=Mg-Y _{0,14} -Th _{0,13} -Sc _{0,12} =Er-Ti=Ho-Cs _{0,11} =Pb-Tm _{0,1} =Yb
	C	Br _{83,9} -I _{16,96} -Se _{6,44} -Te _{1,9} -Cl _{1,78} -Cu _{0,69} -Pd _{0,67} -Ni _{0,53} -P _{0,36} -Co _{0,32} -Pr _{0,31} -Eu _{0,3} -Nd _{0,28} -Sm _{0,26} =La=Gd-Ag _{0,25} -Cr _{0,23} -Cd _{0,22} -Li _{0,21} -Al _{0,19} =Dy-Th _{0,18} =Ga=Tb-Fe _{0,17} =Y-V _{0,16} -Er _{0,15} =Ho=As-Mg _{0,13} =Tm=Zn=Yb=Ti-Lu _{0,12} =Pb=Sc-U _{0,1}

Холодная местность с хорошим промывным режимом способствует формированию подзолистого горизонта E, обедненного химическими элементами относительно других минеральных горизонтов (рис. 1).

А в иллювиальном горизонте B, согласно особенностям генетического профиля подзолистых почв, происходит концентрирование химических элементов. Это находит отражение геохимических рядах (табл. 2), где для иллювиальных горизонтов наблюдается большее количество элементов с коэффициентом концентрации >1 (по среднему содержанию элементов в выборке, согласно исследованиям авторов).

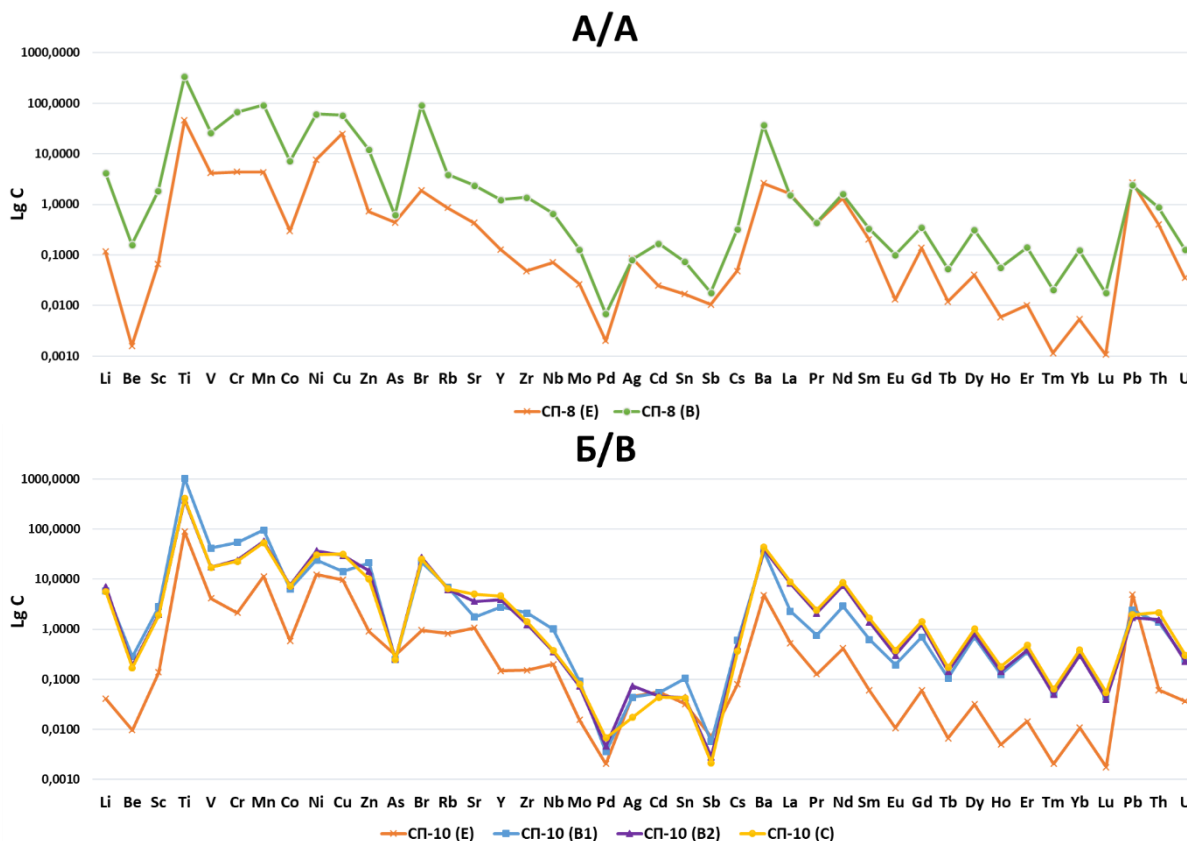


Рис. 1. Содержание химических элементов в подзолистом E, иллювиальном B горизонтах почв и материнской породе C в пунктах опробования СП-8 (А) и СП-10 (Б) исследуемой территории (мг/кг, шкала логарифмическая)

Fig. 1. Chemical elements content in E, B and C soil horizons in SP-8 (A) and SP-10 (B) sampling point of the study area (mg/kg, logarithmic scale)

Таблица 2. Значения коэффициентов концентраций химических элементов в почве относительно среднего содержания элементов в выборке (n=28)

Table 2. Values of the chemical elements concentration coefficients in the soil relative to the average content of elements in the sample (n=28)

Пункт (расстояние до комбината) Point (distance to the enterprise)	Почвенный горизонт Soil horizon	Геохимические ряды Geochemical series
СП-8/SP-8 (7 км/км)	E	Au _{1,3} -Sb _{1,2} =Re-Cu _{1,1} =Pb-Os ₁
	B	Cd _{3,4} -Cr _{2,6} =Cu-Sb _{2,1} -Hg ₂ = Ni-In _{1,8} -Fe _{1,6} -Al _{1,4} =V= Co=Ga=Ir=Bi-Sn _{1,3} -Sc _{1,2} = Os-As _{1,1} =Au-Pb ₁
СП-10/SP-10 (15 км/км)	E	Pb ₂ -Bi _{1,2} -Cd _{1,1}
	B1	In _{2,7} -Au _{2,6} -Ti _{2,5} -Fe _{2,3} -V _{2,2} - Cr _{2,1} -Hg ₂ -Sc _{1,8} =Sn-Cs _{1,4} - Al _{1,3} =Tl-Co _{1,2} =Ga=Rb-Li _{1,1} - Cd=Lu-Mn ₁
	B2	Re ₂ -Tl _{1,5} -Li _{1,4} =Co=Cu-Sc _{1,3} - Ni _{1,2} -Rb _{1,1} =In-Al ₁ =Ba=Cs
	C	Tl _{1,6} -Co _{1,4} =Cu- Sc _{1,3} =Lu=Re=Hg- Rb _{1,2} =Y=Ce=Yb- Li _{1,1} =Ba=Er=Tm

При переходе от горизонта E к горизонту B происходит увеличение концентраций редкоземельных элементов, причем для тяжелых элементов эта разли-

ца гораздо больше (может достигать почти до трех десятков раз), чем для легких.

Формирование в почвенном профиле горизонтов транзита или вымывания и аккумуляции (вымывания) веществ происходит при перераспределении химических элементов, поступающих с миграционными потоками, между растворенной, подвижной и прочносвязанной формами [11].

Однако для As, Cd, Sb и Pb в пункте СП-10 отмечено их преобладание в подзолистом горизонте, в отличие от пункта СП-8, что может быть связано с эродированностью здесь верхней части почвенно-растительного слоя.

Техногенное воздействие прослеживается в относительном увеличении концентраций химических элементов в 7 км от комбината (СП-8) относительно пункта в 15 км (СП-10): для горизонта E – Li, Cr, Cu, As, Br, Mo, Ag, Sb, La, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho Th; для горизонта B – V, Cr, Mn, Ni, Cu, As, Br, Nb, Mo, Pd, Cd, Sn, Sb, Pb.

В силу особенностей природных и техногенных факторов никель и медь признаны основными элементами-загрязнителями на Северо-Западе России, как приоритетные компоненты выбросов комбинатов медно-никелевого производства [24, 29]. Их значительное концентрирование наблюдается в иллювиальном горизонте в 7 км от источника пылегазовых выбросов (рис. 2).

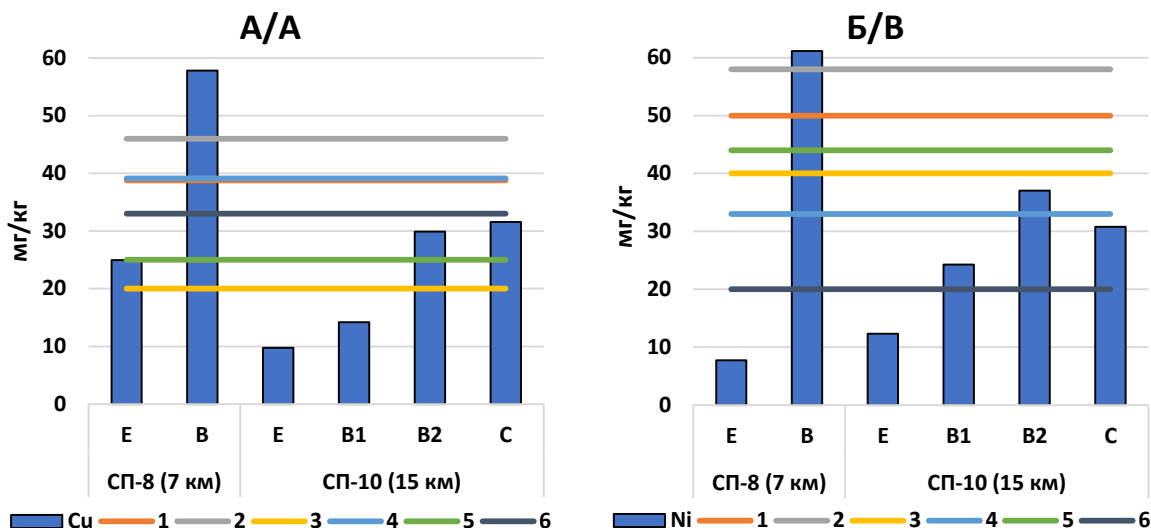


Рис. 2. Сопоставление концентраций меди (А) и никеля (Б) в исследуемых почвах с: 1 – средним содержанием в верхней части континентальной коры по Н. Григорьеву [31]; 2 – кларком верхней части Земной коры по А. Ярошевскому [30]; 3 – кларком почв Земли по В. Алексеенко [32]; 4 – кларком городских почв по В. Алексеенко [32]; 5 – средней концентрации в верхней части континентальной коры по S. Taylor, S. McLennan [33] (с обновлением для никеля S. McLennan [34]); ОДК для песчаных и супесчаных почв по СанПиН 1.2.3685-21 [35]

Fig. 2. Comparison of copper (A) and nickel (B) concentrations in the studied soils with: 1 – average content in the upper part of the continental crust according to N. Grigoriev [31]; 2 – clark of the upper part of the Earth's crust by A. Yaroshevsky [30]; 3 – clark of the Earth soils according to V. Alekseenko [32]; 4 – clark of urban soils by V. Alekseenko [32]; 5 – average concentration in the upper part of the continental crust by S. Taylor and S. McLennan [33] (updated for nickel by S. McLennan [34]); approximate permissible concentration for sandy and sandy loam soils according to SanPiN 1.2.3685-21 [35]

Здесь содержания меди и никеля превышают кларковые значения, в том числе ориентировочно допустимые значения (ОДК) содержания химических веществ в почвах: для меди в 1,75 раз, для Ni в 3,1 раза.

Согласно результатам рентгенофазового анализа, в составе исследуемых почв преобладают Ca-Na-Mg-K

алюмосиликаты (табл. 3). В пункте СП-10 основными минералами в составе почв являются магнезиогорнблендит, кварц и альбит. В горизонте В2 предположительно встречен титанит.

В пункте СП-8 присутствует железосодержащий актинолит, содержание которого в горизонте В составляет 43,3 %.

Таблица 3. Минералогический состав почв по результатам рентгенофазового анализа (процент содержания каждого минерала указан в скобках)

Table 3. Mineralogical composition of soils according to the results of X-ray phase analysis (the percent of each mineral is in parenthesis)

Почвенный горизонт Soil horizon	Пункт (расстояние до комбината)/Point (distance to the enterprise)					
	СП-8/SP-8 (7 км/км)	СП-10/SP-10 (15 км/км)				
Е	кварц/quartz (39,7) анортит/anorthite (23,3) альбит/albite (21,1) энстатит/enstatite (10,5) актинолит/actinolite (5,1) анальцим/analcime (0,2) шабазит/chabazite (0,1)	кварц/quartz (40,1) анортит/anorthite (26,4) альбит/albite (23,5) магнезиогорнблендит/magnesiohornblende (10,9) анальцим/analcime (0,4)				
В	актинолит/actinolite (43,3) альбит/albite (22,1) анортит/anorthite (22,0) кварц/quartz (12,1) цеолит/zeolite (0,4)	<table border="1"> <thead> <tr> <th>В1</th> <th>В2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>магнезиогорнблендит/magnesiohornblende (31,7) кварц/quartz (25,1) альбит/albite (23,6) микроклин/microcline (9,8) клинохлор/clinochlore (9,5) цеолит/zeolite (0,3)</td> <td>магнезиогорнблендит magnesiohornblende (37,8) альбит/albite (26,0) кварц/quartz (16,5) микроклин/microcline (8,7) клинохлор/clinochlore (4,6) титанит/titanite (3,1) форстерит/forsterite (2,8)</td> </tr> </tbody> </table>	В1	В2	магнезиогорнблендит/magnesiohornblende (31,7) кварц/quartz (25,1) альбит/albite (23,6) микроклин/microcline (9,8) клинохлор/clinochlore (9,5) цеолит/zeolite (0,3)	магнезиогорнблендит magnesiohornblende (37,8) альбит/albite (26,0) кварц/quartz (16,5) микроклин/microcline (8,7) клинохлор/clinochlore (4,6) титанит/titanite (3,1) форстерит/forsterite (2,8)
В1	В2					
магнезиогорнблендит/magnesiohornblende (31,7) кварц/quartz (25,1) альбит/albite (23,6) микроклин/microcline (9,8) клинохлор/clinochlore (9,5) цеолит/zeolite (0,3)	магнезиогорнблендит magnesiohornblende (37,8) альбит/albite (26,0) кварц/quartz (16,5) микроклин/microcline (8,7) клинохлор/clinochlore (4,6) титанит/titanite (3,1) форстерит/forsterite (2,8)					
С	–	альбит/albite (35,4) магнезиогорнблендит/magnesiohornblende (28,5) кварц/quartz (23,3) микроклин/microcline (12,5) цеолит/zeolite (0,2)				

Согласно [36], в исследованном районе встречаются аморфные неорганические твердые фазы – гели: гидрогелит-гель, нонтронит, гидрослюда, гель гидрооксид кремния (опал) и прочее.

Микроминеральные фазы характерных химических элементов, обнаруживаемые с помощью электронной микроскопии, отражают не только природный минералогический состав почвы, но и наличие техногенного влияния. Исследование образцов показывает, что в рассматриваемых почвах наиболее часто встречаются частицы оксидов железа, титана и алюминия.

Также в подзолистом горизонте в зоне влияния комбината встречаются соединения циркония.

В пункте опробования СП-8, расположенном в 7 км от источника пылегазовых выбросов, где наблюдаются максимумы валовых концентраций основных загрязнителей региона (для горизонта В Ni – 61,16 мг/кг, Cu – 57,83 мг/кг), обнаружены собственные минеральные фазы меди и никеля.

Здесь же в подзолистом горизонте почвы обнаружены частицы с содержанием редкоземельных элементов.

Оценка опасности загрязнения не ограничивается только определением валового содержания химических элементов, поскольку геохимическая подвижность и токсическое действие загрязнителей определены не только их массовым поступлением, но и зависит от их форм и характера закрепления минеральными и органическими носителями [37].

Фракционный состав. В системе соединений химических элементов почвы выделяется «матрица» – прочносвязанные соединения, которые составляют ядро системы и отражают единство почв одного генетического ряда [11]. В спектре постадийных вытяжек она соответствует остаточной фракции. Результаты эксперимента показывают, что большинство химических элементов связано в остаточной фракцией (IV). На нее в среднем приходится от 60 до 99 % от общего содержания химических элементов.

Подвижные соединения свидетельствуют о влиянии на почвы изменяющихся внешних условий, которые обеспечивают пространственное и временное разнообразие свойств почв [11].

Так, для Sr 56–86 % от суммы составляет обменная фракция (II), причем для любых почвенных горизонтов (табл. 4).

Таблица 4. Распределение химических элементов по фракциям (% от суммы всех фракций) в образцах исследуемых почв
Table 4. Distribution of chemical elements by fractions (% of the sum of all fractions) in the studied soils samples

Пункт (расстояние до комбината) Point (distance to the enterprise)	Почвенный горизонт Soil horizon	Фракции/Fractions				
		I Водорастворимая Water-soluble	II Обменная Exchangeable	III Специфически сорбированная Specifically sorbed	IV Связанная с органическим веществом Bound to organic matter	V Связанная с (гидро)оксидами Fe и Mn Bound to Fe and Mn oxides
СП-8/SP-8 (7 км/км)	Е	<i>Br</i>	Be Ni Sr Rh <i>Mg Mn Co Cu</i> <i>Se Cd Ba</i>	Cu	Na Sc Zn Se Rb Zr Sb Yb Lu U Be Cr As Y Rh Ho Er <i>Tm Pb Ti Mo Al V Fe Dy</i>	Mo Sc
	В	–	Sr Cd Ba	Cu Cd Ba	Rb Sb Sc Se Zr Lu U Mo Ti <i>Cr As Y La Ce Pr Nd Sm Eu</i> <i>Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Pb</i>	Mo Ni
СП-10/SP-10 (15 км/км)	Е	–	Co Ni Cd Mg Sr Zn Ba Mn	<i>Cu</i>	Sb Zn Sc Lu Na Zr Rb U_{Ge} <i>Te Ti Er Fe Ho Cr Y Dy Pb</i> <i>Mo Al Si</i>	Cu Sn Mo Si
	В1	–	Sr Ba	<i>Be</i>	Na Se Sb Rb Sc Mo U_{Zr} Al <i>Ti Cr Zn Mn Co As Br Y I Ce</i> <i>Pr Nd La Ho Sm Gd Eu Tb Er</i> <i>Tm Dy Yb Lu Pb Th</i>	Mo Sn Cu
	В2	–	Sr Ba	–	Na Sb Rb Lu Pb U_{Sc Mo Zr} <i>Ti Zn Ge As Br Y I Ba Pr Gd</i> <i>Ce Sm Eu Nd Tb Dy Ho La</i> <i>Er Yb Tm Th</i>	Mo Cu I
	С	–	Sr Ba	Be Ge Y Ba La	Na Rb Zr Sb Lu Pb U_{Sc As} <i>Se Mo Be Ti Zn Br Y I In Tb</i> <i>Nd Sm Yb Eu Pr Gd Dy Ho</i> <i>Er Tm Th</i>	Sn Mo Cu I In

Примечание: преобладающая фракция элементов % от суммы всех фракций (после остаточной, т. е. вторая по величине): выделено жирным – если фракция преобладает над остаточной (т. е. эта фракция по содержанию на первом месте), курсивом – фракция занимает второе место после остаточной, но ее % очень значителен.

Note: the predominant fraction of elements % of the sum of all fractions (after the residual, i. e. the second largest): highlighted in bold if the fraction prevails over the residual (i. e. this fraction is in the first place in terms of content), italic – the fraction takes the second place after residual, but its % is very significant.

Кроме остаточной фракции барий активно представлен в обменной при том, что для горизонта Е это 22–32 %, тогда как для горизонтов В и С – только 10–15 %.

Для никеля характерно преобладание обменной формы (40–60 % от суммы всех фракций) в подзолистом горизонте Е, однако в точке СП-10 доля этого

элемента, связанного с органическим веществом, возрастает до 14 %. Это может быть связано с сохранностью здесь подстилки и органогенного горизонта.

Для меди отмечено почти равное распределение по пяти фракциям (II–III–IV–V– VI) – от 12 до 26 % от суммы всех фракций в подзолистом горизонте

(рис. 3). В иллювиальном горизонте отмечено увеличение доли специфически сорбированной фракции (III) меди в 7 км от комбината, а в 15 км – связанной с (гидр)оксидами железа и марганца (V).

Микроэлементы, связанные с органическим веществом вследствие его относительно невысокой доли содержания и значительно меньшей устойчивости по сравнению с минеральными носителями, оказывают меньший вклад в общий уровень содержания микро-

элементов в почве [11]. Однако, как видно из табл. 3, органическое вещество играет важную роль в связывании многих химических элементов (в том числе редких земель) в рассматриваемых почвах. Доказано, что фульвокислоты, как и гуминовые кислоты, формируют с лантаноидами прочные комплексные соединения [38]. Для таких элементов, как Na, Rb, Sb, часто для Zr, Lu, Pb, U, фракция, связанная с органическим веществом, является ведущей.

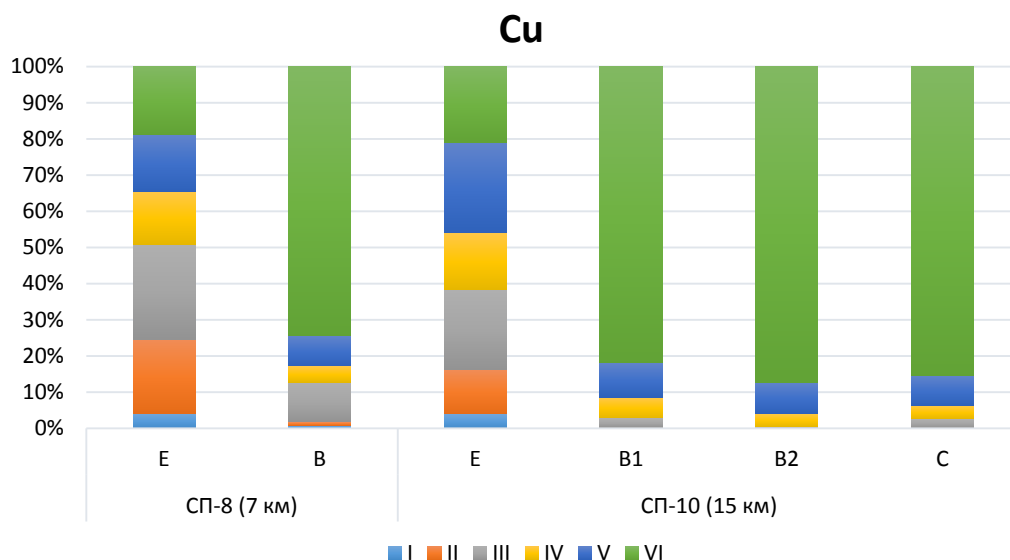


Рис. 3. Фракционный состав меди в почвенных горизонтах (% от суммы всех фракций)
Fig. 3. Copper fractional composition in soil horizons (% of the sum of all fractions)

Основная часть молибдена приходится на фракцию, связанную с оксидами и гидроксидами Fe и Mn (40–64 %), и органическим веществом (23–31 %).

Организация системы соединений микроэлементов в загрязненных почвах – совместный результат влияния техногенных факторов и буферных свойств природной системы соединений химических элементов в почвах [11]. В рассматриваемых почвах отмечается повышение содержания Co, Ni, Cu, Cd, As, Sb в водорастворимой форме до 3,5–14 % в подзолистом и 1–2 % в иллювиальном горизонте. Увеличение доли подвижных форм, определяющих высокую миграционную способность и биодоступность тяжелых металлов, является основным следствием техногенного загрязнения [39].

Заключение

В целом влияние выбросов медно-никелевого комбината прослеживается в увеличении концентрации меди и никеля в иллювиальном горизонте почв, превышающих ОДК, и присутствии микроминеральных фаз оксидов никеля и меди и соединений редкоземельных элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бородина Н.А., Голов В.И. Содержание различных форм Cu, Zn и Mn в почвах города Благовещенск (Амурская область) // Вестник ДВО РАН. – 2013. – № 5. – С. 69–76.

Важное значение имеет то, что в почвах зоны интенсивного воздействия выбросов медно-никелевого производства, по сравнению с более удаленными от источника выбросов, увеличивается содержание и доля подвижных форм основных поллютантов региона – Ni и Cu, а также Cr, Co, Cd, As, Sb, и, соответственно, их биодоступность. Такое распределение микроэлементов в спектре постадийных вытяжек можно рассматривать как индикатор техногенного загрязнения окружающей среды.

На рассматриваемой территории важную роль в удержании химических элементов играет органическое вещество. С ним связана основная доля редкоземельных элементов, Na, Rb, Sb, Zr, Pb и U.

Таким образом, почва является естественным буфером, связывающим химические элементы, поступающие из загрязненной атмосферы. Поэтому этап инфильтрации атмосферных осадков через почву приобретает значительную роль в формировании химического состава всех компонентов окружающей среды, включая сами почвы, растения и подземные воды.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-90077, 18-55-80015.

2. Елсукова Е.Ю., Опекунова М.Г., Опекунов А.Ю. Техногенная трансформация потоков тяжелых металлов в почвах в зоне воздействия медно-никелевого производства // Международный научно-исследовательский журнал. – 2019. – № 12-1 (90). –

- C. 118–124. URL: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.90.12.024> (дата обращения 15.03.2021).
3. Гусева Н.В., Воробьева Д.А., Евтюгина З.А. Особенности взаимодействия в системе вода–порода на территории водосбора озера Имандра (Кольский полуостров) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 8. – С. 177–188. URL: <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/8/2779> (дата обращения 15.03.2021).
 4. Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. Экология почв. Учение об экологических функциях почв. 2-е изд., уточн. и доп. – М.: Изд-во МГУ, 2012. – 412 с.
 5. Евтюгина З.А., Асминг В.Э. Особенности формирования состава инфильтрационных вод в условиях аэротехногенного загрязнения // Вестник МГТУ: труды Мурманского государственного технического университета. – 2013. – Т. 16. – № 1. – С. 73–80.
 6. Global mercury emissions to the atmosphere from anthropogenic and natural sources / N. Pirrone, S. Cinnirella, X. Feng, R.B. Finkelman, H.R. Friedli, J. Leaner, R. Mason, A.B. Mukherjee, G.B. Stracher, D.G. Streets, K. Telmer // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2010. – V. 10. – P. 5951–5964. URL: <http://dx.doi.org/10.5194/acp-10-5951-2010> (дата обращения 15.03.2021).
 7. Estimation of lead and zinc emissions from mineral exploitation based on characteristics of lead/zinc deposits in China / X. Zhang, L. Yang, Y. Li, H. Li, W. Wang, Q. Ge // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2011. – V. 21. – Iss. 11. – P. 2513–2519. URL: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)61044-3](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)61044-3) (дата обращения 15.03.2021).
 8. Ettler V. Soil contamination near non-ferrous metal smelters: a review // Applied Geochemistry. – 2015. – V. 64. – P. 56–74. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.09.020> (дата обращения 15.03.2021).
 9. Ghayoraneh M., Qishlaqi A. Concentration, distribution and speciation of toxic metals in soils along a transect around a Zn/Pb smelter in the northwest of Iran // Journal of Geochemical Exploration. – 2017. – V. 180. – P. 1–14. URL: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.05.007> (дата обращения 15.03.2021).
 10. Groundwater co-contaminant behavior of arsenic and selenium at a lead and zinc smelting facility / R.T. Wilkin, T.R. Lee, D.G. Beak, R. Anderson, B. Burns // Applied Geochemistry. – 2018. – V. 89. – P. 255–264. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.12.011> (дата обращения 15.03.2021).
 11. Мотузова Г.В. Соединения микроэлементов в почвах: системная организация, экологическое значение, мониторинг. 2-е изд. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 168 с.
 12. Кузнецов В.А., Шимко Г.А. Метод постадийных вытяжек при геохимических исследованиях. – Минск: Наука и техника, 1990. – 65 с.
 13. Characteristic of speciation of heavy metals in municipal sewage sludge of Guangzhou as fertilizer / L. Hei, P. Jin, X. Zhu, W. Ye, Y. Yan // Procedia Environmental Sciences. – 2016. – V. 31. – P. 232–240. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.02.031> (дата обращения 15.03.2021).
 14. Exposure of heavy metals in coal gangue soil, in and outside the mining area using BCR conventional and vortex assisted and single step extraction methods. Impact on orchard grass / A.A. Qureshi, T.G. Kazi, J.A. Baig, M.B. Arain, H.I. Afridi // Chemosphere. – 2020. – V. 255. – 126960. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126960> (дата обращения 15.03.2021).
 15. Integration of sequential extraction, chemical analysis and statistical tools for the availability risk assessment of heavy metals in sludge amended soils / S. Khadhar, A. Sdiri, A. Chekirben, R. Azouzi, A. Charef // Environmental Pollution. – 2020. – V. 263. – 114543. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114543> (дата обращения 15.03.2021).
 16. Assessment of selective sequential extraction procedure for determining arsenic partitioning in copper slag / H. bin Zhang, Y. zheng He, J. jing Hu, Y. nan Wang, H. zhen Cao, J. Zhou, G. qu. Zheng // Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition). – 2020. – V. 30 – Iss. 10. – P. 2823–2835. URL: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(20\)65424-3](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(20)65424-3) (дата обращения 15.03.2021).
 17. Khorasanipour M., Rashidi S. Geochemical fractionation pattern and environmental behaviour of rare earth elements (REEs) in mine wastes and mining contaminated sediments; Sarcheshmeh mine, SE of Iran // Journal of Geochemical Exploration. – 2020. – V. 210. – 106450. URL: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.106450> (дата обращения 15.03.2021).
 18. Геология СССР. Т. 27. Геологическое описание. Мурманская область / под ред. П.Я. Антропова, Л.Я. Харитонова. – М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по геологии и охране недр, 1958. – 715 с.
 19. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 1. Кольский полуостров / под ред. Ю.А. Елшина, В.В. Куприянова. – Л.: Гидрометеоздат, 1970. – 700 с.
 20. Национальный атлас почв Российской Федерации / под ред. С.А. Шобы. – М.: Астрель: АСТ, 2011. – 632 с.
 21. McLaren R.G., Crawford D.W. Studies on soil copper. 1. The fractionation of copper in soils // Journal Soil Science. – 1973. – V. 24. – Iss. 2. – P. 172–181.
 22. Ладонин Д.В. Методы определения фракционного состава соединений тяжёлых металлов в почвах // Теория и практика химического анализа почв / под ред. Л.А. Воробьевой. – М.: ГЕОС, 2006. – С. 293–309.
 23. Федотов П.С., Спиваков Б.Я. Статистические и динамические методы фракционирования форм элементов в почвах, илах и дольных отложениях // Успехи Химии. – 2008. – Т. 77. – № 7. – С. 690–703.
 24. Current state and dynamics of heavy metal soil pollution in Russian Federation – a review / N. Barsova, O. Yakimenko, I. Tolpeshta, G. Motuzova // Environmental Pollution. – 2019. – V. 249. – P. 200–207. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.020> (дата обращения 15.03.2021).
 25. Кашулина Г.М. Экстремальное загрязнение почв выбросами медно-никелевого предприятия на Кольском полуострове // Почвоведение. – 2017. – № 7. – С. 860–873. URL: <https://doi.org/10.7868/S0032180X17070036> (дата обращения 15.03.2021).
 26. Кашулина Г.М. Мониторинг загрязнения почв тяжёлыми металлами в окрестностях медно-никелевого предприятия на Кольском полуострове // Почвоведение. – 2018. – № 4. – С. 493–505. URL: <https://doi.org/10.7868/S0032180X1804010X> (дата обращения 15.03.2021).
 27. Ревич Б.А. Риски здоровью населения в «горячих точках» от химического загрязнения Арктического макрорегиона // Проблемы прогнозирования. – 2020. – № 2 (179). – С. 148–157.
 28. Evseev A.V., Krasovskaya T.M. Toxic metals in soils of the Russian North // Journal of Geochemical Exploration. – 2017. – V. 174. – P. 128–131. URL: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.05.018> (дата обращения 15.03.2021).
 29. Trends and source apportionment of atmospheric heavy metals at a subarctic site during 1996–2018 / K. Kyllönen, M. Vestenius, P. Anttila, U. Makkonen, M. Aurela, I. Wängberg, M. Nerentorp Mastromonaco, H. Hakola // Atmospheric Environment. – 2020. – V. 236. – 117644. URL: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117644> (дата обращения 15.03.2021).
 30. Ярошевский А.А. Кларки геосфер // Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых. – М.: Недра, 1990. – С. 7–14.
 31. Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – 383 с.
 32. Алексеенко В.А., Алексеенко А.В. Химические элементы в геохимических системах. Кларки почв сеlettных ландшафтов: монография. – Ростов н/Д: Изд-во Южного федерального университета, 2013. – 380 с.
 33. Taylor S.R., McLennan S.M. The continental crust: its composition and evolution. – Oxford: Blackwell, 1985. – 315 p.
 34. McLennan S.M. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. – 2001. – V. 2. – Iss. 4. – 2000GC000109. URL: <https://doi.org/10.1029/2000GC000109> (дата обращения 15.03.2021).
 35. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. – М., 2021. – 496 с.

36. Евтюгина З.А., Копылова Ю.Г., Солдатова Е.А. Минералогический состав почв техногенных пустошей и редколесья // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: Тезисы докладов VII Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 30-летию Института проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН и 75-летию со дня рождения доктора биологических наук, профессора В.В. Никонова. – Апатиты, 2019. – С. 19–20.
37. Водяницкий Ю.Н. Изучение тяжелых металлов в почвах. – М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2005. – 109 с.
38. Переломов Л.В. Взаимодействие редкоземельных элементов с биотическими и абиотическими компонентами почв // Агрохимия. – 2007. – № 11. – С. 85–96.
39. Шафигуллина Г.Т., Удачин В.Н. О формах нахождения элементов в техногенных и фоновых почвах Учалинской геотехнической системы // Башкирский Химический Журнал. – 2007. – № 14 (4). – С. 70–74.

Поступила 17.04.2021 г.

Информация об авторах

Воробьёва Д.А., инженер-исследователь отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

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

UDC 504.5:631.4:550.4-032.1

GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF SOILS: A CASE STUDY OF TERRITORY WITH A HIGH AEROTECHNOGENIC LOAD

Daria A. Vorobeva¹,
vorobeyda18@gmail.com

Natalia V. Guseva¹,
gusevanv@tpu.ru

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

The relevance of the research is caused by the fact that soil, being a connecting link between the Earth geospheres, plays an important role, both in the economic and social development of territories. Soils are of great ecological importance, going far beyond the agricultural framework, and at the same time are often influenced by technogenic factors that can lead to a change in the course of geochemical processes (as, for example, on the Kola Peninsula, where mining and metallurgical enterprises are concentrated). Therefore, the question arises about the difference in the geochemical characteristics of soils, including the fractional composition of chemical elements compounds, of technogenically transformed and background territories.

The main aim of the research is assessment of the soils geochemical specificity, including the fractional composition of chemical elements compounds, of territory with a high aerotechnogenic load.

Objects: soils of the territory with a high aerotechnogenic load (the catchment area of Lake Imandra, Kola Peninsula, Russia).

Methods. The fractional composition of chemical elements compounds in soils was determined by successive selective extracts method. Chemical analysis of the extracts was determined by an inductively coupled plasma mass-spectrometric method. The mineralogical composition of the soils was studied by X-ray phase analysis and electron microscopy.

Results. Studies show that most of the chemical elements remain bound in the residual fraction. But on the territory under consideration, the main share of rare earth elements, Na, Rb, Sb, Zr, Pb, and U, is associated with organic matter. The effect of emissions from the copper-nickel plant is reflected in increase in copper and nickel concentration in the illuvial horizon of soils, the presence of micromineral phases of nickel and copper oxides and rare-earth compounds, as well as in increase in the proportion of mobile forms of Ni and Cu, Cr, Co, Cd, As, Sb.

Key words:

Fractionation, sequential extraction, soil, aerotechnogenic load, Kola Peninsula.

The reported study was funded by RFBR, project number 19-35-90077, 18-55-80015.

REFERENCES

- Borodina N.A., Golov V.I. Forms of occurrence of heavy metals (Cu, Zn, Mn) in the anthropogenic soils of Blagoveshchensk town (Amur region). *Vestnik of FEB RAS*, 2013, no. 5, pp. 69–76. In Rus.
- Elsukova E.Yu., Opekunova M.G., Opekunov A.Yu. Technogenic transformation of heavy metal streams in soils in regions under influence of copper-nickel production. *International research journal*, 2019, vol. 12-1 (90), pp. 118–124. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.90.12.024> (accessed 15 March 2021).
- Guseva N.V., Vorobeva D.A., Evtuygina Z.A. Features of interaction in the water–rock system: a case study of the Imandra lake catchment (the Kola peninsula). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 8, pp. 177–188. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/8/2779> (accessed 15 March 2021).
- Dobrovolsky G.V., Nikitin E.D. *Ekologiya pochv. Uchenie ob ekologicheskikh funktsiyakh pochv* [Ecology of soils. The doctrine of the ecological functions of soils]. Moscow, MSU Publ., 2012. 412 p.
- Evtuygina Z.A., Asming V.E. *Osobennosti formirovaniya sostava infiltratsionnykh vod v usloviyakh aerotekhnogenogo zagryazneniya* [Features of formation of the composition of infiltration water in conditions of aerotechnogenic pollution]. *Vestnik MGTU*, 2013, vol. 16, no. 1, pp. 73–80. In Rus.
- Pirrone N., Cinnirella S., Feng X., Finkelman R.B., Friedli H.R., Leaner J., Mason R., Mukherjee A.B., Stracher G.B., Streets D.G., Telmer K. Global mercury emissions to the atmosphere from anthropogenic and natural sources. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, vol. 10, pp. 5951–5964. Available at: <http://dx.doi.org/10.5194/acp-10-5951-2010> (accessed 15 March 2021).
- Zhang X., Yang L., Li Y., Li H., Wang W., Ge Q. Estimation of lead and zinc emissions from mineral exploitation based on characteristics of lead/zinc deposits in China. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, vol. 21, is.11, pp. 2513–2519. Available at: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)61044-3](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)61044-3) (accessed 15 March 2021).
- Ettler V. Soil contamination near non-ferrous metal smelters: a review. *Applied Geochemistry*, 2015, vol. 64, pp. 56–74. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.09.020> (accessed 15 March 2021).
- Ghayoraneh M., Qishlaqi A. Concentration, distribution and speciation of toxic metals in soils along a transect around a Zn/Pb smelter in the northwest of Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, vol. 180, pp. 1–14. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.05.007> (accessed 15 March 2021).
- Wilkin R.T., Lee T.R., Beak D.G., Anderson R., Burns B. Groundwater co-contaminant behavior of arsenic and selenium at a lead and zinc smelting facility. *Applied Geochemistry*, 2018, vol. 89, pp. 255–264. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.12.011> (accessed 15 March 2021).
- Motuzova G.V. *Soedineniya mikroelementov v pochvakh: sistemnaya organizatsiya, ekologicheskoe znachenie, monitoring* [Compounds of trace elements in soils: systemic organization, ecological significance, monitoring]. 2nd ed. Moscow, Book house «LIBROKOM» Publ., 2009. 168 p.
- Kuznetsov V.A., Shimko G.A. *Metod postadiynykh vytyazhek pri geokhimicheskikh issledovaniyakh* [Stepwise method extracts in geochemical studies]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1990. 65 p.
- Hei L., Jin P., Zhu X., Ye W., Yan Y. Characteristic of speciation of heavy metals in municipal sewage sludge of Guangzhou as fertilizer. *Procedia Environmental Sciences*, 2016, vol. 31, pp. 232–240.

- Available at: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.02.031> (accessed 15 March 2021).
14. Qureshi A.A., Kazi T.G., Baig J.A., Arain M.B., Afridi H.I. Exposure of heavy metals in coal gangue soil, in and outside the mining area using BCR conventional and vortex assisted and single step extraction methods. Impact on orchard grass. *Chemosphere*, 2020, vol. 255, 126960. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126960> (accessed 15 March 2021).
 15. Khadhar S., Sdiri A., Chekirben A., Azouzi R., Charef A. Integration of sequential extraction, chemical analysis and statistical tools for the availability risk assessment of heavy metals in sludge amended soils. *Environmental Pollution*, 2020, vol. 263, 114543. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114543> (accessed 15 March 2021).
 16. Zhang H. bin, He Y. zheng, Hu J. jing, Wang Y. nan, Cao H. zhen, Zhou J., Zheng G. qu. Assessment of selective sequential extraction procedure for determining arsenic partitioning in copper slag. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 2020, vol. 30, Iss. 10, pp. 2823–2835. Available at: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(20\)65424-3](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(20)65424-3) (accessed 15 March 2021).
 17. Khorasanipour M., Rashidi S. Geochemical fractionation pattern and environmental behaviour of rare earth elements (REEs) in mine wastes and mining contaminated sediments; Sarcheshmeh mine, SE of Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 2020, vol. 210, 106450. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jexplo.2019.106450> (accessed 15 March 2021).
 18. *Geologiya SSSR. T. 27. Geologicheskoe opisaniye. Murmanskaya oblast* [Geology of the USSR. Vol. 27. Geological description. Murmansk region]. Eds. P.Ya. Antropov, L.Ya. Kharitonov. Moscow, State Scientific and Technical Publishing House of Literature on Geology and Mineral Protection, 1958. 715 p.
 19. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. T. 1 Kolskiy poluostrov* [Surface Water Resources of the USSR. Vol. 1. Kola Peninsula]. Ed. by Y.A. Elshin, V.V. Kupriyanov. Leningrad, Hydrometeoizdat Publ., 1970. 700 p.
 20. *Natsionalny atlas pochv Rossiyskoy Federatsii* [National atlas of soils of the Russian Federation]. Ed. by S.A. Shoba. Moscow, Astrel: AST Publ., 2011. 632 p.
 21. McLaren R.G., Crawford D.W. Studies on soil copper. 1. The fractionation of copper in soils. *Journal Soil Science*, 1973, vol. 24, Iss. 2, pp. 172–181.
 22. Ladonin D.V. Metody opredeleniya fraktsionnogo sostava soedineniy tyazhelykh metallov v pochvakh [Methods for determining the fractional composition of heavy metal compounds in soils]. *Teoriya i praktika himicheskogo analiza pochv* [Theory and practice of soil chemical analysis]. Ed. by L.A. Vorobyeva. Moscow, GEOS Publ., 2006. pp. 293–309.
 23. Fedotov P.S., Spivakov B.Ya., Fractionation of elements in soils, sludges and sediments: batch and dynamic methods. *Russian Chemical Reviews*, 2008, vol. 77, no. 7, pp. 649–660. Available at: <https://doi.org/10.1070/RC2008v077n07ABEH003791> (accessed 15 March 2021).
 24. Barsova N., Yakimenko O., Tolpeshta I., Motuzova G. Current state and dynamics of heavy metal soil pollution in Russian Federation – a review. *Environmental Pollution*, 2019, vol. 249, pp. 200–207. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.020> (accessed 15 March 2021).
 25. Kashulina G.M. Extreme pollution of soils by emissions of the copper–nickel industrial complex in the Kola peninsula. *Eurasian Soil Science*, 2017, vol. 50, no. 7, pp. 837–849. Available at: <https://doi.org/10.1134/S1064229317070031> (accessed 15 March 2021).
 26. Kashulina G.M. Monitoring of soil contamination by heavy metals in the impact zone of copper–nickel smelter on the Kola peninsula. *Eurasian Soil Science*, 2018, vol. 50, no. 4. pp. 467–478. Available at: <https://doi.org/10.1134/S1064229318040063> (accessed 15 March 2021).
 27. Revich B.A. Population health risks in the chemical pollution hotbeds of the Arctic macroregion. *Studies on Russian Economic Development*, 2020, vol. 31 (2), pp. 238–244.
 28. Evseev A.V., Krasovskaya T.M. Toxic metals in soils of the Russian North. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, vol. 174, pp. 128–131. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jexplo.2015.05.018> (accessed 15 March 2021).
 29. Kyllönen K., Vestenius M., Anttila P., Makkonen U., Aurela M., Wängberg I., Nerentorp Mastromonaco M., Hakola H. Trends and source apportionment of atmospheric heavy metals at a subarctic site during 1996–2018. *Atmospheric Environment*, 2020, vol. 236, 117644. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117644> (accessed 15 March 2021).
 30. Yaroshevsky A.A. Klarki geosfer [Clarke of Geospheres]. *Spravochnik po geokhimicheskim poiskam poleznykh iskopaemykh*. [Geochemical mineral prospecting handbook]. Moscow, Nedra Publ., 1990. pp. 7–14.
 31. Grigoriev N.A. *Raspreделение khimicheskikh elementov v verkhney chasti kontinentalnoy kory* [Chemical element distribution in the upper continental crust]. Ekaterinburg, UB RAS Publ., 2009. 383 p.
 32. Alekseenko V.A., Alekseenko A.V. *Khimicheskie elementy v geokhimicheskikh sistemakh. Klarki pochv selitrennykh landshaftov* [Chemical elements in geochemical systems. Clarke soils of residential landscapes]. Rostov on Don, Southern Federal University Publ., 2013. 380 p.
 33. Taylor S.R., McLennan S.M. *The continental crust: its composition and evolution*. Oxford, Blackwell Publ., 1985. 315 p.
 34. McLennan S.M. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2001, vol. 2, Iss. 4, 2000GC000109. Available at: <https://doi.org/10.1029/2000GC000109> (accessed 15 March 2021).
 35. SanPiN 1.2.3685-21. *Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya* [Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness to humans of environmental factors]. Moscow, 2021. 496 p.
 36. Evtuygina Z.A., Kopylova Yu.G., Soldatova E.A. Mineralogicheskii sostav pochv tekhnogennykh pustoshey i redkolesya [Mineralogical composition of soils of technogenic wastelands and light forests]. *Ekologicheskie problemy severnykh regionov i puti ikh resheniya. Tezisy dokladov VII Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoy 30-letiyu Instituta problem promyshlennoy ekologii Severa FIC KNC RAN i 75-letiyu so dnya rozhdeniya doktora biologicheskikh nauk, professora V.V. Nikonova* [Ecological problems of the northern regions and ways to solve them. Abstracts of the VII All-Russian scientific conference with international participation dedicated to the 30th anniversary of the Institute of Industrial Ecology of the North Federal Research Center of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences and the 75th birthday of Doctor of Biological Sciences, Professor V.V. Nikonov]. Apatity, 2019. pp. 19–20.
 37. Vodyanitskiy Yu.N. *Izuchenie tyazhelykh metallov v pochvakh* [Study of heavy metals in soils]. Moscow, Dokuchaev Soil Science Institute Publ., 2005. 109 p.
 38. Perelomov L.V. Interactions of Rare Earth elements with biotic and abiotic soil components. *Agrochemistry*, 2007, no. 11, pp. 85–96. In Rus.
 39. Shafigullina G.T., Udachin V.N. About forms of elements in technogenic and background of Uchaly geotechnical system. *Bashkir chemical journal*, 2007, no. 14 (4), pp. 70–74. In Rus.

Received: 17 April 2021.

Information about the authors

Daria A. Vorobeva, research engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Natalia V. Guseva, Dr. Sc., head of Division for Geology, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 504.55.054: 622 (470.6)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ДРОБЛЕНИЯ РУД ДЛЯ ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

Голик Владимир Иванович^{1,2},
info@skgmi-gtu.ru

Разоренов Юрий Иванович²,
rektorat@npi-tu.ru

Комащенко Виталий Иванович²,
komashchenko@inbox.ru

Бурдзиева Ольга Германовна¹,
cgi_ras@mail.ru

¹ Владикавказский научный центр Российской академии наук,
Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а.

² Южно-Российский государственный политехнический университет,
Россия, 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132.

Актуальность исследования вызвана необходимостью поиска новых путей для увеличения производства металлов. Объемы некондиционных по содержанию металлов руд новых и строящихся месторождений техногенных массивов могут быть вовлечены в производство с повышением безотходности освоения недр.

Цель: повышение качества взрывного дробления руд для подземного выщелачивания металлов путем экспериментального обоснования параметров отделения от массива и дробления металлических руд.

Объект: рудовмещающий массив и технологические процессы отбойки и дробления руд конкретного месторождения в ходе полномасштабного эксперимента в опытном блоке.

Методология: критический анализ теории и практики отбойки и дробления руд для выщелачивания в магазине, организация мониторинга выщелачиваемого массива в ходе извлечения металлов, моделирование и интерпретация результатов исследований.

Результаты. Дана краткая справка по истории вопроса. Описана методика осуществления промышленного эксперимента на месторождении вскрываемых руд. Систематизированы показатели взрывной отбойки руд в процессе их магазинирования. Предложен критерий дробимости руд взрывом. Выполнена математическая обработка результатов взрывной отбойки руды. Показано, что способ выщелачивания даже при коэффициенте извлечения 70 % не конкурирует с традиционными технологиями из-за потери полезного компонента и требует совершенствования. Установлены закономерности распределения полезного компонента в классах отбитой руды, описываемые логарифмически-нормальным законом Гаусса. Показано, что размер куска, который соответствует среднеарифметическому значению содержания полезного компонента объективно характеризует качество отбитой для подземного выщелачивания руды. Сформулировано отличие предлагаемого метода от традиционного расчета средневзвешенного линейного размера, не учитывающего неравномерность распределения металла между фракциями. Предложена обобщенная модель взрывной подготовки руд к выщелачиванию. Изучение распределения содержания полезного компонента в отбитой руде в зависимости от вещественного состава, характера минерализации, общего содержания металла в рудовмещающих породах, технологии рудоподготовки может оказать существенное влияние на показатели выщелачивания.

Ключевые слова:

Промышленный эксперимент, месторождение, руда, металл, взрывная отбойка, дробимость, выщелачивание, извлечение, распределение компонента, размер куска, содержание, модель.

Введение

Концепция удовлетворения потребности промышленности в металлах включает в себя положения об усилении спроса на металлосодержащее сырье, уменьшении запасов месторождений в комфортных для эксплуатации районах, усложнении условий разработки при понижении на глубину, необходимости защиты экосистем окружающей среды и земной поверхности от разрушения. Проблема обеспечения промышленности минеральным сырьем весьма актуальна и для России [1–3].

Решение этой проблемы делает необходимым активизацию исследований, направленных на поиски резервов получения металлов [4–6].

Среди технологий, отвечающих этим требованиям права гражданства завоевывают варианты с подземным выщелачиванием руд, прежде всего, цветных металлов, в блоках [7–9].

Эти технологии позволяют без крупных капиталовложений, используя имеющуюся инфраструктуру, увеличить запасы сырья, использовать хвосты выщелачивания для управления горным давлением, продлить срок эксплуатации действующих месторождений и существенно уменьшить ущерб окружающей среде.

Подземным блоковым выщелачиванием добывают медь на месторождениях (Гумешевское), молибден попутно с ураном (Стрельцовское), обеспечивая большую часть производственной программы и на

отдельных участках других месторождений вскрываемых руд.

Новая технология нуждается в научном обосновании, включающем, в том числе, оценку распределения содержания полезного компонента в отбитой руде в зависимости от вещественного состава, характера минерализации, общего содержания металла в рудовмещающих породах и др.

Для разработки новых технологий характерна большая доля исследований по эффективности отделения от массива и дробления руд на этапе подготовки их к выщелачиванию [10–12].

Промышленный многофакторный эксперимент по выщелачиванию металлов из балансовых комплексных руд осуществлен в опытном блоке месторождения Северного Казахстана.

Исследование и обсуждение результатов

Вмещающие породы месторождения представлены вулканогенными-осадочными и осадочными породами. Коэффициент крепости вмещающих пород от 7–8 до 1–5 в зоне разломов. Рудовмещающими породами являются аргиллиты и алевролиты верхнего ордовика, слабо метаморфизованные, грубо слоистые и рассланцованные.

Рудная залежь представляет собой линзовидное тело длиной 350–370 м, прослеженное на глубину до 950 м с углом падения 55–65°. Мощность залежи составляет 45–50 м в центре со снижением на флангах. Объемная плотность руды и пород 2,7 т/м³. Основные

запасы отработаны вариантами с принудительным обрушением руд и пород.

Подготовка руды к подземному выщелачиванию на первом этапе промышленного эксперимента предусматривала расширение отрезного восстающего на полную ширину блока и образование компенсационного пространства.

В районе отрезного восстающего дренажно-буровые выработки сбили рассечками, а из образовавшейся подсечки бурили глубокие скважины на высоту блока, которые были взорваны в два приема.

Отбитая горная масса была выпущена. В блоке было обустроено пять полных вееров скважин на горизонтах 189 и 212 м. Количество и глубина скважин в полувеерах изменялись в зависимости от конфигурации рудного тела. Число замедлений в полувеерах изменялось от двух до трех. В качестве взрывчатого вещества (ВВ) применяли гранулит 79/21, а в боевиках – аммонал АВ-200.

Коэффициент разрыхления руды составил 1,34.

Первый веер обурили на всю высоту блока и взорвали на открытое пространство, а остальные пять взрывали поочередно без частичного выпуска руды. Расстояние между веерами скважин оставалось постоянным.

Качество дробления определяли методом фотопланиметрии 6 раз за 1 взрывание и оценивали по выходу классов 0–50; (+50)–100; (+100)–150 и (+200) мм.

В табл. 1 даны результаты исследования.

Таблица 1. Показатели взрывной отбойки руды

Table 1. Indicators of explosive ore breaking

Показатели/Indicators	Единицы Units	Веера скважин/Well fans					Среднее Average
		1	2	3	4	5	
Объем отбитой руды Ore chipped off	м ³ /м ³	580	630	530	670	250	–
Удельный расход гранулита Specific consumption of granulite	кг/м ³ kg/m ³	1,0	0,9	1,6	1,4	1,6	1,27
Коэффициент сближения Convergence ratio	–	1,1	0,7	0,8	0,7	0,9	0,83
Выход отбитой руды Broken ore yield	М ³ /М m ³ /m	3,4	4,2	3,0	3,7	3,6	3,38
Выход фракции 0–50 мм Output of 0–50 mm fraction	%	66,6	52,4	64,1	70,6	66,9	64,1
Выход фракции (+50)–100 мм Output of (+50)–100 mm fraction		12,0	13,0	14,3	17,4	24,4	16,2
Выход фракции (+100)–150 мм Output of (+100)–150 mm fraction		8,5	4,6	8,8	6,6	3,8	6,5
Выход фракции (+150)–200 мм Output (+150)–200 mm fraction		10,3	10,4	3,2	2,3	2,6	5,8
Выход фракции (+200) мм Output of (+200) mm fraction		2,6	19,6	9,6	3,1	2,3	7,4
Выход фракции (0–50)+(150–200) мм Output of (0–50)+(150–200) mm fraction		97,4	80,4	90,4	96,9	97,7	92,6
Средний размер куска Average piece size	мм/mm	60,3	115,4	76,9	53,8	52,3	72,3
Критерий дробимости Crushing criterion	–	3,9	3,3	3,7	4,0	4,5	–

На долю класса 0–50 пришлось 64 %, выход класса 200–300 мм составил 7 %, доля класса 0–200 составила 93 %, а доля кусков 400 мм составила всего 1,5 %. Размер средневзвешенного куска изменялся от 52 до 78 мм.

Критерий дробимости может быть описан выражением:

$$L = \ln \frac{W}{d},$$

где d – средневзвешенный размер куска.

Лучший показатель дробления получен при взрывании вееров в «зажиме» с коэффициентом разрыхления 1,35–1,4.

Построена кривая распределения руды по классам крупности, из которой видно, что в интервале выхода кондиционных классов 0–200 мм закономерность подчиняется закону Гаусса. Это говорит о том, что установленные параметры буровзрывных работ могут обеспечить состав горной массы с идентичным выходом нужных классов.

Эффективность добычи металлов зависит от полноты извлечения полезного ископаемого из недр. При отработке балансовых запасов способ выщелачивания даже при извлечении 70 % металлов пока не конкурирует с традиционными технологиями.

Для повышения эффективности добычи руды стремятся увеличить степень ее дробления, но при выщелачивании мелкоизмельченная руда спрессовывается и не прорабатывается выщелачивающим раствором реагента, что увеличивает потери металлов.

В рамках исследований решали задачи: определение содержания и суммарного количества полезного компонента в гранулометрических классах отбитой руды и расчет извлечения и времени выщелачивания при фактическом составе отбитой руды.

Эксперимент осуществлен с использованием геофизической аппаратуры в отстоящей от блока на 200 м камере с поддержанием постоянной температуры и влажности.

После отбойки отбирали руду по классам крупности, мм: 0–50, 50–100, 150–200, 200–300, 300–400 и более, и загружали в металлический контейнер размерами 35×50×50 см с регистрирующими датчиками.

Время измерений одной порции принималось равным 100 с, а количество замеров – 3. Всего выполнено 120 определений проб общей массой 6000 кг.

Среднее содержание металла в классах 200–400 мм в 5 раз ниже, чем в оптимальном для выщелачивания классе 0–200 мм, а суммарное количество в них металла превышает 92 % от всего количества. Установлено, что содержание полезного компонента в отбитой руде с увеличением размера кусков снижается (рис. 1).

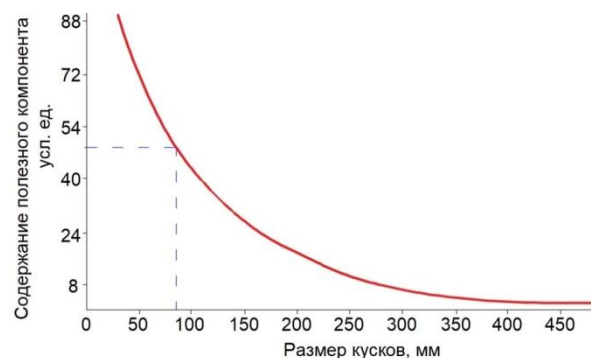


Рис. 1. Распределение содержания металлов в руде в зависимости от крупности

Fig. 1. Distribution of metal content in ore depending on size

Результаты измерений в блоке и в других выработках обнаруживают хорошую сходимость данных опробования блока с данными ранее выполненной геологической разведки выработок (табл. 2).

Таблица 2. Сопоставление показателей содержания металлов

Table 2. Comparison of metal content indicators

Классы Classes	Содержание, у.е. Content, c.u.		Количество проб Number of samples		Средневзвешенное содержание, у.е. Weighted average content, c.u.	
	Блок Block	Выработки Workings	Блок Block	Выработки Workings	Блок Block	Выработки Workings
0–50	80,4	62,0	16	12	67,6	32,9
50–100	40,4	35,2	16	12	6,0	5,3
100–150	36,8	25,6	16	12	2,7	1,4
150–200	31,6	20,8	16	12	1,8	0,9
200–300	15,1	13,3	13	9	0,5	0,1
300–400	6,2	0	9	5	0,2	0
≥400	14,0	0	8	5	0,2	0

Примечание: у.е. – условная единица содержания металлов.

Note: c.u. – conventional unit of metal content.

Из таблицы можно сделать вывод, что основная масса металлов извлекается из классов крупностью до 50 мм.

Таблица 3. Полнота извлечения металлов

Table 3. Completeness of metal extraction

Класс, мм Class, mm	Среднеарифметическое содержание, у.е. Arithmetic mean content, c.u.	Выход, % Output, %	Средневзвешенное содержание, у.е. Weighted average content, c.u.	Коэффициент извлечения, % Recovery rate, %	Средневзвешенное извлечение по блоку Weighted average recovery by block	
					у.е./c.u.	%
0–50	72,0	64,1	46,1	93,0	42,8	73,7
50–100	36,0	16,2	5,8	–	–	–
100–150	32,0	6,5	2,1	64,0	5,0	8,6
150–200	28,0	5,8	1,6	41,0	0,7	1,2
200–300	7,2	4,0	0,3	–	–	–
300–400	5,6	2,0	0,1	–	–	–
+400	9,7	1,3	0,1	–	–	–
–200	42,0	–	56,2	–	–	–
+200	6,1	–	–	–	–	–

Для доказательства случайно-вероятного характера распределения содержания полезного компонента в отбитой руде по гранулометрическим классам обработаны руды восьми месторождений с проверкой распределения на нормальность.

Установленная закономерность описывается законом Гаусса. На рис. 2 дано распределение содержания металла в логарифмических координатах для руд исследуемого месторождения в сравнении с аналогичными рудными месторождениями, причем их графики интерпретируются прямыми линиями.

Из известного закона Гаусса следует, что наилучшим приближением к истинному значению измеряемой величины гранул является средняя арифметическая величина.

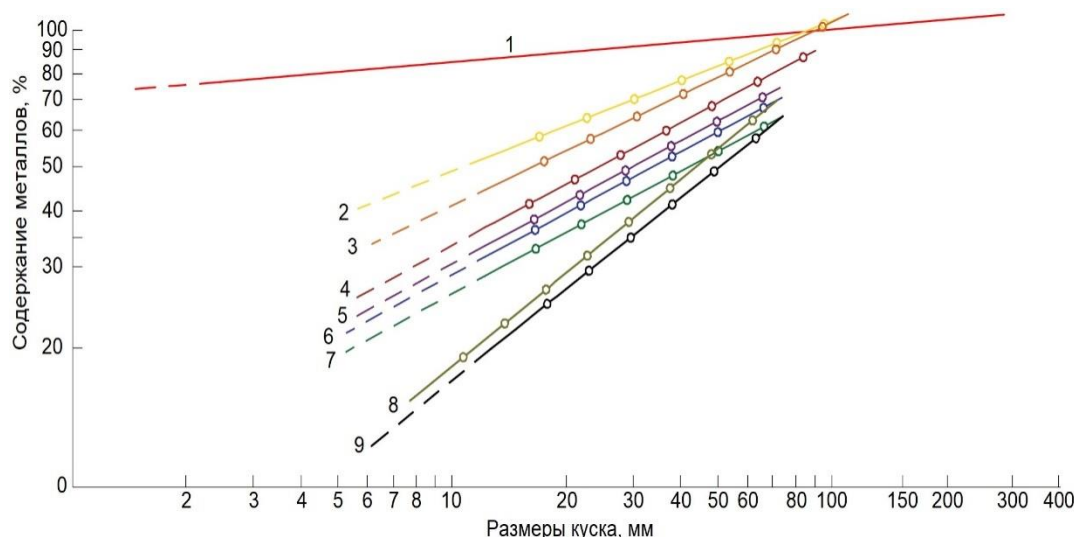


Рис. 2. Графики распределения содержания металла в логарифмических координатах: 1 – руда исследуемого месторождения; 2–9 – руды аналогичных месторождений

Fig. 2. Graphs of metal content distribution in logarithmic coordinates: 1 – ore of the investigated deposit; 2–9 – ores of similar deposits

Следовательно, размер куска, который соответствует среднеарифметическому значению содержания полезного компонента в искомом составе наиболее объективно отражает качество отбитой для подземного выщелачивания руды. Этим предлагаемый метод отличается от ранее известного метода расчета средневзвешенного линейного размера рудного куска, который не учитывает равномерность распределения металла по классам.

Пример: Проба руды состоит из кусков размером 4 и 10 см с равным массовым их соотношением, но куски размером 4 см содержат полезный компонент (пусть во всех кусках содержание одинаковое), а в кусках 10 см он отсутствует. Определим кусок, размер которого в наибольшей степени характеризует данную пробу с точки зрения полноты извлечения из нее металла выщелачиванием.

Средневзвешенный линейный размер, рассчитанный по известному методу:

$$\alpha = 4 \cdot 0,5 + 10 \cdot 0,5 = 7 \text{ см.}$$

Размер куска, соответствующий среднему арифметическому содержанию, составляет 4 см.

При оценке пробы по средневзвешенному линейному размеру допускается неточность в определении коэффициента извлечения при выщелачивании, поскольку он не характеризует куски с точки зрения их вещественного состава.

Для рассматриваемого конкретного гранулометрического состава среднее значение содержания полезного компонента по данным наших измерений составило 56,20 у.ед. Эта величина находится в интервале кусков от 0 до 15 мм. Середина этого интервала, т. е. 7,5 мм, является наилучшим приближением к истинному значению среднегармонического куска, который с наибольшей достоверностью характеризует свойства полученного в блоке гранулометрического состава.

Качество дробления руды для выщелачивания в подземных блоках является одним из определяющих факторов эффективности системы разработки. Поэтому установление корреляции между параметрами локализации рудных тел в пространстве, свойствами руд и возможностями взрывного дробления является темой многих исследований по данному направлению горного дела [13–16].

Искомые параметры описываются обобщенной моделью:

$$q = \frac{1800 \cdot 10^6 \sqrt{f} \delta \frac{P}{1-P} \left(\frac{M_n}{M_o} - 1 \right) + \frac{\gamma}{2g} \ln \frac{K_p}{1+P} C_0^2}{Q_v^{1+\eta}},$$

где F – коэффициент крепости пород; γ – плотность, т/м³; δ – ширина раскрытия щели, или толщина диффузного слоя при естественной конвенции; P – объемная пористость нарушенного рудного массива при минимальном раскрытии трещин; M_o – удельная поверхность средневзвешенного куска в целике, 10 м⁻¹; M_n – удельная поверхность средневзвешенного куска после взрывания, 10 м⁻¹; K_p – коэффициент разрыхления руды; C_0 – начальная скорость разлета руды при взрывании, м/с; Q_v – потенциальная энергия ВВ для гранулированных ВВ, Дж; η – коэффициент эффективности ВВ.

Конверсия технологий добычи руд сопровождается совершенствованием процессов в сопряженных отраслях хозяйственной системы [17–20].

Заключение

Объемы некондиционных по содержанию металлов руд новых и строящихся месторождений техногенных массивов могут быть вовлечены в производство при обеспечении качества взрывного дробления руд для подземного выщелачивания, что подтверждается результатами многофакторного промышленного

эксперимента при разработке сложноструктурного месторождения.

Изучение распределения содержания полезного компонента в отбитой руде в зависимости от вещественного состава, характера минерализации, общего

содержания металла в рудовмещающих породах, технологии рудоподготовки в блоках **подземного выщелачивания** может оказать существенное влияние на параметры систем выщелачивания и отдельных технологических процессов и дать практические результаты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Минерально-сырьевая база цветной металлургии России / Ю.В. Дмитрак, Б.С. Цидаев, В.Х. Дзапаров, Г.Х. Харебов // Вектор ГеоНаук. – 2019. – Т. 2. – № 1. – С. 9–18.
2. Повышение экономической эффективности горнодобывающих предприятий за счет вовлечения в эксплуатацию техногенных георесурсов / С.Е. Гавришев, С.Н. Корнилов, И.А. Пыталев, И.В. Гапонова // Горный журнал. – 2017. – № 12. – С. 46–51.
3. Espinoza R.D., Rojo J. Towards sustainable mining. P. I. Valuing investment opportunities in the mining sector // Resource Policy. – 2017. – V. 52. – P. 7–18.
4. Голик В.И., Лукьянов В.Г., Хашева З.М. Обоснование возможности и целесообразности использования хвостов обогащения руд для изготовления твердеющих смесей // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 5. – С. 6–14.
5. Комплексный анализ применения эффективных технологий для повышения устойчивого развития природно-технической системы / Р.В. Клюев, И.И. Босиков, А.В. Майер, О.А. Гаврина // Устойчивое развитие горных территорий. – 2020. – № 2. – С. 283–290.
6. Re-thinking mining waste through an integrative approach led by circular economy aspirations / M. Tayebi-Khorami, M. Edraki, G. Corder, A. Golev // Minerals. – 2019. – V. 9. – P. 1–13. DOI: 10.3390/min9050286.
7. Lyashenko V.I., Golik V.I., Komashchenko V.I. Increasing the efficiency of drilling and blasting preparation of rock ores for underground block leaching of metals // Scientific and technical journal «Explosion Technology». – 2018. – № 120/77. – P. 147–168.
8. Dubiński J. Sustainable development of mining mineral resources // International Journal of Sustainable Future for Human Security. – 2013. – V. 12. – № 1. – P. 1–6.
9. Извлечение меди из рудничных вод Гумешевского месторождения / И.А. Алтушкин, Ю.А. Король, В.В. Левин, А.В. Бакин // Цветные металлы. – 2019. – № 6. – С. 13–21. DOI: 10.17580/tsm.2019.06.02
10. Отбойка руд скважинными зарядами модернизированной конструкции / В.И. Комащенко, В.Х. Дзапаров, Б.В. Дзеранов, Г.В. Стась // Вектор ГеоНаук. – 2019. – Т. 2. – № 3. – С. 40–46.
11. Повышение эффективности взрывной отбойки на основе новых способов инициирования скважинных зарядов на карьере / В.И. Комащенко, В.И. Голик, В.А. Белин, А.Л. Гапоненко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 9. – С. 293–304.
12. Дмитрак Ю.В., Камнев Е.Н. АО «Ведущий проектно-исследовательский и научно-исследовательский институт промышленной технологии» – путь длиной в 65 лет // Горный журнал. – 2016. – № 3. – С. 6–12.
13. Evidences of the influence of the detonation sequence in rock fragmentation by blasting. P. I / M. Cardu, J. Seccatore, A. Vaudagna, A. Rezende, F. Galvão, J.S. Bettencourt, G. de Tomi // REM: Revista Escola de Minas. – 2015. – V. 68. – № 3. – P. 337–342. DOI: 10.1590/0370-44672014680218.
14. Integration of underground mapping, petrology, and high-resolution microseismicity analysis to characterise weak geotechnical zones in deep South African gold mines / S.B. Mngadi, R.J. Durrheim, M.S.D. Manzi, H. Ogasawara, Y. Yabe et al. // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2019. – V. 114. – P. 79–91.
15. Пространственно-временные задачи геоэкологии – междисциплинарный подход / В.С. Бригида, Х.Х. Кожиев, А.А. Сарян, А.К. Джиоева // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 4. – С. 20–32. DOI: 10.25018/0236-14932020-4-0-20-32.
16. Бурмистров К.В., Осинцев Н.А. Принципы устойчивого развития горнотехнических систем в переходные периоды // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 4. – С. 179–195.
17. Strategic mining options optimization: Open pit mining, underground mining or both / E. Ben-Awuah, O. Richter, T. Elkington, Y. Pourrahimian // International Journal of Mining Science and Technology. – 2016. – V. 26. – № 6. – P. 1065–1071.
18. Domingues Maria S.Q., Baptista Adelina L.F., Diogo Miguel Tato. Engineering complex systems applied to risk management in the mining industry // International Journal of Mining Science and Technology. – 2017. – V. 27. – P. 611–616.
19. Роботизированные геотехнологии как путь повышения эффективности и экологизации освоения недр / М.В. Рыльникова, Д.Я. Владимиров, И.А. Пыталев, Т.М. Попова // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 1. – С. 92–101.
20. Woodward K., Wesseloo J. Observed spatial and temporal behaviour of seismic rock mass response to blasting // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2015. – V. 115. – № 11. – P. 1044–1056.

Поступила 09.06.2021 г.

Информация об авторах

Голик В.И., доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Владикавказского научного центра Российской академии наук; профессор кафедры горного дела Южно-Российского государственного политехнического университета.

Разоренов Ю.И., доктор технических наук, профессор, ректор Южно-Российского государственного политехнического университета.

Комащенко В.И., доктор технических наук, профессор, профессор кафедры горного дела Южно-Российского государственного политехнического университета.

Бурдзиева О.Г., кандидат географических наук, заведующая лабораторией техногенной геоэкологии Геофизического института Владикавказского научного центра РАН.

UDC 504.55.054: 622 (470.6)

EXPERIMENTAL STUDY OF THE QUALITY OF ORE CRUSHING FOR UNDERGROUND LEACHING

Vladimir I. Golik^{1,2},
v.i.golik@mail.ru

Yuri I. Razorenov²,
yiri1963@mail.ru

Vitaly I. Komashchenko²,
komashchenko@inbox.ru

Olga G. Burdzieva¹,
olgaburdzieva@mail.ru

¹ Geophysical Institute of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 93a, Markov street, Vladikavkaz, 362002, Russia.

² South Russian State Polytechnic University, 132, Prosvyashcheniya street, Novocherkassk, 346428, Russia.

The relevance of the study is caused by the need to find new ways to increase the production of metals. The volumes of substandard ores in terms of metal content of new and under construction man-made deposits can be involved in production with increase in the wastelessness of subsoil development.

The aim of the research is to improve the quality of explosive crushing of ores for underground leaching of metals by experimentally substantiating the parameters of separation from the massif and crushing of metal ores.

Object: ore-bearing massif and technological processes of breaking and crushing of ores of a particular deposit during a full-scale experiment in a pilot block.

Methodology: critical analysis of the theory and practice of breaking and crushing ores for leaching in the store, organization of monitoring of the leached massif during the extraction of metals, modeling and interpretation of research results.

Results. The paper introduces a brief reference on the history of the issue and describes the technique of carrying out an industrial experiment at a deposit of exposed ores. The authors have systematized the indicators of explosive breaking of ores in their shoring and proposed a criterion of ore crushing by explosion. The mathematical processing of the results of ore blasting was carried out. It was shown that the leaching method, even with a recovery factor of 70 %, does not compete with traditional technologies due to the loss of a useful component and requires improvement. The regularities of useful component distribution in the classes of chipped ore, described by the logarithmic-normal Gauss law, were established. It is shown that the size of the piece, which corresponds to the arithmetic mean of the content of the useful component, objectively characterizes the quality of the ore chipped for underground leaching. The difference between the proposed method and the traditional calculation of the weighted average linear size, which does not take into account the uneven distribution of metal between fractions, is formulated. The authors proposed the generalized model of explosive preparation of ores for leaching. The study of the useful component content distribution in the chipped ore, depending on the material composition, the nature of mineralization, the total metal content in the ore-bearing rocks, the technology of ore preparation can have a significant impact on the leaching indicators.

Key words:

Industrial experiment, deposit, ore, metal, blasting, crushing, leaching, extraction, component distribution, lump size, content, model.

REFERENCES

- Dmitrak Yu.V., Tsidaev B.S., Dzaparov V.Kh., Kharebov G.Kh. Mineral resources base of nonferrous metallurgy in Russia. *Vector GeoNauk*, 2019, vol. 2, no. 1, pp. 9–18. In Rus.
- Gavrishev S.E., Kornilov S.N., Pytalev I.A., Gaponova I.V. Increasing the economic efficiency of mining enterprises due to the involvement of technogenic georesources in operation. *Gornyi Zhurnal*, 2017, no. 12, pp. 46–51. In Rus.
- Espinoza R.D., Rojo J. Towards sustainable mining. P. I. Valuing investment opportunities in the mining sector. *Resource Policy*, 2017, vol. 52, pp. 7–18.
- Golik V.I., Lukyanov V.G., Khasheva Z.M. Substantiation of the possibility and expediency of using ore dressing tailings for the production of hardening mixtures. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 5, pp. 6–14. In Rus.
- Klyuev R.V., Bosikov I.I., Mayer A.V., Gavrina O.A. Comprehensive analysis of the use of effective technologies to improve the sustainable development of the natural and technical system. *Sustainable development of mountainous territories*, 2020, no. 2, pp. 283–290. In Rus.
- Tayebi-Khorami M., Edraki M., Corder G., Golev A. Re-thinking mining waste through an integrative approach led by circular economy aspirations. *Minerals*, 2019, vol. 9, pp. 1–13. DOI: 10.3390/min9050286.
- Lyashenko V.I., Golik V.I., Komashchenko V.I. Increasing the efficiency of drilling and blasting preparation of rock ores for underground block leaching of metals. *Scientific and technical journal «Explosion Technology»*, 2018, no. 120/77, pp. 147–168.
- Dubiński J. Sustainable development of mining mineral resources. *International Journal of Sustainable Future for Human Security*, 2013, vol. 12, no. 1, pp. 1–6.
- Altushkin I.A., Korol Yu.A., Levin V.V., Bakin A.V. Extraction of copper from the mine waters of the Gumeshevskoe deposit. *Tsvetnye Metally*, 2019, no. 6, pp. 13–21. In Rus. DOI: 10.17580/tsm.2019.06.02.
- Komashchenko V.I., Dzaparov V.Kh., Dzeranov B.V., Stas G.V. Breaking of ores with modernized borehole charges. *Vector GeoNauk*, 2019, vol. 2, no. 3, pp. 40–46. In Rus.
- Komashchenko V.I., Golik V.I., Belin V.A., Gaponenko A.L. Increasing the efficiency of blasting on the basis of new methods of

- initiation of borehole charges in open pits. *Gorny information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2014, no. 9, pp. 293–304. In Rus.
12. Dmitrak Yu.V., Kamnev E.N. JSC «Leading design, survey and research institute of industrial technology» – a path long 65 years. *Gornyi Zhurnal*, 2016, no. 3, pp. 6–12. In Rus.
 13. Cardu M., Seccatore J., Vaudagna A., Rezende A., Galvão F., Betencourt J.S., Tomi de G. Evidences of the influence of the detonation sequence in rock fragmentation by blasting. P. I. *REM: Revista Escola de Minas*, 2015, vol. 68, no. 3, pp. 337–342. DOI: 10.1590 / 0370-44672014680218.
 14. Mngadi S.B., Durrheim R.J., Manzi M.S.D., Ogasawara H., Yabe Y. Integration of underground mapping, petrology, and high-resolution microseismicity analysis to characterize weak geotechnical zones in deep South African gold mines. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, vol. 114, pp. 79–91.
 15. Brigida V.S., Kozhiev H.H., Saryan A.A., Dzhioeva A.K. Spatio-temporal tasks of geoecology – an interdisciplinary approach. *Gorny information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2020, no. 4, pp. 20–32. In Rus. DOI: 10.25018 / 0236-14932020-4-0-20-32.
 16. Burmistrov K.V., Osintsev N.A. Principles of sustainable development of mining systems in transition periods. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 4, pp. 179–195. In Rus.
 17. Ben-Awuah E., Richter O., Elkington T., Pourrahimian Y. Strategic mining options optimization: open pit mining, underground mining or both. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2016, vol. 26, no. 6, pp. 1065–1071.
 18. Domingues Maria S.Q., Baptista Adelina L.F., Diogo Miguel Tato. Engineering complex systems applied to risk management in the mining industry. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2017, vol. 27, pp. 611–616.
 19. Rilnikova M.V., Vladimirov D.Ya., Pytalev I.A., Popova T.M. Robotic geotechnology as a way to improve the efficiency and greening the development of mineral resources. *Physical and technical problems of the development of minerals*, 2017, no. 1, pp. 92–101. In Rus.
 20. Woodward K., Wesseloo J. Observed spatial and temporal behavior of seismic rock mass response to blasting. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2015, vol. 115, no. 11, pp. 1044–1056.

Received: 9 June 2021.

Information about the authors

Vladimir I. Golik, Dr. Sc., professor, chief researcher, Geophysical Institute of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences; professor, South Russian State Polytechnic University.

Yuri I. Razorenov, Dr. Sc., professor, Rector of the South Russian State Polytechnic University.

Vitaly I. Komashchenko, Dr. Sc., professor, South Russian State Polytechnic University.

Olga G. Burdzieva, Cand. Sc., head of the laboratory «Technogenic Geoecology», Geophysical Institute of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences.

УДК 622.24.051.64

СОПРОТИВЛЕНИЕ ПОРОДЫ ПРИ БУРЕНИИ МЕЛКОРЕЗЦОВЫМ АЛМАЗНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Нескоромных Вячеслав Васильевич¹,
sovair@bk.ru

Попова Марина Сергеевна¹,
alleniram83@mail.ru

Лиу Баочанг²,
liubc@jlu.edu.cn

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

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

Актуальность. На результаты бурения влияет то, насколько эффективно работает породоразрушающий инструмент на забое. Показатели механической скорости бурения, качества сооружения скважины и отбора проб тесно связаны с соответствием выбранного бурового инструмента и технологии его применения физико-механическим свойствам горных пород, слагающих вскрываемый геологический разрез. При неизменной технологии рост сопротивления со стороны забоя влечёт изменение интенсивности углубления скважины. Сведения о коэффициенте сопротивления позволяют правильно управлять процессом и своевременно регулировать характер воздействия бурового инструмента на разрушаемую зону.

Цель. Для контроля силового контакта резцов бурового инструмента с забоем скважины необходимо иметь методический аппарат, позволяющий определять механизм разрушения породы с учетом сил сопротивления. Целью работы является развитие методики изучения механизма разрушения породы алмазным резцом.

Объект: процесс разрушения горной породы мелким алмазным резцом.

Методы: метод полного факторного эксперимента, метод научного познания, аналитические исследования, анализ. В статье приведена методика исследования сопротивления горной породы разрушению алмазным резцом, основанная на применении метода полного факторного эксперимента с получением математических моделей факторов и их графической интерпретации, в частности зависимости углубления за один оборот от режимов бурения, на основании которых определяется коэффициент сопротивления в конкретный момент времени.

Результаты. Путем математической обработки ранее полученных экспериментальных данных установлена взаимосвязь коэффициента сопротивления с такими показателями, как механическая скорость бурения, величина углубления за оборот, частота вращения инструмента. Представлен аналитическое исследование возможности регулирования режимов бурения с целью достижения наибольшего эффекта разрушения горной породы путем оценки коэффициента сопротивления как функции интенсивности разрушения или углубления за один оборот. Выведена и доказана правомерность выражения зависимости коэффициента сопротивления от глубины внедрения резца в породу, числа резцов рабочего торца бурового инструмента и их размера, глубины формируемой борозды разрушения, коэффициента трения резца о горную породу и динамической составляющей работы бурового инструмента.

Ключевые слова:

Бурение, алмазный резец, полный факторный эксперимент, тангенциальное усилие, коэффициент сопротивления, сила резания, режимы бурения, углубление.

Введение

Из-за наличия неоднородности разреза и других геологических особенностей сооружения скважин в процессе бурения возникают условия неэффективного использования породоразрушающего инструмента, что приводит к преждевременному износу и снижению его ресурса, неоправданным потерям механической скорости бурения и времени [1–17]. Одним из основных факторов, влияющих на результаты бурения, является сопротивление инструменту, возникающее со стороны забоя, оценить которое можно величиной тангенциального усилия резания–скалывания горной породы и коэффициента ее сопротивления. Изменение сопротивления со стороны забоя сигнализирует о смене физико-механического состояния горного массива в зоне, на которую оказыва-

ет воздействие режущая часть инструмента. Это также может быть вызвано как переходом на новый пласт, так и изменением свойств среды, образовавшейся на забое в процессе продолжительного бурения [10–28].

В производственных условиях регулирование работы бурового инструмента возможно путем изменения режимов бурения [15–26]. Правильный и своевременный подбор частоты вращения, осевой нагрузки и подачи промывочной жидкости, учитывающий состояние забоя, способствует улучшению условий разрушения горной породы и эксплуатационных показателей породоразрушающего инструмента [23–27]. При этом следует учитывать то, что различные по твердости горные породы должны подвергаться соответствующему определенному воздействию со сторо-

ны инструмента. Таким образом, характер разрушения горной породы выступает основополагающим фактором в повышении эффективности бурения.

Именно сопротивление горной породы является препятствующим усилием внедрению резцов бурового инструмента в породу. Чем тверже порода, тем большее сопротивление она может оказать. При бурении в твердых горных породах наиболее востребованным современным инструментом являются импрегнированные коронки и долота. В настоящее время импрегнированный инструмент имеет широкий спектр использования и может применяться в породах от VI до XII категории по буримости. В то же время импрегнированный инструмент обладает самым мелким резцом по сравнению с другими видами бурового инструмента. Научное изучение механизма разрушения горной породы мелким алмазным резцом затруднительно и требует новых комплексных подходов, заключающихся в детальном аналитическом исследовании, основанном на экспериментальных дан-

ных и учитывающем все явления, возникающие в процессе бурения.

Методология исследования

Для глубокого изучения особенностей процесса разрушения горных пород мелкорезцовым алмазным инструментом за основу принят метод полного факторного эксперимента, отлично зарекомендовавший себя в научных исследованиях различных направлений. В соответствии с методикой, изложенной в работах [10, 14, 15, 28], производится обработка результатов бурения, полученных экспериментальным путем. На основании выведенных моделей механической скорости бурения, энергоёмкости разрушения горной породы и углубления за один оборот ($h_{об}$) инструмента строятся графики, отображающие зависимость основных режимов бурения: осевой нагрузки ($P_{ос}$) от частоты вращения (ω). На рис. 1 приведен пример обработки экспериментальных результатов, полученных при осевой нагрузке 400–1200 даН и частоте вращения 71–725 мин⁻¹.

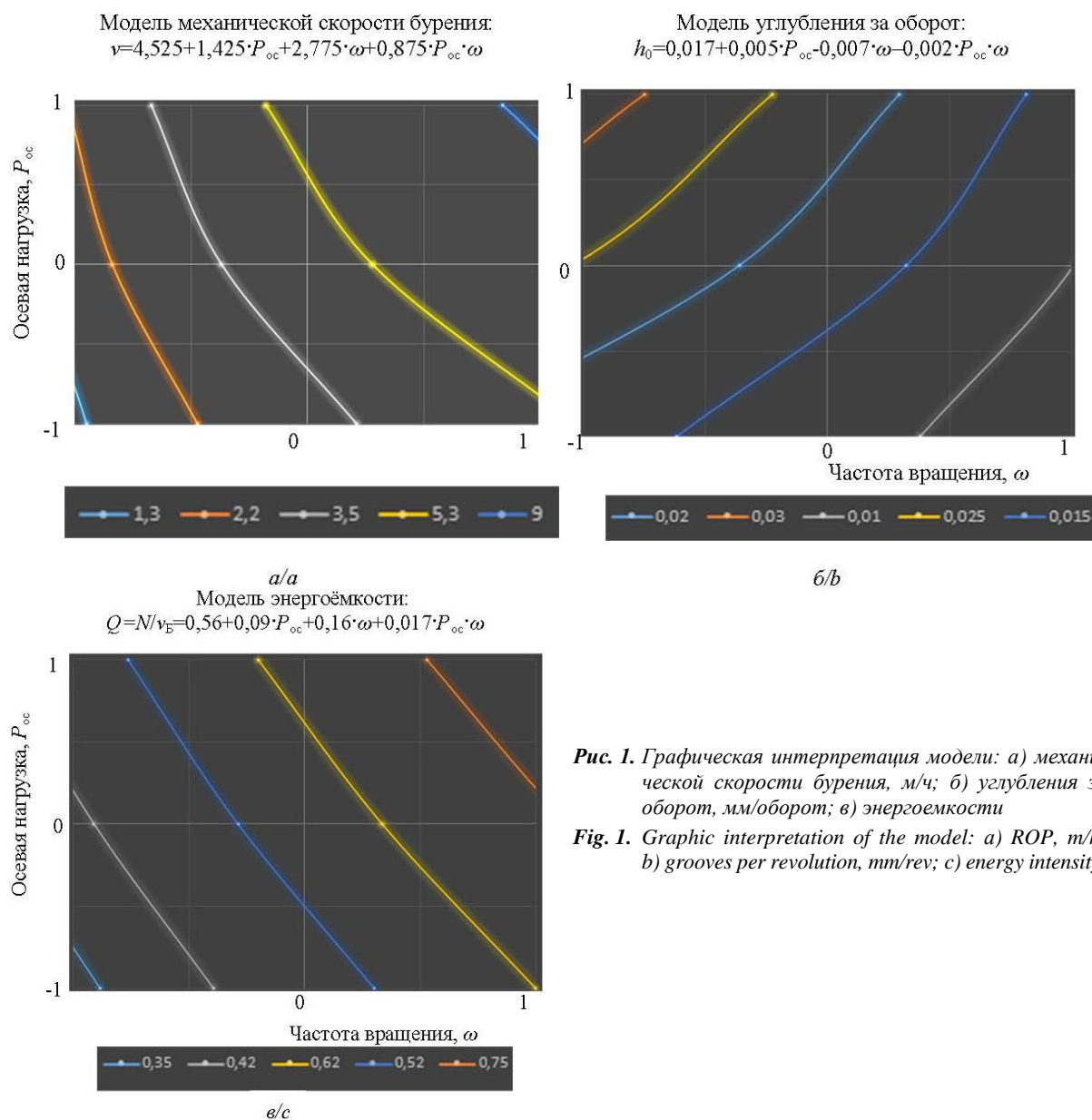


Рис. 1. Графическая интерпретация модели: а) механической скорости бурения, м/ч; б) углубления за оборот, мм/оборот; в) энергоёмкости

Fig. 1. Graphic interpretation of the model: а) ROP, m/h; б) grooves per revolution, mm/rev; с) energy intensity

Показатель эффективности работы породоразрушающего инструмента за конкретный промежуток времени полноценно отражается значением величины углубления за один оборот ($h_{об}$), которое, в свою очередь, в производственных условиях может регулироваться путем изменения осевой нагрузки и частоты вращения. Графическое преобразование полученных результатов обработки математических моделей механической скорости бурения, энергоемкости разрушения горной породы и углубления за один оборот дает возможность более точно исследовать взаимное влияние данных параметров в разных комбинациях их числовых значений.

С этой целью на основании полученного графического материала, представленного на рис. 1, осуществляется построение зависимости показателя углубления за один оборот от изменения величины осевой нагрузки при различных значениях частоты вращения бурового инструмента. Для этого на графике модели механической скорости бурения (рис. 1, а) отмечаются максимальное (+1), минимальное (-1) и среднее (0) значения частоты вращения, которые были приняты как предельные для проведения эксперимента. Далее, по линии заданной механической скорости бурения, определяются соответствующие выбранным значениям частоты вращения величины осевой нагрузки $P_{ос}$.

Для расчета величины углубления за оборот можно воспользоваться известной формулой (1):

$$h_{об} = \frac{v_m}{60\omega}, \quad (1)$$

где ω – выбранное максимальное, минимальное или среднее значение частоты вращения инструмента, мин^{-1} ; v_m – механическая скорость бурения, по которой выбирались режимы бурения, м/ч.

Определив таким образом три значения углубления за один оборот, при соответствующем на графике, представленном на рис. 1, а, значении осевой нагрузки $P_{ос}$, строится зависимость $h_{об}=f(P_{ос})$ (рис. 2, а; рис. 3, а). Такой график отражает влияние изменения осевой нагрузки на величину углубления за оборот, учитывая при этом числовые показатели частоты вращения.

В то же время из полученных графиков, представленных на рис. 2, а и 3, а, при заданных параметрах режима бурения можно получить зависимость, наглядно отражающую влияние частоты вращения на показатель углубления за один оборот. С этой целью в каждой из зон, выделенных на рис. 2, а и 3, а, проведены вертикальные линии, соответствующие значениям осевой нагрузки, обозначенные на рисунке P_1, P_2, P_3 . Пересечения этих вертикальных линий с графиками позволяют получить значения углублений при минимальном, среднем и максимальном значениях частоты вращения. Графически такое представление изменения данных может выглядеть так, как показано на рис. 2, б и 3, б.

Анализ

Описанная графическая интерпретация результатов ранее проведенного эксперимента позволяет

наглядно выделить и охарактеризовать взаимное влияние всех основных и важных параметров бурения, действующих на процесс разрушения горных пород на забое скважины.

На рис. 2, а и 3, а линии, отражающие изменение углубления за оборот, располагаются совершенно по-разному. Отмечается противоположность направления их наклона. Это указывает на то, что механизм разрушения горной породы в данных двух случаях протекает неодинаково: рис. 2 соответствует механизму усталостно-поверхностного разрушения, а рис. 3 – объемному механизму разрушения. Подробное объяснение данных закономерностей приведено в работах [5, 10].

Из анализа графиков на рис. 2, б и 3, б следует, что по характеру влияния частоты вращения на углубление за оборот можно судить об особенностях механизма разрушения горной породы на забое скважины при бурении.

Приведенная графика на рис. 3, б указывает на факт объемного разрушения. Здесь повышение частоты вращения ведет к снижению углубления за один оборот, что указывает на рост сил сопротивления забоя при повышении линейных скоростей резания–скалывания горной породы. Данное явление изучено и описано в работах [5, 10, 13, 28].

При этом угол наклона линий углубления может характеризовать уровень сил сопротивления горной породы и среды в том или ином случае, что дает возможность их сопоставить при выполнении соответствующего анализа по величине угла наклона β (рис. 2, б и 3, б). В данном случае $\text{tg } \beta$ является величиной, равной величине коэффициента сопротивления μ_k , который характеризует комплексный показатель сопротивления при разрушении горной породы тем или иным буровым инструментом.

Для анализа сил сопротивления при проведении экспериментальных работ по бурению горных пород различными типами буровых инструментов, учитывая данные, приведенные в виде графиков на рис. 1, вполне обоснованно связать значения углов β и α . Показатель угла α описан в ранее выполненных работах [5, 10]. Он составляет величину угла между вертикалью и результирующей осевого ($P_{ос}$) и тангенциального (F_T) усилий на алмазный резец, возникающих в процессе бурения (рис. 2, в и 3, в). При повышении сопротивления резанию–скалыванию происходит рост усилия F_T и угол α увеличивается. Это произойдет в случае повышения частоты вращения бурового инструмента. В то же время, согласно представленному графическому анализу, при повышении частоты вращения возрастет и угол β . А вот при повышении осевой нагрузки эти углы уменьшаются, хотя при этом увеличивается значение величины глубины внедрения алмазного резца в породу. Таким образом, углы β и α имеют одну и ту же природу, а значит, измеренный на графиках рис. 2, б и 3, б угол β может оцениваться как угол, тангенс которого эквивалентен коэффициенту сопротивления резания–скалывания–раздавливания горной породы резцом.

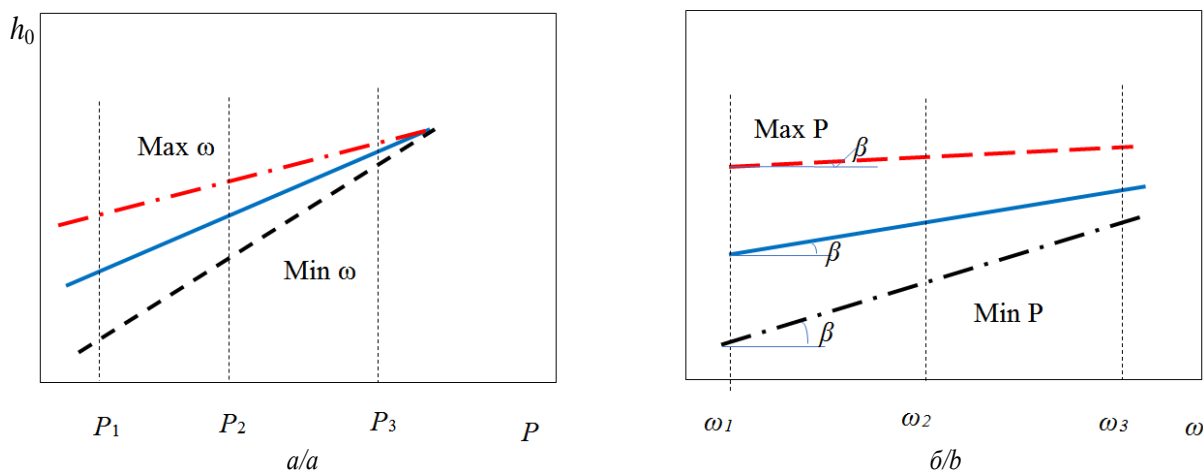


Рис. 2. Интерпретация реализации усталостно-поверхностного разрушения: а) зависимость углубления за оборот бурового инструмента от осевого усилия; б) зависимость углубления за один оборот бурового инструмента от частоты вращения; в) схема механизма разрушения

Fig. 2. Interpretation of fatigue-surface destruction realization: a) dependence of the drilling tool deepening in one revolution at the bottom hole on the axial force; b) graphical dependence of the drilling tool deepening in one revolution on the rotation frequency; c) destruction mechanism diagram

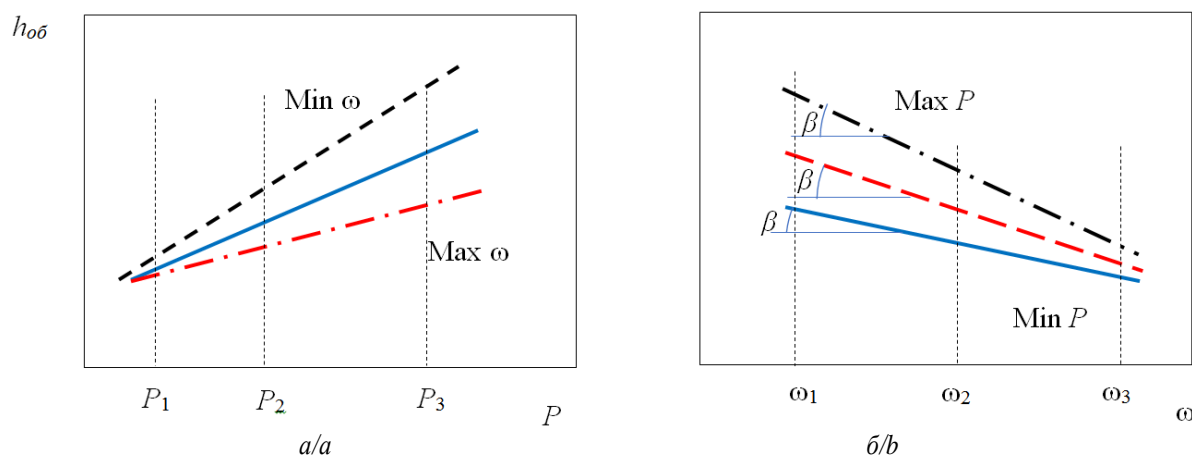
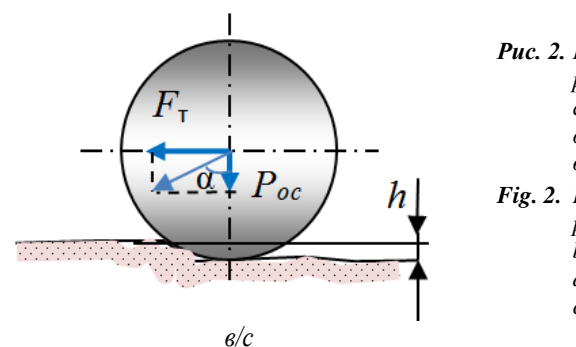
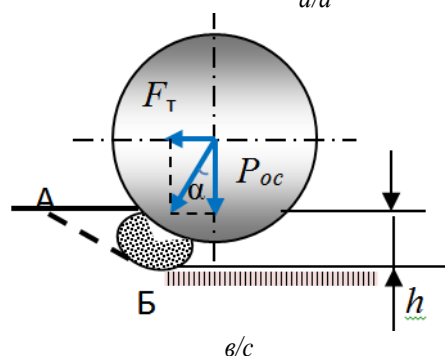


Рис. 3. Интерпретация реализации объемного разрушения: а) зависимость углубления за оборот от осевой нагрузки; б) зависимость углубления за оборот от частоты вращения бурового инструмента; в) схема механизма разрушения

Fig. 3. Interpretation of volumetric fracture realization: a) dependence of the drilling tool deepening in one revolution on the axial force; b) dependence of the drilling tool deepening in one revolution at the bottom of the rotation frequency; c) destruction mechanism diagram



Рассмотрим теоретическое обоснование выше сделанного утверждения, которое впоследствии позволит провести анализ эффективности процесса разрушения горной породы алмазным резцом бурового инструмента.

Расчет забойной мощности осуществляется путем использования известного выражения

$$N = \frac{\mu_k P_{oc} R_{ii} \omega}{97,5}, \quad (2)$$

где μ_k – коэффициент сопротивления; P_{oc} – осевая нагрузка; R_{ii} – средний радиус торца бурового породоразрушающего инструмента, м; ω – частота вращения бурового инструмента.

Имея выражение, определяющее крутящий момент, можно найти тангенциальное усилие F_T , возникающее при разрушении горной породы буровым алмазным инструментом, как:

$$M_{кр} = F_T R_n = \frac{N}{\omega}. \quad (3)$$

Подставим в выражение (3) формулу (2), при этом учтем количество алмазных резцов на торце коронки или долота. Таким образом, получим выражение, позволяющее рассчитать тангенциальное усилие, которое примет следующей вид:

$$F_T = \frac{\mu_k P_{oc} h_n}{N_c h}, \quad (4)$$

где N_c – число алмазных резцов, армирующих торец породоразрушающего инструмента; h_n – величина глубины лунки разрушения породы.

Влияние сопротивления среды (разрушенной породы+промывочной жидкости), рассмотренное нами в работе [24], можно рассчитать по известной формуле Бернулли для скоростного напора, в результате чего получена формула (5):

$$R_c = 0,5 v_p^2 C_c \rho_c S. \quad (5)$$

При этом формула для расчета площади передней поверхности резца (6):

$$S = 0,125 \pi d H, \quad (6)$$

где v_p^2 – линейная скорость перемещения резца, м/с; C_c – коэффициент формы резца (ориентировочно может изменяться от 1 (плоский резец) и до 0,5 (приостренный, ориентированный гранью вперед)); ρ_c – весовая плотность среды, Н/м³; S – площадь передней поверхности резца, м²; H – выпуск алмаза из матрицы, м.

С учетом площади контактирующего со средой резца формула расчета реакции будет выглядеть следующим образом

$$R_c = 0,0625 v_p^2 C_c \rho_c \pi d H. \quad (7)$$

Если принять, что $v_p = 2 \pi \omega r$, то по формуле (7) можно определить сопротивление среды в зависимости от частоты вращения бурового инструмента ω и радиуса торца коронки (r – расстояния от центра торца до точки установки алмазного резца):

$$R_c = 0,25 \pi^3 \omega^2 r^2 C_c \rho_c d H. \quad (8)$$

Таким образом, с учетом параметра R_c тангенциальное усилие, представленное в формуле (4) будет выглядеть так:

$$F_T = \frac{\mu_k P_{oc} h_n}{N_c h} + 0,25 \pi^3 \omega^2 r^2 C_c \rho_c d H = \frac{\mu_k P_{oc} h_n}{N_c h} + R_c. \quad (9)$$

Если рассмотреть схему разрушения горной породы алмазным резцом (рис. 2, в и 3, в), то становится очевидно, что соотношение $\frac{F_T}{P_{oc}}$ – это ничто иное, как тангенс угла α (угла между действующим осевым усилием P_{oc} и результирующей силой R резания–скальвания–раздавливания горной породы, по направлению которой формируется ядро сжатия горной породы).

Таким образом, коэффициент сопротивления резания–скальвания–раздавливания горной породы $\mu_k = \operatorname{tg} \alpha$, а согласно рис. 2, в и 3, в угол α равен:

$$\alpha = \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{F_T}{P_{oc}}}.$$

Примем во внимание выражение (9), тогда получим, что

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left(\frac{\mu_k P_{oc} h_n}{N_c h P_{oc}} + \frac{R_c}{P_{oc}} \right).$$

Учитывая то, что в соответствии с результатом аналитических исследований, приведенным в работе [5], угол

$$\alpha = \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{h}{d}},$$

можно получить зависимость следующего вида

$$\frac{\mu_k h_n}{N_c h} + \frac{R_c}{P_{oc}} = \sqrt{\frac{h}{d}}.$$

Из данной формулы следует:

$$\mu_k = \frac{N_c h \left(\sqrt{\frac{h}{d}} - \frac{R_c}{P_{oc}} \right)}{h_n}. \quad (10)$$

При этом известно, что значение коэффициента сопротивления перемещению резцов зависит от величины коэффициента трения резцов о породу f и коэффициента сопротивления породы разрушению μ_b , т. е. коэффициент μ_k можно записать как выражение:

$$\mu_k = \mu_b + f.$$

Формула (10) не включает коэффициента трения f , поэтому правомерно включить данный параметр в полученную зависимость. В связи с учётом вышеприведенного, коэффициент сопротивления μ_k можно рассчитать по формуле, имеющей следующий вид:

$$\mu_k = \frac{N_c h \left(\sqrt{\frac{h}{d}} - \frac{R_c}{P_{oc}} \right)}{h_n} + f. \quad (11)$$

В формуле (11) отражено влияние на коэффициент сопротивления μ_k таких параметров, как глубина внедрения резца в породу h , количество резцов на торце породоразрушающего инструмента N_c и их диаметральный размер d , формируемая глубина борозды разрушения h_n , коэффициент трения резца о горную породу f и динамическая составляющая работы бурового инструмента R_c .

Любопытно, что динамическая составляющая сопротивления R_c (формулы (7), (8)) вызывает снижение коэффициента сопротивления μ_k , что связано, очевидно, с тем, что рост линейной скорости перемещения резца v_p , вызванный повышением частоты вращения бурового инструмента ω , приводит к снижению глубины формируемой борозды разрушения. На рис. 4 представлены зависимости, полученные экспериментально, показывающие связь частоты вращения ω и глубины формируемой резцом борозды разрушения h_n [11].

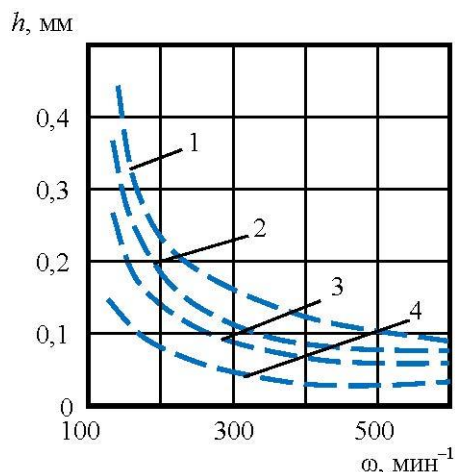


Рис. 4. Зависимость глубины борозды разрушения породы алмазным резцом (h_d) от частоты вращения (ω) при осевых нагрузках на алмазный резец, N : 1 – 140; 2 – 100; 3 – 56; 4 – 35

Fig. 4. Dependence of the furrow depth of rock destruction with a diamond cutter (h_d) on the rotation frequency (ω) under loads on the diamond, N : 1 – 140; 2 – 100; 3 – 56; 4 – 35

В этой же работе [11] на основании экспериментальных данных представлена графическая зависимость коэффициента сопротивления μ_k от частоты вращения породоразрушающего инструмента ω в процессе бурения (рис. 5).

Как следует из приведённых данных, с повышением частоты вращения ω коэффициент сопротивления μ_k снижается. Это осуществляется из-за того, что происходит снижение величины глубины борозды разрушения h_d . Анализ полученной нами формулы (10) указывает на то, что повышение глубины h_d действительно приводит к снижению μ_k . Таким образом обосновано доказательство правомерности выведенной зависимости.

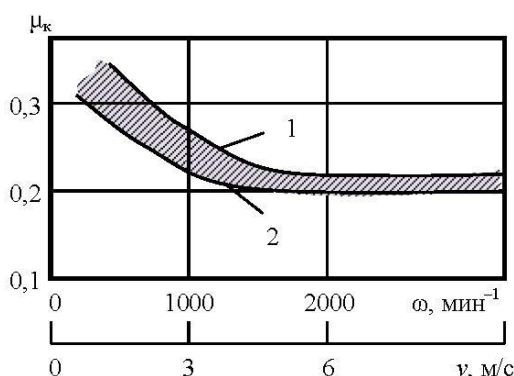


Рис. 5. Зависимость коэффициента сопротивления μ_k от линейной скорости перемещения резца (v) и частоты вращения (ω) при осевой нагрузке: 1 – 12 кН; 2 – 6 кН

Fig. 5. Dependence of the drag coefficient μ_k on the rotation frequency (ω) and the linear speed of the cutter movement (v): 1 – $P_{oc}=12$ кН; 2 – $P_{oc}=6$ кН

В формуле (10) также участвует соотношение h/h_d . Отношение значений глубины внедрения резца в по-

роду h к глубине лунки борозды разрушения h_d зависит от твердости перебуриваемой горной породы и размера алмазного резца, армирующего породоразрушающий инструмент.

Например, для более пластичных и менее твердых горных пород, а также более мелких резцов глубина внедрения резца в породу будет равна глубине борозды разрушения, т. е. $h/h_d=1$, что указывает на то, что в разрушении породы участвуют все резцы торцевой части инструмента (количество N_c).

Если глубина борозды разрушения превышает глубину внедрения резца в породу, отношение $h/h_d < 1$. Это указывает на то, что режим разрушения от резания-скалывания переходит в режим раздавливания, что характерно для применения более крупных и полированных алмазных резцов и разрушения более твердых и упругих горных пород. К примеру, если значение h/h_d будет в пределах 0,5...0,7, тогда только 50–70 % общего числа резцов будет участвовать в разрушении горной породы.

Подробно механизм разрушения горных пород резцами алмазного инструмента описан и обоснован в работах [5, 6, 10, 28].

Величина глубины внедрения резца в горную породу, согласно выводам, полученным в результате ранее выполненных исследований [5], определяется зависимостью:

$$h = r - \sqrt{r^2 - \frac{P}{\pi p_{ш}(1 + \operatorname{tg} \varphi)}}, \quad (12)$$

где P – осевая нагрузка на резец; $p_{ш}$ – твердость горной породы; r – радиус резца; φ – угол внутреннего трения в деформируемых слоях горной породы.

Как следует из анализа приведенных выражений (10)–(12), на коэффициент сопротивления μ_k определенное влияние оказывает размер алмазных резцов. Следовательно, и на энергоёмкость разрушения породы тоже.



Рис. 6. Зависимость коэффициента сопротивления (μ_k) от диаметра алмазного резца

Fig. 6. Dependence of the drag coefficient (μ_k) on the diamond cutter size

В ходе экспериментальных работ было определено влияние на значение величины коэффициента сопротивления μ_k величины диаметра алмазного резца (рис. 6) [13]. Анализ графика, приведенного на рис. 6, показывает, что уменьшение алмазного резца приводит к увеличению коэффициента сопротивления. Причем с уменьшением размера резца на 1 мм коэффициент сопротивления возрастает на 0,025. Полученные законо-

мерности правомерно интерпретировать и на изменения показателей значения забойной мощности. Это объясняет результаты, полученные опытным путем, когда при бурении по одной и той же породе импрегнированным буровым инструментом затраты мощности были на 20–25 % больше, чем при бурении однослойным породоразрушающим инструментом [13].

Обсуждение

Таким образом, можно утверждать, что коэффициент сопротивления μ_k является показателем эффективности разрушения породы.

По имеющимся данным значение коэффициента сопротивления μ_k находится в пределах от 0,02 до 0,6. При этом бурение алмазным инструментом характеризуется показателями от 0,22 до 0,31 [5, 6, 10, 11, 13].

Учитывая, что коэффициент сопротивления μ_k может характеризоваться углублением за оборот, можно классифицировать состояние разрушения породы по значению величины μ_k .

1. Случай отсутствия разрушения ($\mu_k=f$).
2. Если резцы перемещаются по поверхности забоя, осуществляя лишь трение, но при этом не внедряясь в породу, углубка за оборот наблюдаться не будет, т. е. $h=0$. Исходя из выражения (11), коэффициент сопротивления будет минимален и равен коэффициенту трения резца о породу. По известным данным [11] коэффициент трения зависит от свойств горной породы, материала резца и среды их взаимодействия и, как правило, находится в пределах от 0,02 до 0,13.
3. Случай износа алмазного резца ($\mu_k=0,02-0,15$; $\mu_k=0,4-0,6$).
4. Износ алмазного резца происходит в случае, если глубина внедрения его в породу (h) составляет 0,16...0,36 диаметра алмаза. Согласно экспериментальным данным [5, 6, 10, 11, 13] при бурении заполированным алмазным режущим элементом величина μ_k составляет 0,02...0,15. Больших значений (от 0,4 до 0,6) μ_k достигает при термомеханическом разрушении рабочей части бурового инструмента.
5. Случай эффективного разрушения горных пород ($\mu_k=0,15-0,4$).
6. Учитывая, что при алмазном бурении показатель μ_k находится в диапазоне от 0,22 до 0,31, можно заключить, что эффективное разрушение горных пород алмазным инструментом соответствует ограниченному пределу значений коэффициента μ_k от 0,15 до 0,4, которого и рекомендуется придерживаться.

Помимо углубления за оборот коэффициент сопротивления характеризуется и другими параметрами бурения. К примеру, коэффициент сопротивления μ_k пропорционален механической скорости бурения. Данная зависимость описана в работе [13] и выражается в виде формулы:

$$\mu_k = 0,135 + 0,0285v_m.$$

А если проанализировать графические данные, полученные в результате проведения опытных работ

(рис. 5), увеличение частоты вращения приводит к снижению коэффициента сопротивления μ_k , рост осевой нагрузки приводит к его росту.

Таким образом, использование метода полного факторного эксперимента с получением математических моделей факторов и их графической интерпретацией позволяет точно установить характер разрушения горной породы, оценить степень сопротивления горной породы на забое и определить необходимые параметры режима бурения с целью воздействия на эффективность разрушения горной породы.

Особенности того или иного механизма разрушения горной породы характеризуются изменением углубления за оборот при регулировании частоты вращения бурового инструмента. Усталостно-поверхностное разрушение горной породы возникает в случае, когда инструмент создает на забое напряжения, но они не способствуют разрушению и накапливаются до необходимого показателя. В этом случае значение осевой нагрузки недостаточно для реализации объемного разрушения. При этом только рост частоты вращения приведет к росту углубления (рис. 2, б и 3, б).

Похожий режим будет наблюдаться и в случае зашламования забоя скважины. Даже если осевой нагрузки будет достаточно для объемного разрушения породы, но при этом подача промывочной жидкости будет недостаточной для качественной очистки забоя от шлама, характер разрушения останется усталостно-поверхностным. Отличить такой режим можно, наблюдая снижение коэффициента сопротивления при росте значения механической скорости бурения.

Рост сил сопротивления при повышении линейных скоростей резания–скальвания указывает на объемный характер разрушения породы. В этом случае к снижению углубления за оборот ведет повышение частоты вращения.

Таким образом, коэффициент сопротивления характеризует интенсивность разрушения горной породы. Характер изменения и величина этого показателя позволяют осуществлять прогноз возможностей разрушения горной породы. Например, коэффициент сопротивления, равный коэффициенту трения f , указывает на отсутствие углубления.

Графический анализ результатов метода полного факторного эксперимента позволяет производить наблюдения изменений показателя сопротивления любого характера. Так, график влияния частоты вращения на значение углубления за оборот, полученный по модели механической скорости бурения алмазной однослойной коронкой, представленной на рис. 1, а, имеет вид кривой (рис. 7), в отличие от прямолинейного графика, полученного для импрегнированной коронки (рис. 1).

Для одного и того же графика угол β на разных участках имеет различную величину и свидетельствует о падении углубления за оборот при повышении частоты вращения. В то же время при максимальных значениях частоты вращения от 400 мин⁻¹ и выше угол неизменен и равен нулю, что указывает на отсутствие углубления. Из чего следует вывод о рациональности бурения на пониженных частотах.

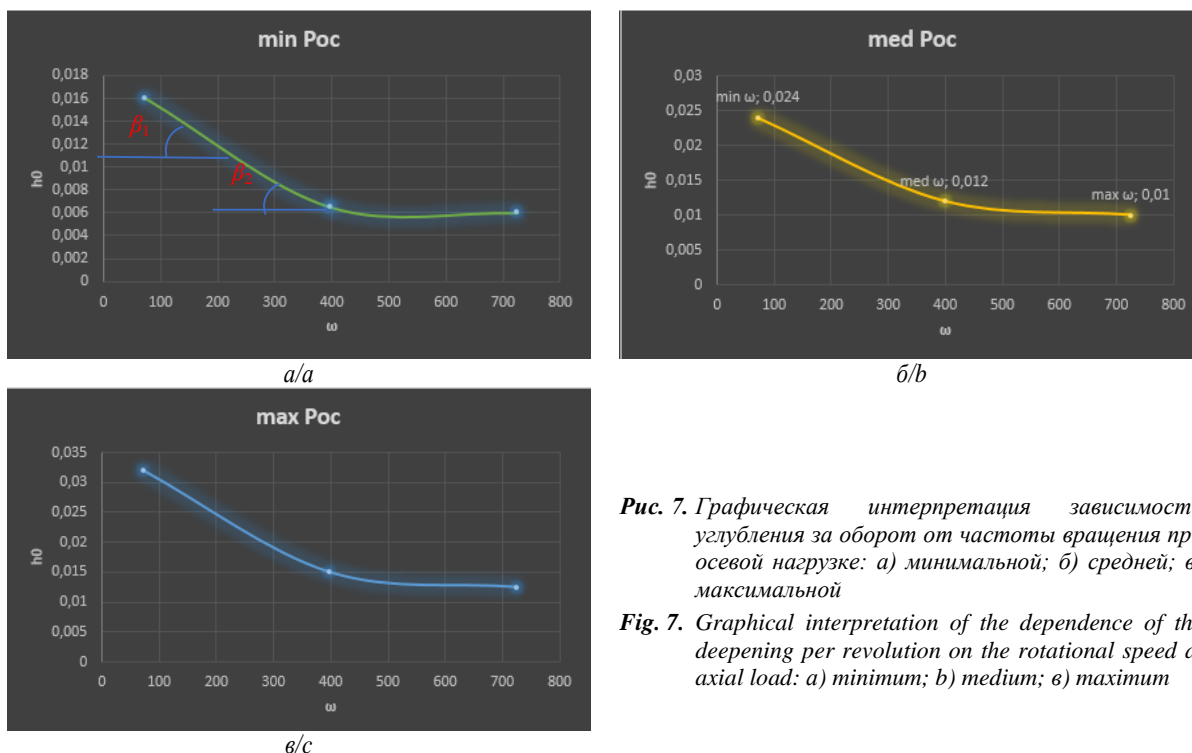


Рис. 7. Графическая интерпретация зависимости углубления за оборот от частоты вращения при осевой нагрузке: а) минимальной; б) средней; в) максимальной

Fig. 7. Graphical interpretation of the dependence of the deepening per revolution on the rotational speed at axial load: a) minimum; b) medium; c) maximum

Выводы

1. По характеру влияния частоты вращения на углубление за оборот можно судить об особенностях механизма разрушения горной породы.
2. Графический анализ результатов метода полного факторного эксперимента позволяет производить наблюдения изменений показателя сопротивления;
3. Коэффициент сопротивления можно рассчитать

$$\mu_k = \frac{N_c h \left(\sqrt{\frac{h}{d} - \frac{R_c}{P_{oc}}} \right)}{h_n} + f;$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Принципы конструирования и эксплуатации алмазного породоразрушающего инструмента / А.А. Буканов, Л.К. Горшков, А.И. Осецкий, Н.В. Соловьев // Разведка и охрана недр. – 2013. – № 7. – С. 44–49.
2. Горшков Л.К., Осецкий А.И. Развитие принципов конструирования и эксплуатации нового алмазного породоразрушающего инструмента // Записки Горного института. – 2012. – Т. 197. – С. 40–45.
3. Brook V. Principles of diamond tool technology for sawing rock // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2002. – V. 39 (1). – P. 41–58.
4. Tonon F., Amadei B. Effect of elastic anisotropy on tunnel wall displacements behind a tunnel face // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2002. – V. 35 (3). – P. 141–160.
5. Нескоромных В.В. Разрушение горных пород при бурении скважин. – М.: ИНФРА-М; Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2015. – 336 с.
6. Киселев А.Т., Крусир И.Н. Вращательно-ударное бурение геологоразведочных скважин. – М.: Недра, 1984. – 102 с.
7. Detournay E., Richard T., Shepherd M. Drilling response of drag bits: theory and experiment // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2008. – V. 45 (8). – P. 1347–1360.
8. Basarir H., Karpuz C. Preliminary estimation of rock mass strength using diamond bit drilling operational parameters // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. – 2016. – V. 30 (2). – P. 145–164.

4. Коэффициент сопротивления μ_k является показателем эффективности разрушения: при $\mu_k = f$ разрушение отсутствует; при μ_k в пределах 0,02–0,15 или 0,4–0,6 идет износ алмазного резца; $\mu_k = 0,15–0,4$ – состояние эффективного разрушения горных пород;
5. Рост сил сопротивления при повышении линейных скоростей резания–скалывания указывает на объемный характер разрушения породы.
6. Снижение коэффициента сопротивления при росте значения механической скорости бурения указывает на усталостно-поверхностный характер разрушения породы.
9. Борисов К.И. Методика оценки эффективности процесса динамического разрушения горных пород инструментом режущо-скалывающего действия // Нефтяное хозяйство. – 2008. – № 8. – С. 46–47.
10. Нескоромных В.В., Попова М.С. Разработка методики управления процессом бурения на основе комплексного анализа критериев // Записки Горного Института. – 2019. – Т. 240. – С. 701–704. DOI: 10.31897/pmi.2019.6.701
11. Кардыш В.Г., Мурзаков Б.В., Окмянский А.С. Энергоёмкость бурения геологоразведочных скважин. – М.: Недра, 1984. – 201 с.
12. Optimization model for polycrystalline diamond compact bits based on reverse design / Z. Ai, Y. Han, Y. Kuang, Y. Wang, M. Zhang // Advances in Mechanical Engineering. – 2018. – V. 10. – Iss. 6. – P. 1–12. DOI: 10.1177/1687814018781494
13. Блинов Г.А., Васильев В.И., Глазов М.Г. Алмазосберегающая технология бурения. – Л.: Недра, 1989. – 184 с.
14. Нескоромных В.В. Оптимизация в геологоразведочном производстве. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2013. – 246 с.
15. Нескоромных В.В., Пушмин П.С. Методика оптимальных параметров режима и условий бурения скважин // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАН – 2011. – № 1 (38). – С. 151–157.
16. Инновационные подходы к конструированию высокоэффективного породоразрушающего инструмента / А.Я. Третьяк, В.В. Попов, А.Н. Гроссу, К.А. Борисов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 8. – С. 225–230.

17. Su O., Ali Akcin. Numerical simulation of rock cutting using the discrete element method // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2011. – V. 48 (3). – P. 434–442.
18. Hasan A.R., Kabir C.S. Wellbore heat-transfer modeling and applications // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2012. – V. 96–97. – P. 109–119.
19. Detournay E., Richard T., Shepherd M. Drilling response of drag bits: theory and experiment // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2008. – V. 45 (8). – P. 1347–1360.
20. Basarir H., Karpuz C. Preliminary estimation of rock mass strength using diamond bit drilling operational parameters // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. – 2016. – V. 30 (2). – P. 145–164.
21. Che D., Zhu W.-L., Ehmann K.F. Chipping and crushing mechanisms in orthogonal rock cutting // International Journal of Mechanical Sciences. – 2016. – № 119. – P. 224–236.
22. Евсеев В.Д., Мавлютов М.Р. Пути повышения эффективности разрушения горных пород // Материалы региональной конференции геологов Сибири, Дальнего Востока и Северо-Востока России. – Томск, 2000. – Т. I. – С. 463–465.
23. Борисов К.И. Современные методы оценки сопротивления горных пород резанию-скалыванию при бурении долотами PDC: монография. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – 166 с.
24. Нескоромных В.В., Попова М.С., Харитонов А.Ю. Влияние сил сопротивления на глубину резания-скалывания горной породы алмазным резцом // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 10. – С. 40–48.
25. Closed-form solution of stress state and stability analysis of wellbore in anisotropic permeable rocks / D.-P. Do, N.-H. Tran, H.-L. Dang, D. Hoxha // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2019. – V. 113. – P. 11–23.
26. Optimization model for polycrystalline diamond compact bits based on reverse design / Z. Ai, Y. Han, Y. Kuang, Y. Wang, M. Zhang // Advances in Mechanical Engineering. – 2018. – V. 10 (6). – P. 476–479.
27. Numerical investigations on the effect of ultra-high cutting speed on the cutting heat and rock-breaking performance of a single cutter / M. Gao, K. Zhang, Q. Zhou, H. Zhou, B. Liu, G. Zheng // Journal of Petroleum Science and Engineering. – July 2020. – V. 190. – Article number 107120.
28. Методика управления процессом бурения и экспериментальные исследования сил сопротивления при бурении долотами с резаками PDC / В.В. Нескоромных, М.С. Попова, А.Е. Головченко, П.Г. Петенёв, Лиу Баочанг // Записки Горного Института. – 2020. – Т. 245. – С. 539–546. DOI: 10.31897/PMI.2020.5.5

Поступила 09.06.2021 г.

Информация об авторах

Нескоромных В.В., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и техники разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета.

Попова М.С., кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и техники разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета.

Баочанг Л., профессор геоинженерии кафедры разведки и бурения, Университет Цзилинь.

UDC 622.24.051.64

ROCK RESISTANCE WHEN DRILLING WITH SMALL CUTTING DIAMOND TOOLS

Vyacheslav V. Neskoromnykh¹,
sovair@bk.ru

Marina S. Popova¹,
alleniram83@mail.ru

Liu Baochang²,
liubc@jlu.edu.cn

¹ Siberian Federal University,
95, Krasnoyarskiy rabochiy avenue, Krasnoyarsk, 660095, Russia.

² Jilin University,
938, Ximinzhu street, Changchun, 130026, China.

Relevance. The drilling results are influenced by the effectiveness of the rock cutting tool operation at the bottom of the well. The indicators of the mechanical drilling speed, the quality of well construction and sampling are closely related to the correspondence of the selected rock cutting tool and technology of its application to the physical and mechanical properties of the rocks that make up the geological section being opened. With the technology unchanged, the increase in resistance from the bottom hole leads to a change in the intensity of the well deepening. Information about the resistance coefficient allows you to correctly control the process and timely adjust the nature of the impact of the drilling tool on the bottomhole.

The purpose of research is to control the power contact of the drilling tool cutters with the bottom of the well; it is necessary to have a methodological apparatus that allows determining the mechanism of rock destruction taking into account the resistance forces.

Objects: rock breaking.

Methods: experimental, full factorial experiment method, analytical research, analysis. The article presents a method for studying the resistance of rocks to destruction with a diamond cutter, based on the use of the method of a full factorial experiment with obtaining mathematical models of factors and their graphic interpretation, in particular the dependence of deepening in one revolution on drilling modes on the basis of which the resistance coefficient when drilling at a particular moment is determined.

Results. Based on the analytical study of the results obtained, the dependence of the tangential force on the axial force, rock properties, and the friction coefficient was determined. The paper presents the analytical research of the possibility of regulating drilling modes in order to achieve the greatest effect from drilling by assessing the drag coefficient as a function of the intensity of destruction or deepening in one revolution. The authors have derived and proved the validity of expression of the drag coefficient dependence on the cutter penetration depth into the rock, the number of cutters at the end of the drilling tool and their size, the depth of the formed fracture groove, the cutter friction coefficient on the rock and the dynamic component of the drilling tool operation.

Key words:

Drilling, diamond cutter, full factorial experiment, tangential force, resistance coefficient, cutting force, drilling modes, deepening.

REFERENCES

1. Bukanov A.A., Gorshkov L.K., Osetskii A.I., Soloviev N.V. Printsipy konstruirovaniya i ekspluatatsii almaznogo porodorazrushayushchego instrumenta [Principles for the design and operation of diamond rock cutting tools]. *Razvedka i ohrana nedr*, 2013, no. 7, pp. 44–49.
2. Gorshkov L.K., Osetskii A.I. Development of principles for the design and operation of a new diamond rock cutting tool. *Journal of Mining Institute*, 2012, vol. 197, pp. 40–45. In Rus.
3. Brook B. Principles of diamond tool technology for sawing rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, vol. 39 (1), pp. 41–58.
4. Tonon F., Amadei B. Effect of elastic anisotropy on tunnel wall displacements behind a tunnel face. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2002, vol. 35, no. 3, pp. 141–160.
5. Neskoromnih V.V. *Razrushenie gornykh porod pri burnii skvazhin* [Destruction of rocks during drilling]. Moscow, INFRA-M; Krasnoyarsk, SFU, 2015. 336 p.
6. Kiselev A.T., Krusir I.N. *Vrashchatelno-udarnoe burenie geologorazvedochnykh skvazhin* [Rotary-shock drilling of exploration wells]. Moscow, Nedra Publ., 1984. 102 p.
7. Detournay E., Richard T., Shepherd M. Drilling response of drag bits: theory and experiment. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, vol. 45 (8), pp. 1347–1360.
8. Basarir H., Karpuz C. Preliminary estimation of rock mass strength using diamond bit drilling operational parameters. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2016, vol. 30 (2), pp. 145–164.
9. Borisov K.I. Methodology for assessing the effectiveness of the process of dynamic destruction of rocks by the tool of cutting-shearing action. *Oil industry*, 2008, vol. 8, pp. 46–47. In Rus.
10. Neskoromnih V.V., Popova M.S. Development of a drilling process control technique based on a comprehensive analysis of the criteria. *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 240, pp. 701–710. DOI: 10.31897/pmi.2019.6.701. In Rus.
11. Kardysh V.G., Murzakov B.V., Okmyanskiy A.S. *Energoemkost bureniya geologorazvedochnykh skvazhin* [Energy intensity of drilling exploration wells]. Moscow, Nedra Publ., 1984. 201 p.
12. Z. Ai, Y. Han, Y. Kuang, Y. Wang, M. Zhang. Optimization model for polycrystalline diamond compact bits based on reverse design. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, vol. 10, Iss. 6, pp. 1–12. DOI: 10.1177/1687814018781494
13. Blinov G.A., Vasiliev V.I., Glazov M.G. *Almazosberegayushchaya tekhnologiya bureniya* [Diamond-saving drilling technology]. Leningrad, Nedra Publ., 1989. 184 p.
14. Neskoromnykh V.V. *Optimizatsiya v geologorazvedochnom proizvodstve* [Optimization in geological survey production]. Moscow, INFRA-M; Krasnoyarsk, Siberian Federal University Publ., 2013. 246 p.
15. Neskoromnykh V.V., Pushmin P.S. Methodology of optimal parameters of the mode and conditions of well drilling. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektii nauk o Zemle RAEN*, 2011, no. 1 (38), pp. 151–157. In Rus.

16. Tretyak A.Ya., Popov V.V., Grossu A.N., Borisov K.A. Innovative approaches to the design of highly efficient rock cutting tools. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2017, no. 8, pp. 225–230. In Rus.
17. Su O., Ali Akcin. Numerical simulation of rock cutting using the discrete element method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, vol. 48 (3), pp. 434–442.
18. Hasan A.R., Kabir C.S. Wellbore heat-transfer modeling and applications. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2012, vol. 96–97, pp. 109–119.
19. Detournay E., Richard T., Shepherd M. Drilling response of drag bits: theory and experiment. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, vol. 45 (8), pp. 1347–1360.
20. Basarir H., Karpuz C. Preliminary estimation of rock mass strength using diamond bit drilling operational parameters. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2016, vol. 30 (2), pp. 145–164.
21. Che D., Zhu W.-L., Ehmann K.F. Chipping and crushing mechanisms in orthogonal rock cutting. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2016, no. 119, pp. 224–236.
22. Evseev V.D., Mavlyutov M.R. Puti povysheniya effektivnosti razrusheniya gornykh porod [Ways to increase the efficiency of rock destruction]. *Materialy regionalnoy konferentsii geologov Sibiri, Dalnego Vostoka i Severo-Vostoka Rossii* [Materials of the regional conference of geologists of Siberia, the Far East and North-East of Russia]. Tomsk, 2000. Vol. I, pp. 463–465.
23. Borisov K.I. *Sovremennye metody otsenki soprotivleniya gornykh porod rezaniyu-skalyvaniyu pri burenii dolotami PDC: monografiya* [Modern methods for assessing the resistance of rocks to cutting-chipping when drilling with PDC bits: monograph]. Tomsk, TPU Publ. house, 2013. 166 p.
24. Neskoromnykh V.V., Popova M.S., Kharitonov A.Yu. Influence of resistance forces on the depth of rock cutting-chipping by a diamond cutter. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 10, pp. 40–48. In Rus.
25. Do D.-P., Tran N.-H., Dang H.-L., Hoxha D. Closed-form solution of stress state and stability analysis of wellbore in anisotropic permeable rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, vol. 113, pp. 11–23.
26. Ai Z., Han Y., Kuang Y., Wang Y., Zhang M. Optimization model for polycrystalline diamond compact bits based on reverse design. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, vol. 10 (6), pp. 476–479.
27. Gao M., Zhang K., Zhou Q., Zhou H., Liu B., Zheng G. Numerical investigations on the effect of ultra-high cutting speed on the cutting heat and rock-breaking performance of a single cutter. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, July 2020, vol. 190, 107120.
28. Neskoromnykh V.V., Popova M.S., Golovchenko A.E., Petenyov P.G., Liu Baochang. Drilling control technique and experimental studies of drag forces when drilling with bits with PDC cutters. *Notes of the Mining Institute*, 2020, vol. 245, pp. 539–546. In Rus. DOI: 10.31897/PMI.2020.5.5

Received: 9 June 2021.

Information about the authors

Vyacheslav V. Neskoromnykh, Dr. Sc., professor, head of the department of technology and equipment of investigation, Institute of mining, geology and geotechnologies, Siberian Federal University.

Marina S. Popova, Cand. Sc., senior teacher, Siberian Federal University.

Liu Baochang, professor, Jilin University.

УДК 622.834

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ГРУНТОВОЙ ДАМБЫ ПРИ ЗАПОЛНЕНИИ ЧАШИ ХВОСТОХРАНИЛИЩА

Ефремов Евгений Юрьевич¹,
Efremov-eu@mail.ru

Институт горного дела УрО РАН,
Россия, 620219, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58.

Актуальность. Мониторинг деформаций грунтовых дамб хвостохранилищ – это важный элемент в обеспечении промышленной безопасности. Результатом деформационного мониторинга являются зафиксированные смещения поверхности дамб или отдельных марок деформационной сети. Однако не все фиксируемые смещения являются опасными. В данной работе обосновано разделение фиксируемых смещений на деформации склонов, представляющее опасность прорывов, и оседания вследствие сжатия нижерасположенного массива горных пород, не представляющие опасности.

Целью работы является определение характера механического воздействия заполняемого резервуара хвостохранилища на ограждающую дамбу и окружающую земную поверхность на примере одного из хвостохранилищ. Примененный подход в оценке деформирования грунтовых дамб базируется на соотношениях между наблюдаемыми смещениями, характеристиками объекта и интенсивностью складирования отходов. При этом принципиально важно, что нет зависимости между предлагаемой обработкой измерений и методами определения смещений.

Методы. Измерение и обработка результатов осуществлялись при помощи геодезических методов – геометрического нивелирования и ГНСС позиционирования. Анализ результатов производился с помощью статистических и геостатистических методов.

Результаты и выводы. Установлено, что в течение восьми серий измерений преобладающим типом смещений являются оседания. Анализ измерений показал, что горизонтальные смещения пунктов наблюдательной станции находятся на уровне погрешности измерений. Распределение оседаний марок дамбы хвостохранилища, характер деформирования головной плотины, а также отсутствие значимых горизонтальных смещений позволяют заключить, что тело дамбы находится в устойчивом состоянии, а фиксируемые оседания – проявление деформации естественного массива в основании гидросооружения под нагрузкой веса складированных хвостов.

Ключевые слова:

Грунтовые дамбы, хвостохранилище, прорыв дамб, оседания, устойчивость склонов, наблюдательная станция.

Введение

Мониторинг деформаций дамб хвостохранилищ

Аварийность хвостохранилищ представляет серьезную угрозу для жизни людей и инфраструктуры [1, 2]. Наибольшую известность получила авария, произошедшая 29 января 2019 г. на руднике Сотегодо Фејão в городе Брумадинью, Бразилия [3]. В результате прорыва дамбы погибло 270 человек, был уничтожен железнодорожный мост. Экономический ущерб составил 19 млрд долларов.

На данный момент существует достаточное количество работ, посвященных исследованиям возможных причин аварийности хвостохранилищ и грунтовых дамб [4–9] и их последствий [10–12].

Основой безопасной эксплуатации грунтовых дамб и хвостохранилищ является мониторинг состояния гидротехнических сооружений. Мониторинг необходим для того, чтобы вовремя определить нарушение наблюдаемого условия. Помимо прочего, в мониторинг гидротехнических сооружений входят визуальный контроль состояния склонов, контроль уровня грунтовых вод и мониторинг деформаций ограждающих дамб. Среди методов мониторинга деформаций распространены: ГНСС, нивелирование, тахеометры [13–15]. В последние несколько десятилетий становится доступнее мониторинг с помощью спутниковых InSAR технологий [16–18]. В подобных исследованиях, как правило, уделяется много внима-

ния деталям обработки результатов и количественным характеристикам и недостаточно внимания интерпретации результатов мониторинга.

Длительный мониторинг деформаций, позволяет отследить медленно продолжающиеся процессы, когда изменения, фиксируемые одной серией наблюдений, находятся на уровне погрешности измерений, однако накапливаются со временем. Для лучшего понимания процессов необходимо анализировать изменения не в отрыве, а совместно с другими данными об объекте. Сами по себе данные мониторинга – это лишь сырые материалы, которые должны быть правильно интерпретированы для адекватного понимания процессов, происходящих в теле грунтовых дамб

Задачи интерпретации смещений

Цель проведенных работ – определение характера механического воздействия заполняемого резервуара хвостохранилища на ограждающую дамбу и окружающую земную поверхность. Определение взаимосвязи между деформацией ограждающей дамбы и мощностью хвостохранилища.

Наиболее опасна потеря устойчивости склонов грунтовых дамб, в то время как смещения, вызванные оседаниями поверхности, не несут прямой угрозы прорыва дамб. Основной вопрос, стоящий перед настоящими исследованиями, – фиксируемые изменения оседания и деформации дамбы определяются свойствами грунтов, из которых состоит ограждаю-

щая дамба, или свойствами осадочных пород естественного основания хвостохранилища? Иными словами, требуется определить, являются ли наблюдаемые оседания дамбы в большей степени следствием деформирования тела хвостохранилища или следствием оседания земной поверхности и сжатия естественного массива под весом гидросооружения.

Задачи работы заключаются в следующем:

- 1) определение распределения смещений ограждающей дамбы и головной плотины;
- 2) определение распределения мощности плотины. Исходные данные – съемка местности, данные урезов воды на хвостохранилище;
- 3) установление наличия/отсутствия взаимосвязи между распределением мощности хвостохранилища и фиксируемой величиной смещения;
- 4) установление наличия/отсутствия взаимосвязи между приростом массы хвостохранилища и оседаниями.

Характеристика сооружения

Общие сведения

Площадь гидроузла составляет около 19 млн кв. м. Склон ограждающей дамбы на данный момент времени занимает 27 % площади хвостохранилища, по мере увеличения высоты сооружения будет занимать все большую долю общей площади. Основу хвостохранилища составляет головная плотина, возведенная вкост овражной балки в 70-х гг. прошлого века, ее длина несколько превышает 2 тыс. м, высота составляет около 130 м. По мере увеличения хвостохранилища возводится ограждающая дамба, предназначенная для создания ёмкости хвостохранилища, ее высота над рельефом колеблется от 5 до 140 м, длина по периметру около 10 тыс. м. Ограждающая дамба и головная плотина возводятся поярусно (высота яруса наращивания 5 м) шагающим экскаватором из намытых хвостов, отложившихся на надводном пляже не далее чем на 100 м от существующего яруса наращивания. Угол откоса дамбы составляет 11 градусов, рис. 1.

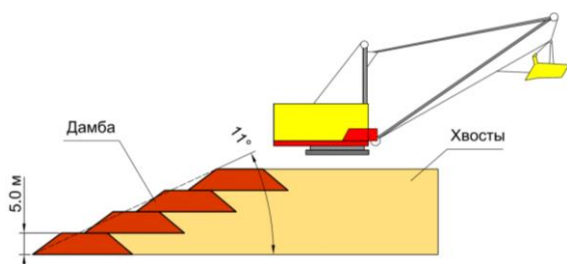


Рис. 1. Схема возведения ограждающей дамбы

Fig. 1. Scheme of the dam construction

Инженерная характеристика объекта

Окружающий рельеф представляет собой равнину, сильно расчленённую речной и овражно-балочной сетью. В районе гидроузла верхняя часть геологического разреза сложена отложениями четвертичной системы, которые покрывают всю площадь района. В инженерно-геологическом комплексе пород хвостохранилища выделяются три основных типа:

- современные техногенные грунты насыпного и намывного характера (верхняя часть разреза, мощность до 10 м);
- четвертичного и палеогенового возраста различного состава и генезиса (верхняя часть разреза, мощность до 40 м);
- мелового периода – мергельно-меловые карбонатные породы (под четвертичными и намывными породами, местами могут выходить на поверхность, мощность до 70 м).

Насыпные грунты различного состава и мощности имеют место в районах верхних уступов насыпных дамб и плотин. Их мощность от 2,0–3,0 до 6,0–7,0 м. Представлены они песками пылеватыми, кварцевого состава, железистыми, от рыхлых до плотного сложения.

Техногенные грунты намывного характера распространены ниже насыпных грунтов по телу дамб и плотин, а также непосредственно на примыкающих к ним пляжах, служащих основанием наращивания дамб. Грунты отличаются пёстрым литологическим составом, различной степенью консолидации. Они представлены хвостами обогатительной фабрики – в основном пылеватыми, в основном средней плотности и плотными, реже рыхлыми.

Из современных геологических процессов, протекающих на хвостохранилище, на надводных участках пляжей и открытых откосах дамб, характерны периодические размывы, локальные просадки грунтов, а также эрозия и связанное с ней пылеобразование. Наиболее опасные в этом отношении плотины, находящиеся в стадии наращивания. В настоящее время различным типам атмосферного влияния (воздействие потоков воздуха, осадки, температурные колебания и др.) на геологические процессы и инженерные сооружения уделяется достаточное внимание [8, 19, 20].

Мел-мергельные породы, расположенные под хвостохранилищем, относятся к полускальным грунтам. При увлажнении и разрушении они способны переходить в пластичное состояние, сопровождаемое резким понижением прочности и приобретением физико-механических свойств связных грунтов. Лабораторные исследования показывают, что в естественном (невыветрелом) состоянии при полном водонасыщении и ступенчатой нагрузке с шагом до 0,6 МПа образцы деформируются незначительно и упруго, а при снятии нагрузки образец полностью восстанавливает объем, как минимум при трех циклах нагружения [21]. Компрессионный модуль деформации мела меняется от 12,5 МПа при давлении 0,1 МПа до 74,0 МПа в интервале давлений от 0,3 до 0,6 МПа [22]. Угол внутреннего трения составляет 33 градуса, удельное сцепление – 202 кПа [23].

Таким образом, характеристики грунтов демонстрируют потенциальную возможность как проявления потери устойчивости (локальных или масштабных) с одной стороны так и возможность оседания земной поверхности в результате сжатия мел-мергельного массива.

Методика исследования

Исходные данные

Исходными данными для анализа являются данные мониторинга деформаций. Для оценки воздействия заполнения хвостохранилища на его внешний контур и окружающую среду был выбран протяженный отрезок времени, в течение которого хорошо документированы скорость заполнения хвостохранилища и уровень деформаций.

Оседания определялись на основе измеренных смещений наблюдательной сети, состоящей из грунтовых и глубинных деформационных марок, смещения определялись геодезическими методами (табл. 1, рис. 2), опорные пункты находятся на расстоянии трехсот метров от нижнего бьефа сооружения.

Нивелирование 3 класса проводится 1 раз в год для контроля оседаний ограждающей плотины, ГНСС измерения в режиме статика проводятся 2 раза в год.

Таблица 1. Состав деформационного мониторинга

Table 1. Deformation monitoring complex

Контролируемый процесс Controlled process	Количество деформационных марок Quantity of deformation marks	Тип деформационных марок Type of deformation marks	Метод определения смещений Method of displacement measurement
Вертикальные смещения ограждающей дамбы Subsidence of dyke	197	Грунтовые Ground	Нивелирование Leveling
Вертикальные смещения головной дамбы Subsidence of upstream dam bottom	10	Грунтовые поверхностные Ground surface	Нивелирование Leveling
Вертикальные смещения основания головной дамбы Subsidence bottom of upstream dam	9	Глубинные Deep	Нивелирование Leveling
Контроль устойчивости склонов ограждающей дамбы Dyke and dam slope stability	63	Поверхностные организованные в створы lined up	ГНСС измерения, статика GNSS measurements

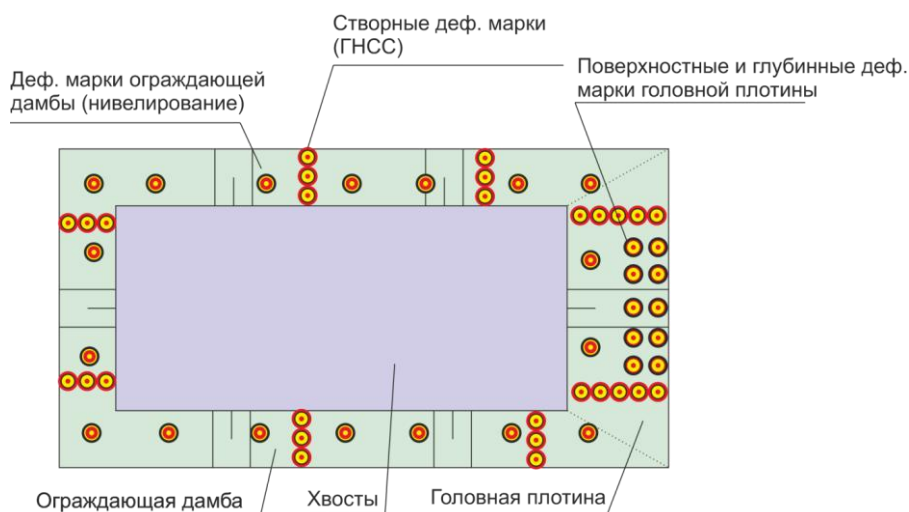


Рис. 2. Схема деформационного мониторинга

Fig. 2. Scheme of the dam deformation network

В течение выбранного периода времени произведено 8 серий измерений. Результаты каждой серии измерений сравнивались с первой серией выбранного периода. Определялись абсолютные смещения, а также скорости смещений.

Решение поставленных задач

В соответствии с задачами исследований анализировались вертикальные и горизонтальные смещения реперов. В соответствии с природой систематических ошибок отдельно анализировались наблюдения, производимые с помощью геометрического нивелирования и ГНСС измерения. Для грунтовых марок ограждающей дамбы исключались грубые

ошибки, определялись приращения вертикальных смещений между сериями измерений и накопленные за все серии.

Для створных наблюдений (осуществляемых с помощью ГНСС) определялись вектора горизонтальных смещений, анализировалось направление и абсолютная величина вектора смещения между сериями и между первой серией и последней.

Для головной плотины получены и проанализированы распределения оседаний глубинных и поверхностных марок, схема заложения приведена на рис. 3. Оседания глубинных марок при этом интерпретировались как оседания естественного массива в основании сооружения.

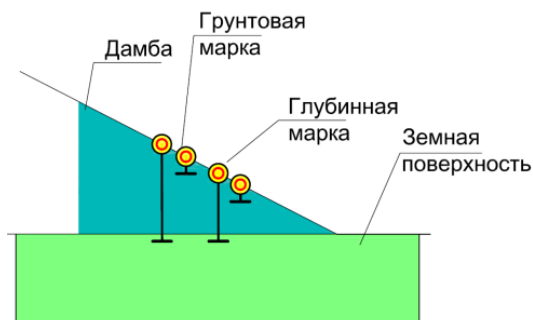


Рис. 3. Схема размещения грунтовых и глубинных марок головной плотины

Fig. 3. Layout of surface and deep deformation marks placed in downstream face

Для получения распределения мощности плотины анализировались две поверхности. Первая – поверхность исходного ландшафта (оврага, в котором началось размещение хвостов), получена путем оцифровки архивных материалов. Вторая поверхность получена на основании измерений уровня воды в прудках-накопителях и маркшейдерских измерений.

Данные площадного распределения мощности плотины, совместно с фиксируемыми оседаниями деформационных марок ограждающей дамбы были подвергнуты регрессионному анализу. В качестве объясняющей переменной использовалась мощность дамбы, в качестве зависимой – оседания ограждающей дамбы.

Для определения наличия взаимосвязи между приростом массы гидросооружения и оседаниями также использовался регрессионный анализ. В качестве зависимой переменной использовались средние значения оседания дамбы относительно первой серии. Объясняющей переменной выступил прирост массы водохранилища.

Прирост массы определялся как произведение плотности хвостов в обводненном состоянии, изменения уровня воды в отсеках и площади отсеков хвостохранилища.

Результаты

Анализ результатов ГНСС измерений створных деформационных марок склонов дамбы показывает, что долговременных смещений не выявлено. Наблюдаемая величина смещения за несколько лет примерно равна уровню погрешности измерений в данных условиях. Таким образом, значительные или направленные горизонтальные смещения склонов дамбы отсутствуют.

Фиксируемые вертикальные смещения поверхностных деформационных марок ограждающей дамбы, а также глубинных и поверхностных марок головной дамбы превышают уровень точности измерений. За исследуемые 8 серий измерений средний уровень оседаний составляет в среднем 51 мм, что соответствует оседанию 5 мм при увеличении уровня воды в отсеках на 1 м. Оседания распределены неравномерно, максимальные оседания зафиксированы в области головной плотины (рис. 4). Величина оседа-

ний головной плотины от верхнего бьефа дамбы к нижнему снижается. Минимальные оседания зафиксированы поверхностными марками в области нижнего бьефа головной части плотины, составляют около 10 мм.

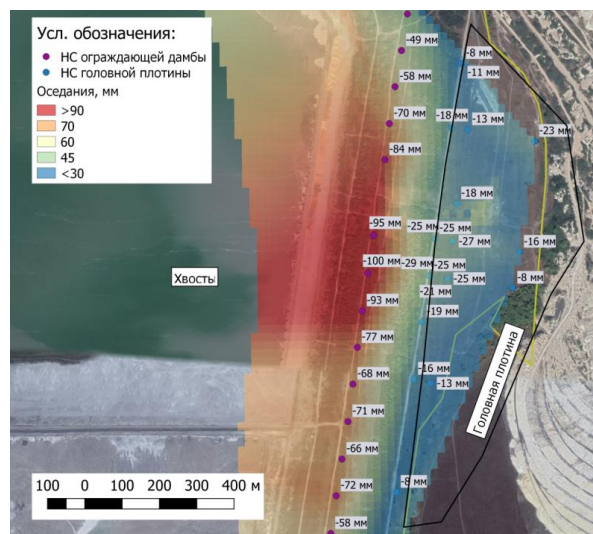


Рис. 4. Распределение оседаний в области головной плотины

Fig. 4. Subsidence distribution in the head dam area

Вертикальные смещения глубинных и поверхностных марок синхронны и близки по значениям. На первой части рис. 5 показаны оседания глубинных марок, на второй – оседания поверхностных, на третьей – совмещенные. Глубинные и поверхностные марки, в силу утери части марок, покрывают несколько разные участки массива, однако на перекрывающемся участке оседания совпадают. Данные наблюдения показывают, что напорная часть головной плотины деформируется как единое целое с естественным массивом пород.

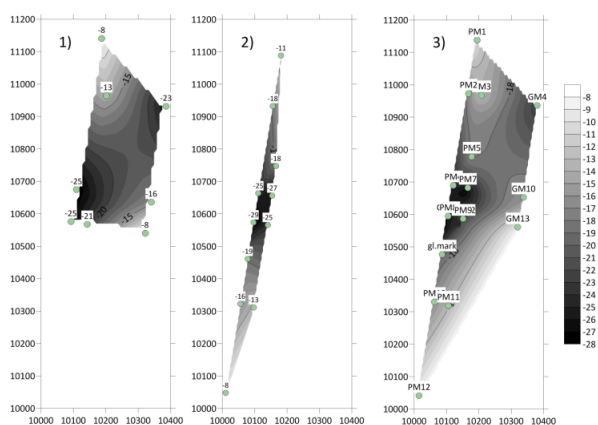


Рис. 5. Распределение оседаний деформационных марок головной плотины, мм: 1) глубинных марок; 2) поверхностных марок; 3) общее распределение оседаний

Fig. 5. Subsidence distribution of the deformation marks in the head dam area, mm: 1) deep mark; 2) surface marks; 3) complex distribution of subsidence

Для определения характера смещений ограждающей дамбы (деформации тела дамбы или оседание естественного массива) был проведен анализ распределений мощности дамбы и оседаний деформационных марок ограждающей дамбы. На рис. 6 каждой точке графика соответствует одна деформационная марка ограждающей дамбы. По оси абсцисс отложены значения мощности дамбы в области установки каждой марки, а по оси ординат – оседания марок.

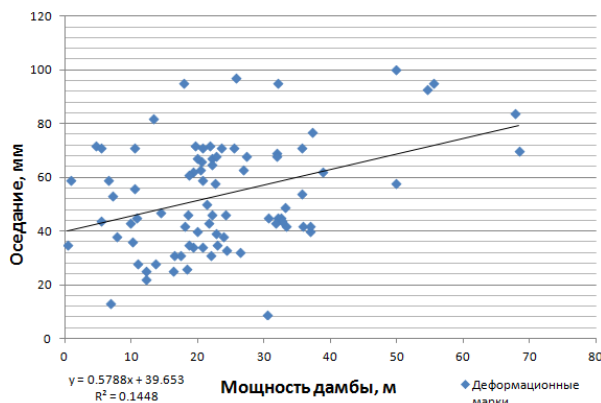


Рис. 6. График линейной регрессии оседаний деформационных марок и мощности дамбы

Fig. 6. Linear regression plot of deformation marks subsidence and dam thickness

Из графика виден существенный разброс в распределениях. Коэффициент детерминации линейной регрессии R^2 равен 0,14. Иными словами, связи между мощностью дамбы и распределением не выявлено. Соответственно, причиной наблюдаемых смещений является сжатие естественного массива, находящегося под сооружением. Однако остается открытым вопрос соответствия максимальных зафиксированных оседаний и наибольшей мощности дамбы в районе головной плотины. Возможно наличие тонкой, менее очевидной связи, данный вопрос требует дальнейших исследований.

График зависимости оседаний дамбы от массы складированных хвостов изображен на рис. 7. Каждой точке графика соответствует одна серия измерений. По оси абсцисс отложен прирост массы, который определялся как произведение ежегодного прироста объема хвостохранилища на плотность складированных хвостов в увлажненном состоянии. Значения усредненных оседаний дамбы по сериям измерений отложены по оси ординат, определялись как среднее арифметическое оседаний грунтовых марок ограждающей дамбы хвостохранилища за исключением грубых выбросов измерений. Из графика видно, что ко-

эффициент детерминации линейной регрессии R^2 составляет 0,86, что свидетельствует о наличии значимой связи.



Рис. 7. График зависимости оседаний дамбы от массы складированных хвостов, мм

Fig. 7. Graph of the relationship of the dam subsidence and the mass of the stored tailings, mm

Заключение

Результаты исследования позволили установить характер оседаний ограждающей дамбы и головной плотины хвостохранилища. Установлено, что горизонтальные смещения склонов дамбы хвостохранилища близки к точности определения, а оседания ограждающей дамбы показывают устойчивую связь с приростом массы хвостохранилища. Распределение оседаний марок дамбы хвостохранилища, характер деформирования головной плотины, а также отсутствие значимых горизонтальных смещений позволяют заключить, что тело дамбы находится в устойчивом состоянии, а фиксируемые оседания – проявление деформации естественного массива в основании гидросооружения под нагрузкой веса складированных хвостов.

Примененный подход в оценке деформирования хвостохранилищ базируется на соотношениях между наблюдаемыми смещениями, характеристиками объекта и интенсивностью складирования отходов. При этом принципиально важно, что нет зависимости между предлагаемой обработкой измерений и методами определения смещений. Это одинаково годится для наземных и спутниковых технологий, лазерного сканирования, InSAR или классического нивелирования. Подход позволяет определять соотношение между опасными постепенным скольжением (с потерей устойчивости верхних слоев дамбы) и безопасными вертикальными смещениями, связанными с деформацией массива горных пород под сооружением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Foster M., Fell R., Spannagle M. The statistics of embankment dam failures and accidents // Canadian Geotechnical Journal. – 2000. – V. 37. – P. 1000–1024. URL: <https://doi.org/10.1139/t00-030> (дата обращения: 13.03.2020).
2. Design, construction and management of tailings storage facilities for surface disposal in China: case studies of failures / Z. Wei, G. Yin, J.G. Wang, L. Wan, G. Li // Waste Management & Research. – 2013. – V. 31. – P. 106–112. DOI: 10.1177/0734242X12462281
3. Chronology of major tailings dam failures (from 1960 to 2019). WISE uranium project, tailings dam safety. WISE (World Information Service on Energy). URL: <http://www.wise-uranium.org/mdaf.html> (дата обращения: 13.03.2020).
4. Characterizing the spatial distribution and fundamental controls of landslides in the three gorges reservoir area, China / S. Li, Q. Xu, M. Tang, J. Iqbal, J. Liu, X. Zhu, F. Liu, D. Zhu // Bulletin of engineering geology and the environment. – 2019. – V. 78. – P. 4275–4290. DOI: 10.1007/s10064-018-1404-5

5. Strength and deformation of tailings with fine-grained interlayers / Q. Chen, C. Zhang, C. Yang, C. Ma, Z. Pan, J. Daemen // *Engineering geology*. – 2019. – V. 256. – P. 110–120. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.04.007
6. Mechanical behavior and particle breakage of tailings under high confining pressure / C. Zhang, Q. Chen, Z. Pan, C. Ma // *Engineering geology*. – 2020. – V. 265. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.105419
7. Razavi S.K., Bonab M.H., Dabaghian A. Investigation into the internal erosion and local settlement of Esfarayen Earth-Fill Dam // *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. – 2020. – V. 146. URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002216](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002216) (дата обращения: 13.03.2020).
8. Ageing deformation of tailings dams in seasonally frozen soil areas under freeze-thaw cycles / J. Jin, S. Li, C. Song, X. Zhang, X. Lv // *Scientific reports*. – 2019. – V. 9. DOI: 10.1038/s41598-019-51449-6
9. Meng X. Research on the cause analysis and application of monitoring technology of damping body deformation in tailings reservoir // *Proc. of the 2018 International Workshop on Advances in Social Sciences (IWASS 2018)*. – Fuzhou, China, 2018. – P. 545–548. DOI: 10.25236/iwass.2018.112
10. Empirical and semi-analytical models for predicting peak outflows caused by embankment dam failures / B. Wang, Y. Chen, C. Wu, Y. Peng, J. Song, W. Liu, X. Liu // *Journal of Hydrology*. – 2018. – V. 562. – P. 692–702. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.05.049
11. Mohamed M.M.A. Overtopping breach peak outflow approximation of embankment dam by using Monte Carlo method // *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*. – 2018. – V. 7. – P. 724–732. URL: <https://doi.org/10.1016/j.bjbas.2018.10.002> (дата обращения: 13.03.2020).
12. Froehlich D.C. Peak outflow from breached embankment dam // *Journal of Water Resources Planning and Management*. – 1995. – V. 121. URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1995\)121:1\(90\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1995)121:1(90)) (дата обращения: 13.03.2020).
13. Geodetic investigation of landslides and land subsidence: case study of the Bhurkunda coal mines and the Sirobagarh landslide / A. Tiwari, A. Narayan, R. Dwivedi, A. Swadeshi, S. Pasari, O. Dikshit // *Surveyreview*. – V. 52. – Iss. 371. – P. 134–149. DOI: 10.1080/00396265.2018.1531654.
14. Displacements study of an earth fill dam based on high precision geodetic monitoring and numerical modeling / E. Acosta, C. de Lacy, I. Ramos, J. Cano, M. Herrera, M. Aviles, J. Antonio // *Sensors*. – V. 18. – P. 1369. DOI: 10.3390/s18051369.
15. Estimating and comparing dam deformation using classical and GNSS techniques / R. Barzaghi, N. Cazzaniga, C. Gaetani, L. Pinto, V. Tornatore // *Sensors*. – V. 18. – P. 756. DOI: 10.3390/s1803075.
16. Perspectives on the prediction of catastrophic slope failures from satellite InSAR / T. Carla, E. Intriери, F. Raspini, F. Bardi, P. Farina, A. Ferretti, D. Colombo, F. Novali, N. Casagli // *Scientific reports*. – 2019. – V. 9. DOI: 10.1038/s41598-019-50792-y.
17. Consolidation settlement of Salt Lake County tailings impoundment revealed by time-series InSAR observations from multiple radar satellites / X. Hu, T. Oommen, Z. Lu, T. Wang, J. Kim // *Remote sensing of environment*. – 2017. – V. 202. – P. 199–209. DOI: 10.1016/j.rse.2017.05.023
18. Risk assessment for tailings dams in Brumadinho of Brazil using InSAR time series approach / Z. Du, L. Gea, A. Hay-Man Ng, Q. Zhu, F.G. Horgand, Q. Zhang // *Science of The Total Environment*. – 2020. – V. 717. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137125> (дата обращения: 13.03.2020).
19. Wan C.F., Fell R. Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. – 2004. – V. 130. URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:4\(373\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:4(373)) (дата обращения: 13.03.2020).
20. Селезнев А.А., Тетерин А.Ф., Ярмошенко И.В. Метеорологические условия формирования поверхностного стока наносов в период весеннего снеготаяния в городской среде // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 2. – С. 7–16. DOI: 10.18799/24131830/2020/2/2476
21. Колтунов Н.В. Обобщенная характеристика физико-механических свойств мелко-мергельных пород правобережья Дона // *Студенческий научный форум: V Международная студенческая научная конференция*. – Белгород: Белгородский государственный национальный исследовательский университет, 2013. URL: <http://scienceforum.ru/2013/article/2013003242> (дата обращения: 13.03.2020).
22. Овчинников А.В., Кучеренко А.П., Аладьин В.П. Прочностные характеристики мелового грунта определенные по результатам испытаний методом одноплоскостного среза // *II Всероссийская заочная (с международным участием) научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов*. – Белгород, 2012. – С. 13–16. URL: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2013/C11/V1/214.pdf> (дата обращения: 13.03.2020).
23. Овчинников А.В. Лабораторные испытания полускального мелового грунта для определения модуля деформации // *Новые дороги России*. – Саратов: ООО «Издательский центр «Наука», 2011. – С. 233–239.

Поступила 19.04.2021 г.

Информация об авторах

Ефремов Е.Ю., научный сотрудник Института горного дела УрО РАН.

UDC 622.834

ANALYSIS OF THE EMBANKMENT DAM DEFORMATION DURING TAILING STORAGE RESERVOIR FILLING

Evgeniy Yu. Efremov,
Efremov-eu@mail.ru

Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
58, Mamin-Sibiriyak street, Yekaterinburg, 620219, Russia.

Relevance. Monitoring of earth-filled tailings dams deformation is an important element of industrial safety. The result of deformation monitoring is the defined displacement of dam surface or individual marks of the deformation network. However, not all displacements are dangerous. In this paper, the author justified the separation of displacements into slope deformations, which is a risk of dam failure, and subsidence due to compression of the underlying rock mass that are not dangerous.

The purpose of the research is to assess the mechanical effect of the storing tailings on the surrounding earth-filled dam and the underlying rock mass; determine the prevailing nature of the observed deformation marks displacements – the dam ground layer sliding or subsidence of the earth's surface under the influence of the mass of stored mining waste.

Research methods are geostatistical analysis of vertical and horizontal displacements of the deformation network marks. The displacements of the deformation marks were determined using GNSS measurements and leveling.

Conclusions. It is established that the predominant type of displacements is subsidence. Horizontal displacements are equal to the level of measurement error. Investigation have shown that the observed displacements are not a result of the sliding of the earth-filled dam's material, but subsidence caused by compression of the rock mass under the influence of the weight of the tailings.

Key words:

Earth-filled tailings dams, tailing storage, dam failure, slope stability, deformation network.

REFERENCES

1. Foster M., Fell R., Spannagle M. The statistics of embankment dam failures and accidents. *Canadian Geotechnical Journal*, 2000, vol. 37, pp. 1000–1024. Available at: <https://doi.org/10.1139/t00-030> (accessed 13 March 2020).
2. Wei Z., Yin G., Wang J.G., Wan L., Li G. Design, construction and management of tailings storage facilities for surface disposal in China: case studies of failures. *Waste Management & Research*, 2013, vol. 31, pp. 106–112. DOI: 10.1177/0734242X12462281
3. Chronology of major tailings dam failures (from 1960 to 2019). WISE uranium project, tailings dam safety. *WISE (World Information Service on Energy)*. Available at: <http://www.wise-uranium.org/mdaf.html> (accessed 13 March 2020).
4. Li S., Xu Q., Tang M., Iqbal J., Liu J., Zhu X., Liu F., Zhu D. Characterizing the spatial distribution and fundamental controls of landslides in the three gorges reservoir area, China. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 2019, vol. 78, pp. 4275–4290. DOI: 10.1007/s10064-018-1404-5
5. Chen Q., Zhang C., Yang C., Ma C., Pan Z., Daemen J. Strength and deformation of tailings with fine-grained interlayers. *Engineering geology*, 2019, vol. 256, pp. 110–120. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.04.007
6. Zhang C., Chen Q., Pan Z., Ma C. Mechanical behavior and particle breakage of tailings under high confining pressure. *Engineering geology*, 2020, vol. 265. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.105419
7. Razavi S.K., Bonab M.H., Dabaghian A. Investigation into the internal erosion and local settlement of Esfarayen Earth-Fill Dam. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 2020, vol. 146. Available at: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002216](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002216) (accessed 13 March 2020).
8. Jin J., Li S., Song C., Zhang X., Lv X. Ageing deformation of tailings dams in seasonally frozen soil areas under freeze-thaw cycles. *Scientific reports*, 2019, vol. 9. DOI: 10.1038/s41598-019-51449-6.
9. Meng X. Research on the cause analysis and application of monitoring technology of damping body deformation in tailings reservoir. *Proc. of the 2018 International Workshop on Advances in Social Sciences (IWASS 2018)*. Fuzhou, China, 2018. pp. 545–548. DOI: 10.25236/iwass.2018.112
10. Wang B., Chen Y., Wu C., Peng Y., Song J., Liu W., Liu X. Empirical and semi-analytical models for predicting peak outflows caused by embankment dam failures. *Journal of Hydrology*, 2018, vol. 562, pp. 692–702. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.05.049
11. Mohamed M.M.A. Overtopping breach peak outflow approximation of embankment dam by using Monte Carlo method. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 2018, vol. 7, pp. 724–732. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.bjbas.2018.10.002> (accessed 13 March 2020).
12. Froehlich D.C. Peak outflow from breached embankment dam. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1995, vol. 121. Available at: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1995\)121:1\(90\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1995)121:1(90)) (accessed 13 March 2020).
13. Tiwari A., Narayan A., Dwivedi R., Swadeshi A., Pasari S., Dikshit O. Geodetic investigation of landslides and land subsidence: case study of the Bhurkunda coal mines and the Sirobagarh landslide. *Survey review*, vol. 52, Iss. 371, pp. 134–149. DOI: 10.1080/00396265.2018.1531654.
14. Acosta E., De Lacy C., Ramos I., Cano J., Herrera M., Aviles M., Antonio J. Displacements study of an earth fill dam based on high precision geodetic monitoring and numerical modeling. *Sensors*, vol. 18, pp. 1369. DOI: 10.3390/s18051369.
15. Barzaghi R., Cazzaniga N., Gaetani C., Pinto L., Tornatore V. Estimating and comparing dam deformation using classical and GNSS techniques. *Sensors*, vol. 18, pp. 756. DOI: 10.3390/s1803075.
16. Carla T., Intrieri E., Raspini F., Bardi F., Farina P.P., Ferretti A., Colombo D., Novali F., Casagli N. Perspectives on the prediction of catastrophic slope failures from satellite InSAR. *Scientific reports*, 2019, vol. 9. DOI: 10.1038/s41598-019-50792-y.
17. Hu X., Oommen T., Lu Z., Wang T., Kim J. Consolidation settlement of Salt Lake County tailings impoundment revealed by time-series InSAR observations from multiple radar satellites. *Remote sensing of environment*, 2017, vol. 202, pp. 199–209. DOI: 10.1016/j.rse.2017.05.023
18. Du Z., Gea L., Hay-Man A., Ng, Zhu Q., Horgand F.G., Zhang Q. Risk assessment for tailings dams in Brumadinho of Brazil using InSAR time series approach. *Science of The Total Environment*, 2020, vol. 717. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137125> (accessed 13 March 2020).
19. Wan C.F., Fell R. Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, vol. 130. Available at: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:4\(373\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:4(373)) (accessed 13 March 2020).
20. Selesnev A.A., Teterin A.F., Yarmosenko I.V. Meteorological conditions of surface sediment runoff formation during spring

- snowmelt in urban environment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 2, pp. 7–16. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2020/2/2476.
21. Koltunov N.V. Obobshchennaya kharakteristika fiziko-mekhanicheskikh svoystv melo-mergelnykh porod pravoberezhya dona [A generalized characteristic of the physico-mechanical properties of the fine marl rocks of the right bank of the Don]. V *Mezhdunarodnaya studencheskaya nauchnaya konferentsiya. Studenteskiy nauchny forum* [V International Student Scientific Conference. Student Scientific Forum]. Belgorod, Belgorod national university, 2021. Available at: <http://scienceforum.ru/2013/article/2013003242> (accessed 13 March 2020).
22. Ovchinnikov A.V., Kucherenko A.P., Aladin V.P. Prochnostnye lharakteristiki melovogo grunta opredelennye po rezul'tatam ispytaniy metodom odnoploskostnogo sreza [Resisting power of cretaceous soils using shear test]. II *Vserossiyskaya zaochnaya (s mezhdunarodnym uchastiem) nauchno-prakticheskaya konferentsiya molodykh uchenykh, aspirantov i studentov* [II All-Russian correspondence (with international participation) scientific and practical conference of young scientists, graduate students and students]. Belgorod, 2012. pp. 13–16. Available at: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2013/C11/V1/214.pdf> (accessed 13 March 2020).
23. Ovchinnikov A.V. Laboratornye ispytaniya poluskalnogo melovogo grunta dlya opredeleniya modulya deformatsii [Laboratory tests of semi-rocky chalky soil for determining the deformation modulus]. *Novye dorogi Rossii* [New Roads of Russia]. Saratov, Nauka Publ. LLC, 2011. pp. 233–239.

Received: 19 April 2021.

Information about the authors

Evgeniy Yu. Efremov, researcher, Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

УДК 621.315.22

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГОННЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НЕФТЕПОГРУЖНОГО КАБЕЛЯ

Глазырин Александр Савельевич^{1,2},
asglazyrin@tpu.ru

Исаев Юсуп Ниязбекович¹,
isaev_yusup@mail.ru

Кладиев Сергей Николаевич¹,
kladiev@tpu.ru

Леонов Андрей Петрович¹,
leonov_ap@tpu.ru

Раков Иван Витальевич³,
rakovivan@live.com

Колесников Станислав Вячеславович¹,
svk3@tpu.ru

Ланграф Сергей Владимирович⁴,
sergeylgrf@gmail.com

Филипас Александр Александрович¹,
filipas@tpu.ru

Копырин Владимир Анатольевич⁵,
kopyrinva@gmail.com

Хамитов Рустам Нуриманович^{6,5},
apple_27@mail.ru

Ковалев Владимир Захарович²,
vz_kovalev@mail.ru

Лавринович Алексей Валериевич⁷,
lavrinovich86@yandex.ru

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

² Югорский государственный университет,
Россия, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16.

³ ООО Научно-производственное предприятие «Томская электронная компания»,
Россия, 634040, г. Томск, ул. Высоцкого, 33.

⁴ ООО «НПФ Мехатроника-Про»,
Россия, 634021, г. Томск, пр. Фрунзе, 119Е.

⁵ Тюменский индустриальный университет,
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

⁶ Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11.

⁷ Томский научно-исследовательский и проектный институт нефти и газа,
Россия, 634027, г. Томск, пр. Мира, 72.

Актуальность. Определение основных электрических параметров нефтепогружных кабелей связано с необходимостью создания точных математических моделей станции управления системами – нефтепогружной кабель – погружной электродвигатель, в которых необходимо учитывать волновые процессы в протяженной кабельной линии, возникающие в связи с формой импульсов, генерируемых преобразователями частоты, входящими в состав современных пультов управления. Электрические параметры, такие как линейная емкость и индуктивность, не стандартизированы в технической литературе и не указываются в технических характеристиках производителями кабелей. Однако, очевидно, что создание систем управления и идентификация режимов работы ПЭД требует решения систем дифференциальных уравнений, включающих в качестве параметров заданные характеристики. Кроме того, современные концепции частотного регулирования электродвигателей, в частности погружных, указывают на то, что при работе преобразователей частоты на базе IGBT-транзисторов в сигнале питания ПЭД возникают высокочастотные перенапряжения, приводящие к появлению частичных разрядов в обмотках статора моторов. Этот факт будет усугубляться развитием более сильных полей с увеличением длины кабеля и, соответственно, большим влиянием волновых процессов на форму сигнала, подаваемого на ПЭД.

Цель исследования заключается в разработке методики определения погонных электротехнических параметров нефтепогружного кабеля любых конструкций и используемых материалов.

Методы: методы решения дифференциальных уравнений, полевых задач, численное конечно-элементное моделирование.

Результаты. Разработана методика определения погонных емкостей и погонных индуктивностей жил и брони нефтепогружного кабеля, основанная на решении дифференциальных уравнений для эталонной «справочной» модели и численном моделировании идентичной конструкции в COMSOL Multiphysics® Version 5.5a. Указано, что конечно-элементное моделирование в COMSOL Multiphysics® Version 5.5a корректно и с достаточной точностью (ошибка менее 5 %) совпадает с результатами решения уравнений, приведенных в справочной литературе. Определены погонные значения емкостей и индуктивностей для наиболее распространенных конструкций нефтепогружных кабелей.

Ключевые слова:

Механизированная добыча нефти, нефтепогружной кабель, электрическое поле, электрический потенциал, магнитное поле, векторный магнитный потенциал, уравнение Максвелла, скин-эффект, погружной электродвигатель.

Введение

Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 г. в качестве одной из мер обеспечения энергетической безопасности страны предусматривает «введение в экономический оборот ... трудноизвлекаемых запасов (в том числе баженовской свиты), ... на основе инновационных отечественных технологий и оборудования» [1].

Баженовская свита – крупнейшая в мире нефтеносная формация, располагающаяся в Западной Сибири на площади около одного миллиона км².

По оценкам Роснедр, в баженовской свите содержится 180–360 млрд баррелей извлекаемых запасов, а по мнению специалистов из US EIA (2013 г.), в свите суммарные запасы составляют около 1,2 трлн баррелей нефти, из которых 74 млрд могут быть технически извлекаемыми. Учитывая эти данные, возрастающее внимание к «бажену» легко объяснимо. Несомненно, свою роль здесь сыграла сланцевая революция в США, наглядно показав потенциальные перспективы разработки подобных горизонтов и необходимость создания соответствующих технологических инструментов.

Интерес, проявленный к «бажену» крупнейшими нефтедобывающими компаниями «Сургутнефтегаз», «Роснефть», «РуссНефть», РИТЭК и «Газпром нефть», привел к созданию в Ханты-Мансийском автономном округе (ХМАО) технологического центра «Бажен» [2]. Компанией «Газпром нефть» разработан паспорт федерального проекта «Освоение баженовской свиты в Западной Сибири» [2].

С технологических позиций баженовская свита по своему строению и геомеханическим свойствам пород является полным антиподом основного объекта сланцевой добычи – Среднего Бакена (Северная Дакота, США), на котором отработывались сланцевые технологии [3]. В частности, характерная особенность баженовской свиты – высокие пластовые температу-

ры и давление, осложненные глубиной залегания пластов [4–6, 7–10].

Указанная специфика «бажена» усугубляет проблему надежного и энергоэффективного извлечения продукции из скважины. Основной инструмент здесь – установки электроцентробежных насосов (УЭЦН). По данным ОАО «НК «Роснефть», работа группы из 223 скважин с высокой потребляемой мощностью на «традиционных» месторождениях, из-за тепловых потерь в кабельных линиях, питающих данные УЭЦН, привела к сверхнормативным потерям электроэнергии около 50 млн кВт*ч/год [7]. Эксплуатация УЭЦН в условиях «бажена» очевидно существенно усугубит эту ситуацию. Исправить ее можно только путем построения фундаментальной модели кабельной линии [11, 12], что создаст предпосылки для последующей энергоэффективной оптимизации модели и перехода к промышленной разработке баженовской свиты.

Нефтепогружные кабели (НПК) имеют полимерную изоляцию, медные или алюминиевые токопроводящие жилы, а также оболочку из материалов соответствующего класса нагревостойкости, поверх которых накладывается стальная броня. Кабели для нефтепогружных электронасосов представлены в круглом (К) (рис. 1, а) и плоском (П) (рис. 1, б) исполнении. НПК должен обеспечивать надёжное электроснабжение в условиях воздействия агрессивных факторов, возникающих в скважине в течение всего срока эксплуатации [13].

В задачах проектирования систем управления нефтепогружными двигателями значительной сложностью является моделирование электромагнитных процессов в кабельных линиях [14–17, 18–22].

Известно, что типовые П- и Г-образные электрические схемы замещения кабельных линий в общем виде состоят из погонных значений индуктивности $L_{\text{пог}}$ (Гн/м), сопротивления $r_{\text{пог}}$ (Ом/м), проводимости $g_{\text{пог}}$ (См/м) и ёмкости $C_{\text{пог}}$ (Ф/м).

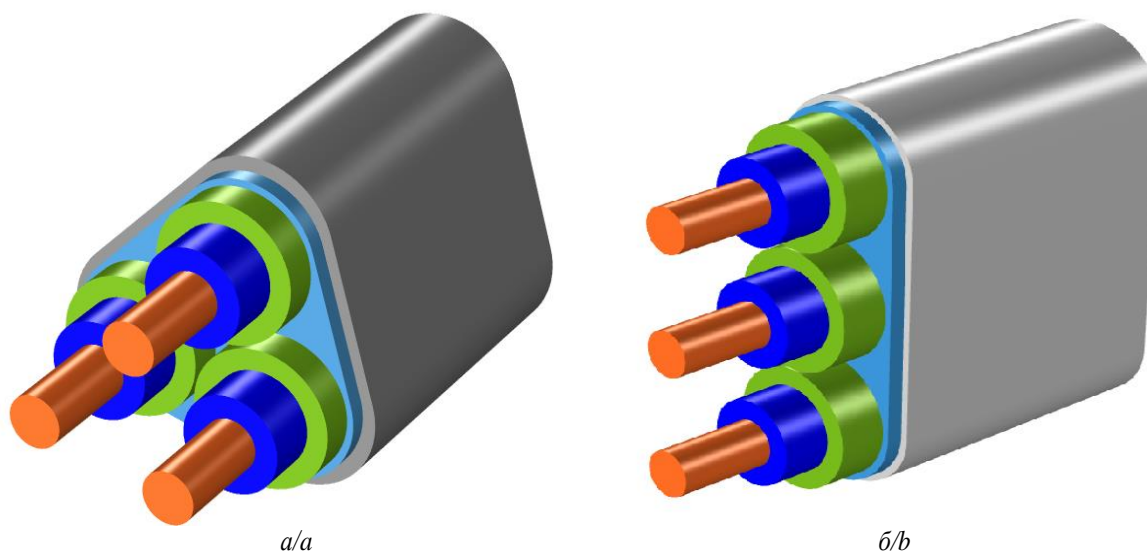


Рис. 1. Кабели для нефтепогружных электронасосов в круглом (К) (а) и плоском (П) (б) исполнении
Fig. 1. Oil submersible cable of round (a) and flat (b) design

Значения проводимости изоляции и сопротивления токопроводящих жил нормированы [18]. Однако определение погонных индуктивностей и погонных ёмкостей конструктивных элементов НПК представляет собой актуальную задачу.

В данной работе на основе методов численного компьютерного моделирования произведён расчёт погонных ёмкостей и погонных индуктивностей токопроводящих жил с учётом эффекта вытеснения токов. Произведено сравнение значений погонных параметров кабеля, полученных по предлагаемой методике, со значениями, полученными на основе известных аналитических выражений и справочных данных.

Описание общего подхода к моделированию

Численное моделирование выполнялось в программном пакете COMSOL Multiphysics® Version 5.5a. Алгоритм проверки результатов, полученных по предлагаемой методике, построен следующим образом:

- проводится решение аналитического уравнения для описанной в справочной литературе [19] геометрии, имеющей в своём составе тот же набор проводящих элементов, что и нефтепогружной кабель – три параллельных проводника, расположенных внутри цилиндрического экрана; пространство между ними заполнено однородным диэлектриком с заранее заданной диэлектрической проницаемостью. Геометрические размеры проводников и экрана соответствуют размерам для кабеля КПБК-90 3×25 и принимаются постоянными по всей длине кабеля;
- описанная выше геометрия, которая является аналитической моделью кабеля с «воздушным» диэлектриком (рис. 2), численно моделируется в COMSOL Multiphysics®;
- значения, полученные решением справочного аналитического уравнения, и значения, полученные при компьютерном моделировании, сравниваются, вычисляется ошибка, делается вывод о корректности численного моделирования.

Описание математической модели для расчета ёмкостей

Составим систему уравнений Максвелла для взаимных ёмкостей элементов кабеля.

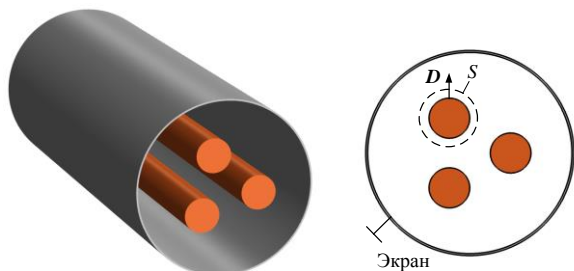


Рис. 2. Аналитическая модель кабеля с «воздушным» диэлектриком

Fig. 2. Analytical cable model with air gap

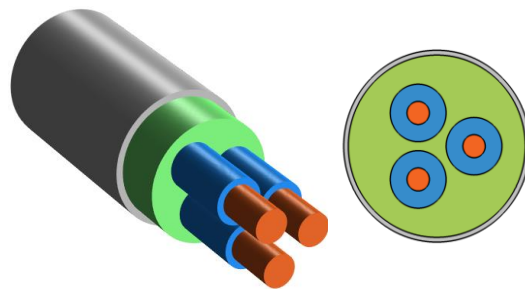


Рис. 3. Аналитическая модель кабеля с двухслойным (с разным значением ϵ) диэлектриком

Fig. 3. Analytical cable model with two-layer dielectric (with different values of ϵ)

Уравнения Максвелла для взаимных ёмкостей:

$$\begin{cases} Q_1 = C_{11}\varphi_1 + C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) + C_{13}(\varphi_1 - \varphi_3); \\ Q_2 = C_{21}(\varphi_2 - \varphi_1) + C_{22}\varphi_2 + C_{23}(\varphi_2 - \varphi_3); \\ Q_3 = C_{31}(\varphi_3 - \varphi_1) + C_{32}(\varphi_3 - \varphi_2) + C_{33}\varphi_3. \end{cases} \quad (1)$$

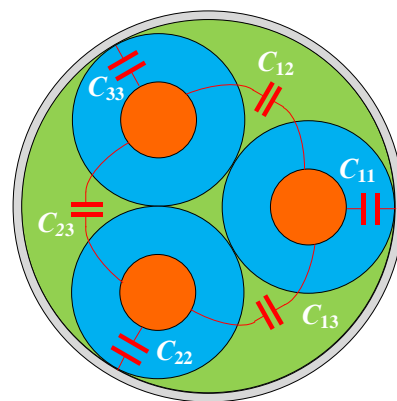


Рис. 4. Распределение ёмкостей в кабеле

Fig. 4. Distribution of capacities in the cable

Из представленной системы уравнений можно видеть, что, когда выполняется условие (рис. 4) $\varphi_3 = \varphi_2 = 0$, $\varphi_1 = 1$ заряды на поверхности электродов равны величине взаимных емкостей $Q_2 = C_{21}$, $Q_3 = C_{31}$ (второе и третье уравнения системы (1), отрицательный знак определяется направлением интегрирования (2)).

Для того чтобы найти заряд Q будем использовать теорему Гаусса, утверждающую, что заряд, образующийся на поверхности электродов, равен поверхностному интегралу от вектора смещения (рис. 2)

$$Q = \oint D dS. \quad (2)$$

Здесь \mathbf{D} – вектор электрического смещения; S – площадь поверхности интегрирования. Для определения вектора смещения \mathbf{D} будем использовать распределение потенциала электростатического поля для конфигурации электродов, представленных на рис. 2. Для этого необходимо решить уравнение Лапласа

$$\Delta\varphi = \frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} = 0 \quad (3)$$

с учетом условий на границе раздела сред и краевых условий на поверхности экрана для уравнения (3) имеем, $\varphi=0$ и на поверхности электродов $\varphi_1=1$, $\varphi_2=0$, $\varphi_3=0$. Затем определяется градиент потенциала φ для расчета напряженности электростатического поля \mathbf{E} и вектор электрического смещения \mathbf{D} при известной диэлектрической проницаемости среды ε

$$\mathbf{E} = \text{grad}(\varphi) = \mathbf{i} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial \varphi}{\partial y}, \quad \mathbf{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \mathbf{E}. \quad (4)$$

Для решения поставленной задачи использовался пакет COMSOL Multiphysics® Version 5.5a. Верификация расчета производилась на справочной аналитической модели, представленной на рис. 2, 3. Результаты расчетов приведены на рис. 5.

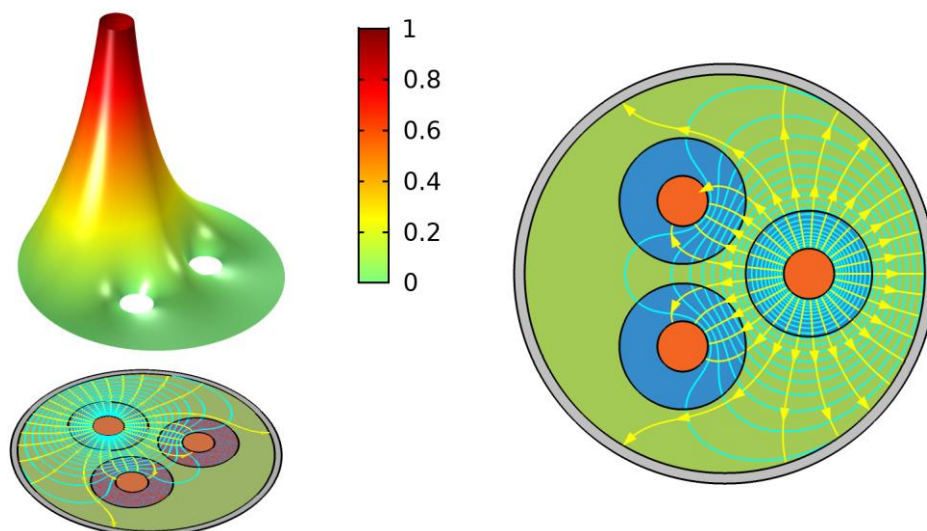


Рис. 5. Конечно-элементная модель. Линии со стрелочками – силовые линии электростатического поля \mathbf{E} , поверхность – распределение потенциала φ в области, ограниченной экраном. Видно, что для потенциалов на электродах выполняется условие $\varphi_3=\varphi_2=0$, $\varphi_1=1$. Справа на рисунке приведена шкала потенциалов. Диэлектрическая проницаемость среды и изоляции считались одинаковыми, $\varepsilon=1$

Fig. 5. FEM-model. Arrowed lines – the lines of force of the electrostatic field \mathbf{E} , the surface – potential φ distribution in the area bounded by the cable screen. It can be seen that the condition $\varphi_3=\varphi_2=0$, $\varphi_1=1$ is satisfied for potentials on the electrodes. The potential scale is shown on the right in the figure. The permittivity was considered to be the same, $\varepsilon=1$

Таблица 1. Расчёт ёмкостей для кабеля с «воздушным» диэлектриком (рис. 2, 3)

Table 1. Calculation of capacitances for cable model with air gap dielectric (Fig. 2, 3)

Геометрические размеры, мм/Geometric dimensions, mm				
Радиус экрана $R=22$ Screen radius $R=22$		Расстояние от центра кабеля до центра жилы $d=0,58$ Distance from the cable center to the core center $d=0,58$		
Идеализированная модель Idealized model	C_{12}	C_{13}	C_{23}	C_{11}
	Ф/м/F/m			
	3.483E-12	3.483E-12	3.483E-12	2.0735E-11
Конечно-элементная модель Finite element model	C_{12}	C_{13}	C_{23}	C_{11}
	Ф/м/F/m			
	3.522E-12	3.522E-12	3.520E-12	2.086E-11
Ошибка/Error, %	1,11	1,11	1,07	0,58

Рассчитаем аналитическое выражение (5) из справочника [19] для трехпроводной линии, расположенной симметрично внутри цилиндрической оболочки (рис. 2). Тот же результат будет справедливым и для рис. 3, если положить все диэлектрические проницаемости равными одинаковой величине.

$$C_{12} = C_{13} = C_{23} \approx \frac{2\pi\varepsilon}{3 \ln \left[\frac{\sqrt{3}d}{a} \cdot \frac{R^2 - d^2}{\sqrt{d^4 + R^4 + R^2 d^2}} \right]} - N, \quad (5)$$

$$N \approx \frac{2\pi\varepsilon}{3 \ln \left\{ \frac{R^3}{3d^2 a} \left[1 - \left(\frac{d}{R} \right)^6 \right] \right\}}$$

Как видно, расхождение значений, полученных аналитическим и конечно-элементным моделированием (табл. 1), составляет менее 2 %.

На рис. 7 приведен результат расчета распределения потенциалов φ и электростатического поля \mathbf{E} , токопроводящая жила с конфигурацией, представленной на рис. 6, для кабеля КПБК-90 3×25, имеющего треугольную поперечную форму. Расчет ёмкостей для кабеля сведен в табл. 2.

Таблица 2. Расчёт ёмкостей для кабеля КПБК-90 3×25

Table 2. Calculation of capacities for cable КПБК-90 3×25

Расчетная модель Computational model	C_{12}	C_{13}	C_{23}	C_{11}
	Ф/м/F/m			
	1.2761E-11	1.2761E-11	1.2761E-11	5.0786E-11

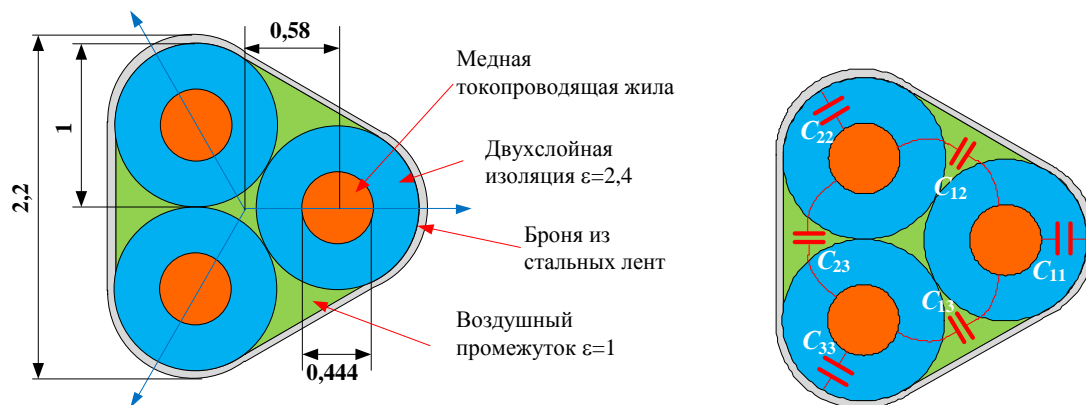


Рис. 6. Моделируемый кабель марки КПБК-90 3×25. Здесь C_{11} , C_{22} , C_{33} – ёмкости между жилами и бронёй, C_{12} , C_{13} , C_{23} – ёмкости между жилами

Fig. 6. Simulated cable KPBK-90 3×25. C_{11} , C_{22} , C_{33} are the capacitances between the cores and the armoring, C_{12} , C_{13} , C_{23} are the capacities between the cores

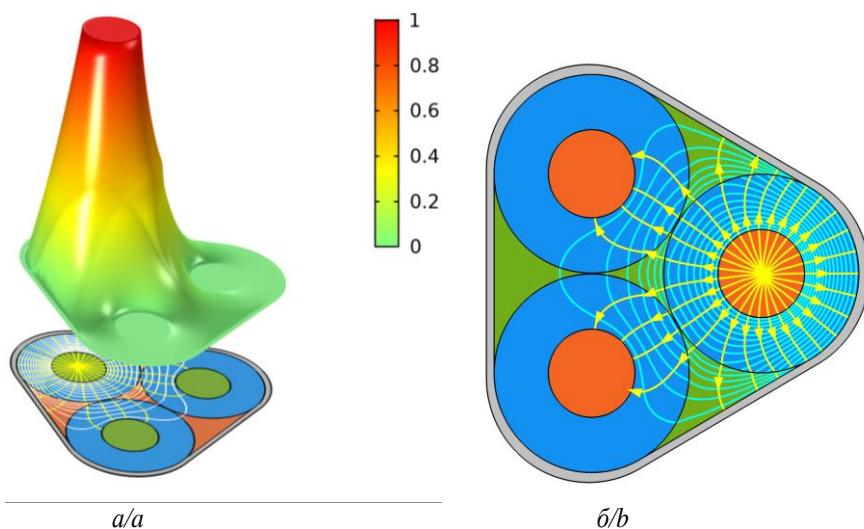


Рис. 7. а) Поверхность – пространственное распределение потенциала φ ; б) распределение потенциала φ и силовых линий E в плоскости

Fig. 7. a) spatial distribution of potential; b) distribution of potential φ and electric field E lines on the plane

Таблица 3. Расчёт ёмкостей для кабеля КПБП-90 3×25
 Table 3. Calculation of capacities for cable KPBП-90 3×25

Расчетная модель Computational model	C_{11}	C_{12}	C_{13}
	Ф/м/Ф/м		
	1.0164E-10	1.9501E-11	9.7672E-15
	C_{21}	C_{22}	C_{23}
	Ф/м/Ф/м		
	1.9501E-11	6.7408E-11	1.9481E-11
	C_{31}	C_{32}	C_{33}
	Ф/м/Ф/м		
	9.7672E-15	1.9481E-11	1.0164E-10

На рис. 9, 10 приведены результат расчета распределения потенциалов φ и электростатического поля E , токопроводящая жила с конфигурацией, представленной на рис. 8, для кабеля КПБК-90 3×25, имеющего плоскую поперечную форму. Расчет ёмкостей для кабеля сведен в табл. 2. На рис. 9 представлено распределение электрических величин φ и E для определения погонных емкостей центральной жилы, а на рис. 10 – распределение электрических величин φ и E для определения погонных емкостей

крайних жил. Результаты расчетов емкостей сведены в табл. 3.

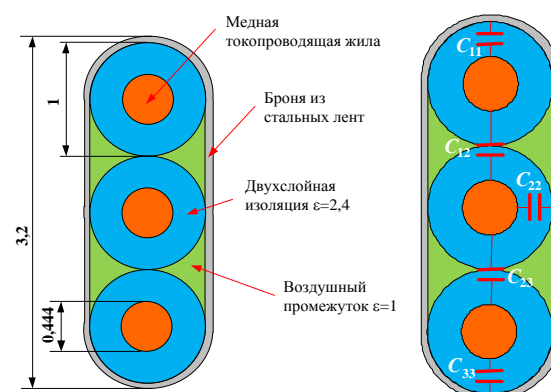


Рис. 8. Моделируемый кабель марки КПБП-90 3×25. Здесь C_{11} , C_{22} , C_{33} – ёмкости между жилами и бронёй; C_{12} , C_{13} , C_{23} – ёмкости между жилами

Fig. 8. Simulated cable KPBП-90 3×25. C_{11} , C_{22} , C_{33} are the capacitances between the cores and the armoring, C_{12} , C_{13} , C_{23} are the capacities between the cores

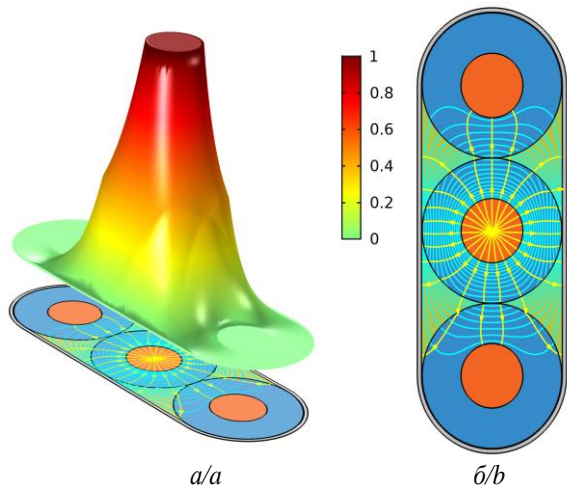


Рис. 9. а) пространственное распределение потенциала φ в нефтепогружном кабеле для определения C_{12} , C_{23} , C_{13} ; б) распределение потенциала и силовых линий \mathbf{E} в нефтепогружном кабеле для определения C_{12} , C_{23} , C_{13}

Fig. 9. a) spatial distribution of the potential in the oil-submersible cable for determining C_{12} , C_{23} , C_{13} ; б) distribution of potential and magnetic field lines in the oil-submersible cable for determining C_{12} , C_{23} , C_{13}

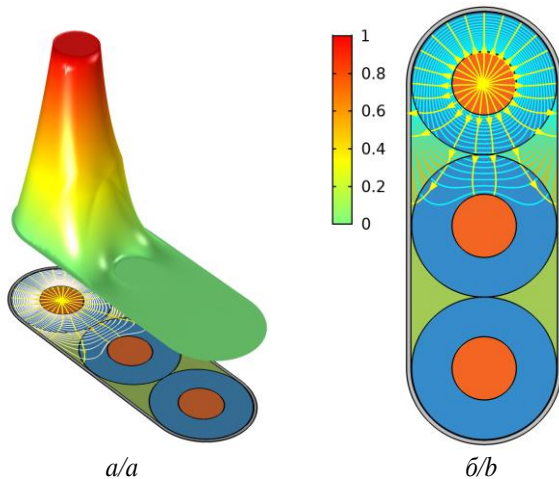


Рис. 10. а) Пространственное распределение потенциала φ в нефтепогружном кабеле для определения C_{11} , C_{22} , C_{33} ; б) распределение потенциала и силовых линий \mathbf{E} в нефтепогружном кабеле для определения C_{11} , C_{22} , C_{33}

Fig. 10. a) spatial distribution of the potential in the oil-submersible cable for determining C_{11} , C_{22} , C_{33} ; б) distribution of potential and magnetic field lines in the oil-submersible cable for determining C_{11} , C_{22} , C_{33}

Описание математической модели для расчета индуктивностей и сопротивления

Оценка скин-эффекта. При подаче высокочастотного напряжения на проводник в нём будут протекать высокочастотные токи, которые порождают явление скин-эффекта и представляют собой распределение плотности тока по сечению проводника таким образом, что оно оказывается выше на периферии проводника, а в центре происходит его ослабление. При этом чем выше частота тока, тем сильнее проявление скин-

эффекта. Проанализируем явление скин-эффекта в проводнике круглого сечения. Рассчитаем распределение тока в проводнике в цилиндрических координатах.

Циркуляции напряженности магнитного и электрического полей описываются уравнением Максвелла:

$$\begin{aligned} \mathbf{rot} \mathbf{H} &= \begin{pmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ H_x & H_y & H_z \end{pmatrix} = \mathbf{i} \left(\frac{\partial}{\partial y} H_z - \frac{\partial}{\partial z} H_y \right) + \\ &+ \mathbf{j} \left(\frac{\partial}{\partial z} H_x - \frac{\partial}{\partial x} H_z \right) + \\ &+ \mathbf{k} \left(\frac{\partial}{\partial x} H_y - \frac{\partial}{\partial y} H_x \right) = \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \\ \mathbf{rot} \mathbf{E} &= \begin{pmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ E_x & E_y & E_z \end{pmatrix} = \mathbf{i} \left(\frac{\partial}{\partial y} E_z - \frac{\partial}{\partial z} E_y \right) + \\ &+ \mathbf{j} \left(\frac{\partial}{\partial z} E_x - \frac{\partial}{\partial x} E_z \right) + \\ &+ \mathbf{k} \left(\frac{\partial}{\partial x} E_y - \frac{\partial}{\partial y} E_x \right) = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{H}. \end{aligned} \quad (6)$$

Перейдя в частотную область и выполнив операцию взятия ротора первого уравнения (6), получим дифференциальное уравнение:

$$\begin{aligned} \mathbf{rot} \mathbf{E} &= j\omega\mu_0\mu\mathbf{H} \rightarrow \mathbf{rot} \mathbf{J} = \\ &= -j\omega\mu_0\mu\sigma\mathbf{H} \rightarrow \mathbf{rot} \mathbf{rot} \mathbf{J} = -j\omega\mu_0\mu\sigma\mathbf{J} \end{aligned}$$

с учетом уравнения непрерывности $\nabla \mathbf{J} = 0$ получаем уравнения Гельмгольца для расчета распределения плотности тока по сечению проводника

$$\Delta \mathbf{J} + j\omega\mu_0\mu\sigma\mathbf{J} = 0. \quad (7)$$

Для расчета уравнения Гельмгольца (7) авторами использовался COMSOL Multiphysics® Version 5.5a, основанный на методе конечных элементов. Выполнялись следующие краевые условия для данной задачи:

- при заданном полном токе провода $I=1$ А для напряженности магнитного поля \mathbf{H} на краю проводника при $r=R$ выполнялось соотношение:

$$H = \frac{1}{q} \frac{dJ}{dr} = \frac{I}{2\pi R}, \quad q^2 = -j\omega\mu_0\sigma;$$

- при $r=0$ плотность тока J является величиной конечной.

Результаты расчетов приведены на рис. 11.

Наряду с распределением плотности поля вычислялись индуктивность L и сопротивление R провода от частоты f с помощью напряжения проводника U , которое определялось через напряженность электрического поля \mathbf{E} на поверхности проводника

$$\frac{U}{I} = Z = R + j\omega L, \quad \rightarrow R(\omega) = \text{Re} \left(\frac{U}{I} \right), \quad L(\omega) = \text{Im} \left(\frac{U}{\omega I} \right).$$

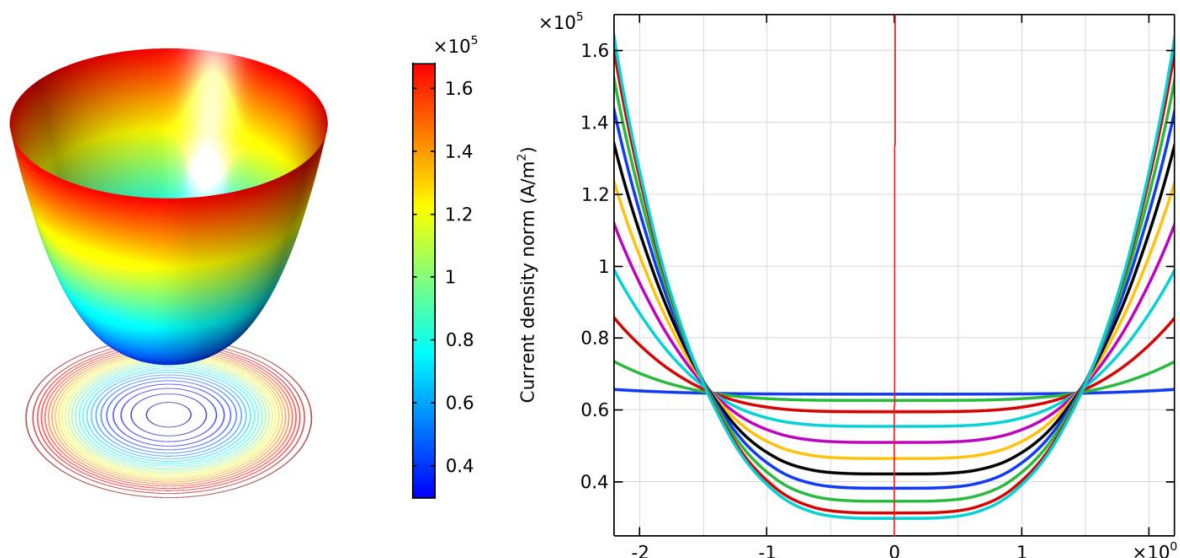


Рис. 11. Пространственное распределение плотности тока по сечению проводника при частоте $f=10$ кГц (слева), профиль распределения плотности тока для частот от 500 Гц до 10 кГц с интервалом 1 кГц (справа). Радиус проводника 0,222 см

Fig. 11. Spatial distribution of current density over the conductor cross-section at frequency $f=10$ kHz (left), current density distribution profile for frequencies from 500 Hz to 10 kHz with interval of 1 kHz (right). The radius of the conductor is 0,222 cm

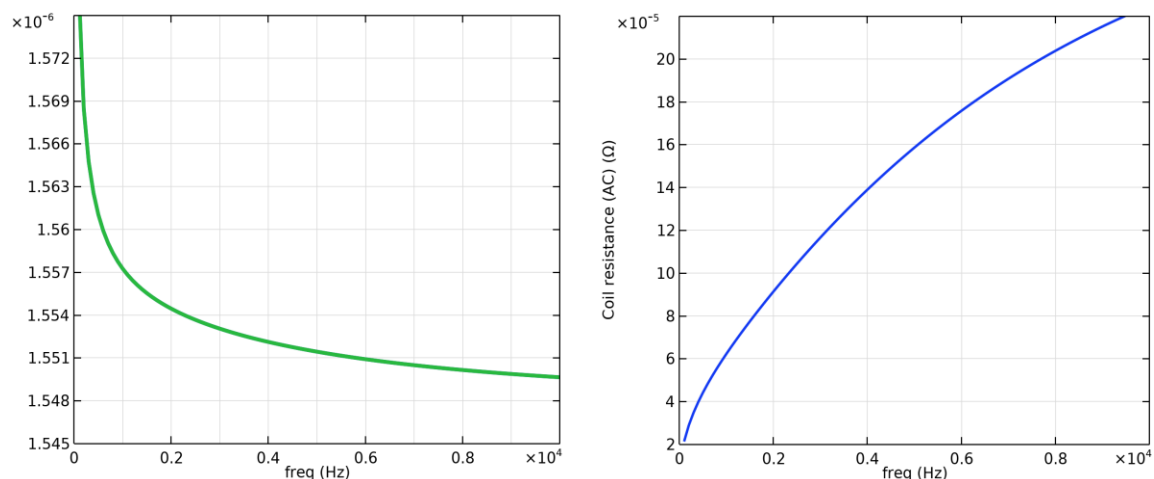


Рис. 12. Зависимость индуктивности (левая кривая) и сопротивления проводника от частоты для диапазона частот от 0 до 10 кГц. Радиус проводника 0,222 см

Fig. 12. Dependence of inductance (left curve) and resistance of the conductor on frequency for the frequency range from 0 to 10 kHz, the radius of the conductor is 0,222 cm

Расчеты показывают (рис. 12), что индуктивность в заданном частотном диапазоне изменяется приблизительно на 2 % по отношению к индуктивности при постоянном токе, в то время как сопротивление меняется существенно.

Расчет индуктивностей и сопротивлений типовых конфигураций нефтепогружных кабелей

Рассчитаем индуктивности и сопротивления для конфигураций кабелей, приведенных на рис. 1.

Приведем необходимую систему уравнений для расчёта индуктивностей и сопротивлений трехфазной системы проводников. Запишем плотность тока проводимости и смещения и циркуляцию вектора магнитной напряженности:

$$\mathbf{J} = (\sigma + j\omega\epsilon)\mathbf{E}, \quad \text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J}. \quad (8)$$

Принимая во внимание калибровку полей через вспомогательную величину – векторный магнитный потенциал \mathbf{A} ,

$$\text{rot } \mathbf{A} = \mathbf{H}, \quad \text{rot } \mathbf{E} = -j\omega \text{rot } \mathbf{A}, \quad (9)$$

получим уравнение Гельмгольца на основе (8), (9) для векторного магнитного потенциала:

$$\frac{1}{\mu\mu_0} \Delta \mathbf{A} + (j\sigma\omega - \omega^2\epsilon)\mathbf{A} = 0. \quad (10)$$

При расчете принималось, что амплитуды токов в проводниках определялись соотношением:

$$I_1 = 1A, I_2 = \exp(j2\pi/3)A, I_3 = \exp(-j2\pi/3)A. \quad (11)$$

Использование пакета COMSOL Multiphysics® Version 5.5a, позволило рассчитать распределение магнитного потенциала \mathbf{A} из (10) для трехфазных токов (11) методом конечных элементов. Распределение напряженности электрического поля \mathbf{E} позволило определить потенциалы и напряжения проводников U . Ниже приводятся результаты расчетов.

Комплексы сопротивлений определялись выражениями:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{U_1}{I_1} = Z_1 = R_1 + j\omega L_1, \rightarrow R_1(\omega) = \operatorname{Re}\left(\frac{U_1}{I_1}\right), \\ L_1(\omega) = \operatorname{Im}\left(\frac{U_1}{\omega I_1}\right), \\ \frac{U_2}{I_2} = Z_2 = R_2 + j\omega L_2, \rightarrow R_2(\omega) = \operatorname{Re}\left(\frac{U_2}{I_2}\right), \\ L_2(\omega) = \operatorname{Im}\left(\frac{U_2}{\omega I_2}\right), \\ \frac{U_3}{I_3} = Z_3 = R_3 + j\omega L_3, \rightarrow R_3(\omega) = \operatorname{Re}\left(\frac{U_3}{I_3}\right), \\ L_3(\omega) = \operatorname{Im}\left(\frac{U_3}{\omega I_3}\right). \end{array} \right. \quad (12)$$

Для верификации метода рассчитанная индуктивность основанная на соотношениях (11), (12) сравнивалась с индуктивностью, полученной аналитическим методом, приведенной в справочнике [19] для трехфазной симметричной системы проводов без экрана (рис. 13).

Примем $d=0,5$ см, $r=0,12$ см, тогда

$$L_1 = L_2 = L_3 \approx \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln\left(\frac{d\sqrt{3}}{r}\right) + \frac{1}{4} \right) = 4,4528 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м.}$$

Конечно-элементное моделирование дает следующие величины индуктивностей и сопротивлений при частоте 1000 Гц:

$$L_1 = L_2 = L_3 = 4,4515 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м;}$$

$$R_1 = R_2 = R_3 = 3,69 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/м.}$$

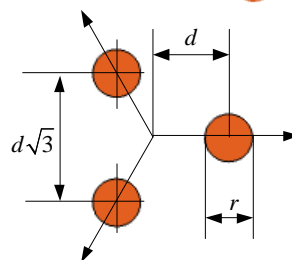
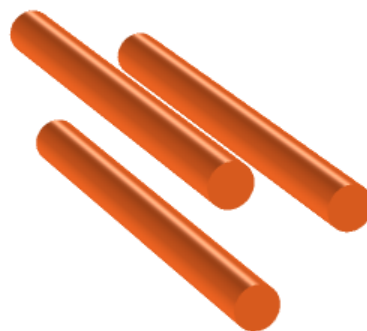


Рис. 13. Симметричное расположение проводников
 Fig. 13. Symmetrical arrangement of conductors

Для расчета индуктивностей и сопротивлений кабелей, представленных на рис. 1, необходимо учитывать наведения токов Фуко в броне кабеля, обусловленных вращающимся магнитным полем. Поэтому расчет индуктивностей по справочным формулам будет неточным. Авторами использовался алгоритм конечных элементов, реализованный в пакете COMSOL Multiphysics. Рассчитывался векторный магнитный потенциал \mathbf{A} (9) с учетом наличия заземленного провода, далее рассчитывалось электрическое поле \mathbf{E} (8) и напряжение U . При известных напряжениях и токах рассчитывались комплексные сопротивления и индуктивности на основе формул (12). Изменяющееся вращающееся магнитное поле продемонстрировано на рис. 14, для случая плоской конфигурации жил. Для случая треугольной конфигурации жил, вращающееся магнитное поле приведено на рис. 15. Результаты расчета индуктивностей и сопротивлений для кабеля КПБП-90 3×25 сведены в табл. 4.

Результаты расчетов емкостей и сопротивлений сведены в табл. 5.

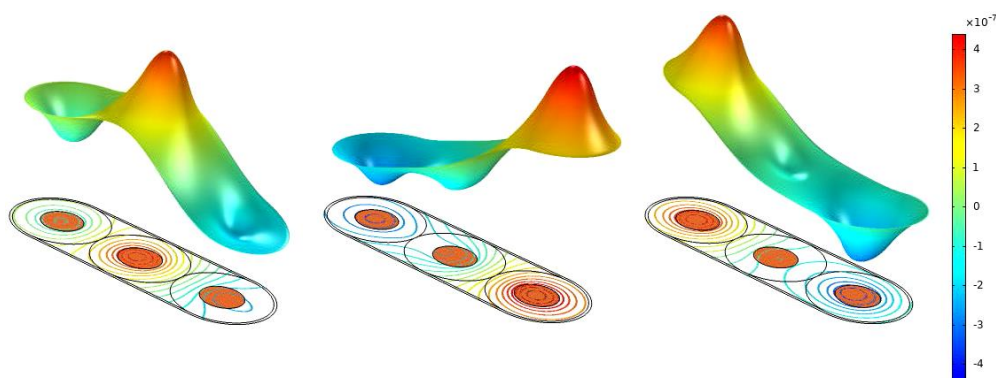


Рис. 14. Распределение векторного магнитного потенциала \mathbf{A} в пределах экранирующей брони в различные моменты времени, показывающее вращение магнитного поля для кабеля плоского сечения

Fig. 14. Distribution of the vector magnetic potential \mathbf{A} within the shielding armor at various points in time, showing the rotation of the magnetic field for a flat-section cable

Таблица 4. Расчет индуктивностей и сопротивлений для кабеля КПБП-90 3×25

Table 4. Calculation of inductances and resistances for cable KPBP-90 3×25

Расчетная модель Computational model	L_1	L_2	L_3	R_1	R_2	R_3
	Гн/м/Н/м			Ом/м/Ω/м		
	3.8706E-7	3.8706E-7	3.8706E-7	0,001404	0,001404	0,001404

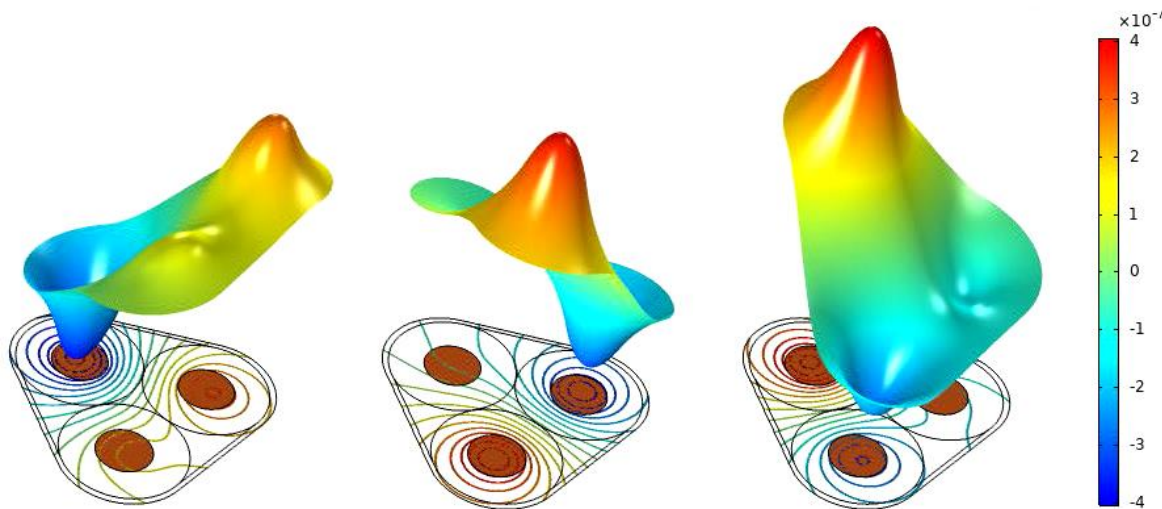


Рис. 15. Распределение векторного магнитного потенциала A в пределах экранирующей брони в различные моменты времени, показывающее вращение магнитного поля для кабеля круглого сечения

Fig. 15. Distribution of the vector magnetic potential A within the shielding armor at various points in time, showing the rotation of the magnetic field for a round design cable

Таблица 5. Расчет индуктивностей и сопротивлений для кабеля КПБК-90 3×25

Table 5. Calculation of inductances and resistances for cable KPBC-90 3×25

Расчетная модель Computational model	L_1	L_2	L_3	R_1	R_2	R_3
	Гн/м/Н/м			Ом/м/Ω/м		
	3.5191E-7	3.5191E-7	3.5191E-7	0,010769	0,010769	0,010769

Заключение

На основе метода конечных элементов, реализованного в пакете COMSOL Multiphysics, авторами рассчитаны электротехнические параметры погружных кабелей, таких как погонные индуктивности, сопротивления и ёмкости. Расчеты проведены для кабелей марок КПБК-90 3×25 (круглый) и КПБП-90 3×25 (плоский). Частотный спектр электромагнитных по-

лей находился в диапазоне 0...10 кГц. Результаты расчетов электротехнических параметров погружных кабелей показали, что алгоритм, используемый авторами, дает удовлетворительные результаты и в частных случаях совпадает с результатами расчётов по аналитическим выражениям с погрешностью в пределах 1...2 %. В работе показано, что ошибка, вносимая скин-эффектом, не превышает 2 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. – М.: Юрид. лит., 2020. – 93 с.
2. Тихонов С. Короля играет свита. Баженовская свита и поддержание объемов нефтедобычи в Западной Сибири // Нефтегазовая Вертикаль. – 2019. – № 12. – С. 34–43.
3. Глухманчук Е.Д., Крупицкий В.В., Леонтьевский А.В. Баженовская нефть – «сланцевые технологии» и отечественный опыт добычи // Недропользование XXI век. – 2015. – № 7. – С. 32–37.
4. Баженовский горизонт Западной Сибири: строение, корреляция и толщины / С.В. Рыжкова, Л.М. Бурштейн, С.В. Ершов, В.А. Казаненков, А.Э. Конторович, В.А. Конторович, А.Ю. Нехаев, Б.Л. Никитенко, М.А. Фомин, Б.Н. Шурыгин, А.Л. Бейзель, Е.В. Борисов, О.В. Золотова, Л.М. Калинина, Е.В. Пономарева // Геология и геофизика. – 2018. – Т. 59. – № 7. – С. 1053–1074.
5. Баженовская свита – главный источник ресурсов нетрадиционной нефти в России / А.Э. Конторович, Л.М. Бурштейн, В.А. Казаненков, В.А. Конторович, Е.А. Костырева, Е.В. Пономарева, С.В. Рыжкова, П.А. Ян // Георесурсы, геознергетика, геополитика. – 2014. – № 2 (10). – С. 2–10.
6. Конторович А.Э. За нефтью и газом нужно идти в Арктику. На баженовскую свиту и на мелкие месторождения... // Нефтегазовая вертикаль. – 2019. – № 14 (458). – С. 12–17.
7. Якимов С.Б. Современное состояние и перспективные направления снижения тепловых потерь в кабельных линиях УЭЦН большой мощности в ОАО «НК "Роснефть"» // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2016. – № 3. – С. 40–46.
8. Liang X., He J., Du L. Electrical submersible pump system grounding: current practice and future trend // IEEE Trans. Ind. Appl. – 2015. – V. 5. – P. 5030–5037.
9. Liang X., Ghoreishi O., Xu W. Downhole tool design for conditional monitoring of electrical submersible motors in oil field facilities // IEEE Trans. Ind. Appl. – 2017. – V. 53. – P. 3164–3174.
10. Evolving technologies: electrical submersible pumps / C. Bremner, G. Harris, A. Kosmala, B. Nicholson, A. Ollre, M. Percy et al. // Oilfield Rev. – 2006. – V. 18. – P. 30–43.
11. Electrical modelling of an electrical submersible pump system three-phase power cable used in power line communication / D. Fonseca, A. Salazar, N. Goncalves, V. Villarreal // Przegląd Elektrotechniczny. – 2019. – V. 10. – P. 22–26.
12. Mathematical models of synchronous generators for different spatial distances of disturbance point / Y.N. Isaev, V.A. Kolchanova,

- S.S. Tarasenko, O.V. Tikhomirova // International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). – 2015. – P. 1–5. URL: ieeexplore.ieee.org/document/7414894 (дата обращения 20.04.2021).
13. IEEE Draft Recommended Practice for Specifying Electric Submersible Pump Cable-Ethylene-Propylene Rubber Insulation // IEEE P1018/D07. – 2012 17 November. – P. 1–43. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6357350> (дата обращения 20.04.2021).
 14. Downhole telemetry systems to monitor electric submersible pumps parameters in oil well / D.A. de Moura Fonsêca, A.O. Salazar, E.R.L. Villarreal, G.A. Echaiz Espinoza, A.C.Q.B. Leite // IEEE Access. – 2021. – V. 9. – P. 12824–12839.
 15. Han J., Qiang G. Research on downhole multi-parameters monitoring system // Proc. of the 7th International Power Electronics and Motion Control Conference. – Harbin, China, 2012. – P. 2765–2768.
 16. Fully retrievable ESP: a new artificial lift concept / S. Spagnolo, S. Pilone, L. Corti, G. Liantonio, G. Rizza, G.E. Tita, D.N. Kitsoukou // International Petroleum Technology Conference. – Beijing, China, 2013. – 115 p.
 17. Liang X., Fleming E. Electrical submersible pump systems: evaluating their power consumption // IEEE Ind. Appl. Mag. – 2013. – V. 19. – P. 46–55.
 18. ГОСТ Р 51777-2001. Кабели для установок погружных электронасосов. Общие технические условия. – М.: ИПК «Издательство стандартов», 2001. – 18 с.
 19. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: справочная книга. 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
 20. Metwally I.A., Gastli A. Factors affecting transient overvoltages of electric submersible pumps // IEEE Potentials. – 2006. – V. 25. – № 5. – P. 13–17.
 21. Иоссель Ю.Я., Кочанов Э.С., Струнский М.Г. Расчет электрической емкости. – СПб: Энергоиздат, 1981. – 288 с.
 22. Overvoltage mitigation of submersible motors with long cables of different lengths / Y. Liu, L. Wang, H. Gao, H. Zhang, D. Xu // 17th International Conference on Electrical Machines and Systems. – Hangzhou, China, 2014. – P. 638–644.

Поступила 22.05.2021 г.

Информация об авторах

Глазырин А.С., доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета; профессор Института нефти и газа Югорского государственного университета.

Исаев Ю.Н., доктор физико-математических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета; профессор отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Кладиев С.Н., кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Леонов А.П., кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Раков И.В., инженер-проектировщик АСУ ТП, ООО Научно-производственное предприятие «Томская электронная компания».

Колесников С.В., ассистент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Ланграф С.В., кандидат технических наук, руководитель сектора разработки встроенного ПО, ООО «НПФ Мехатроника-Про».

Филипас А.А., кандидат технических наук, доцент отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Копырин В.А., кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета.

Хамитов Р.Н., доктор технических наук, профессор кафедры электрической техники Омского государственного технического университета; профессор кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета.

Ковалев В.З., доктор технических наук, профессор Института нефти и газа Югорского государственного университета.

Лавринович А.В., инженер I категории, отдела по высоковольтному оборудованию, Томский научно-исследовательский и проектный институт нефти и газа.

UDC 621.315.22

DETERMINATION OF RUNNING ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF OIL SUBMERSIBLE CABLE

Alexander S. Glazyrin^{1,2},
asglazyrin@tpu.ru

Yusup N. Isaev¹,
isaev_yusup@mail.ru

Sergey N. Kladiev¹,
kladiev@tpu.ru

Andrey P. Leonov¹,
leonov_ap@tpu.ru

Ivan V. Rakov³,
rakovivan@live.com

Stanislav V. Kolesnikov¹,
svk3@tpu.ru

Sergey V. Langraf⁴,
sergeylgrf@gmail.com

Alexander A. Filipas¹,
filipas@tpu.ru

Vladimir A. Kopyrin⁵,
kopyrinva@gmail.com

Rustam N. Khamitov^{6,5},
apple_27@mail.ru

Vladimir Z. Kovalev²,
vz_kovalev@mail.ru

Alexey V. Lavrinovich⁷,
lavrinovich86@yandex.ru

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

² Yugra State University, 1
6, Chekhov street, Khanty-Mansiysk, 628012, Russia.

³ Scientific Manufacturing Enterprise «Tomsk Electronic Company», Ltd.,
33, Vysotsky street, Tomsk, 634040, Russia.

⁴ NPF Mechatronica-Pro LTD,
119E, Frunze avenue, Tomsk, 634021, Russia.

⁵ Industrial University of Tyumen,
38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russia.

⁶ Omsk State Technical University,
11, Mira avenue, Omsk, 644050, Russia.

⁷ Tomsk Research and Design Institute of Oil and Gas,
72, Mira avenue, Tomsk, 634027, Russia.

The relevance. Determination of the main electrical parameters of oil submersible cables is associated with the need to create accurate mathematical models of the systems control station – oil submersible cable – submersible motor, in which it is necessary to take into account wave processes in a long cable line arising in connection with the shape pulses generated by frequency converters included in the set of modern control stations. Electrical parameters such as linear capacities and inductances are not standardized in the technical literature and are not indicated in the technical specifications by cable manufacturers. However, it is obvious that the creation of control systems and identification of the SEM operation modes requires the solution of systems of differential equations, which include the specified characteristics as parameters. In addition, modern concepts of frequency control of electric motors, in particular submersible, indicate that during operation of frequency converters based on IGBT transistors, high-frequency overvoltages arise in the SEM supply signal, leading to the appearance of partial discharges in the stator windings of the motors. This fact will be aggravated by the development of deeper fields, with a longer cable length and, accordingly, a greater influence of wave processes on the shape of the signal supplied to the SEM.

The main aim of the research consists in development of a method for determining the linear electrical parameters of the submersible cable of any designs and materials used.

Methods: methods for solving differential equations, field problems, numerical finite element modeling, and a physical experiment.

Results. A method was developed for determining the linear capacities and inductances of conductors and armor of an oil-submersible cable, based on solving differential equations for a «reference» model, numerical modeling of an identical design in COMSOL Multiphysics® Version 5.5a, comparison of the obtained values with experimental data. It is indicated that the finite element modeling in COMSOL Multiphysics® Version 5.5a is correct and with sufficient accuracy (error less than 5 %) coincides with the results of solving the equations given in the reference literature. The linear values of capacities and inductances have been determined for the most common designs of oil-submersible cables.

Key words:

Mechanized oil production, oil submersible cable, electric field, electric potential, magnetic field, vector magnetic potential, Maxwell's equation, skin effect, submersible electric motor.

REFERENCES

1. *Energeticheskaya strategiya Rossiyskoy federatsii na period do 2035 goda* [Energy strategy of the Russian Federation for the period up to 2035]. Moscow, State Publ. House of Legal Literature, 2020. 93 p.
2. Tikhonov S.A. *Korolya igraet svita. Bazhenovskaya svita i podderzhanie obemov neftedobychi v Zapadnoy Sibiri* [The Bazhenovskaya suite plays the king and the maintenance of oil production in Western Siberia]. Moscow, Neftegazovaya Vertikal Publ., 2019. No. 12, pp. 34–43.
3. Glukhmanchuk E.D., Krupitsky V.V., Leontievsky A.V. Bazhenov oil – «shale technologies» and domestic production experience. *Subsoil use of the XXI century*, 2015, no. 7, pp. 32–37. In Rus.
4. Ryzhkova S.V., Burshtein L.M., Ershov S.V., Kazanekov V.A., Kontorovich A.E., Kontorovich V.A., Nekhaev A.Yu., Nikitenko B.L., Fomin M.A., Shurygin B.N., Beizel A.L., Borisov E.V., Zolotova O.V., Kalinina L.M., Ponomareva E.V. Bazhenov horizon of Western Siberia: structure, correlation and thickness. *Geology and Geophysics*, 2018, vol. 59, no. 7, pp. 1053–1074. In Rus.
5. Kontorovich A.E., Burshtein L.M., Kazanekov V.A., Kontorovich V.A., Kostyreva E.A., Ponomareva E.V., Ryzhkova S.V., Yan P.A. Bazhenov formation – the main source of unconventional oil resources in Russia. *Georesources, geoenergy, geopolitics*, 2014, no. 2 (10), pp. 2–10. In Rus.
6. Kontorovich A.E. *Za neftyu i gazom nuzhno idti v Arktiku. Na bazhenovskuyu svitu i na melkie mestorozhdeniya...* [For oil and gas you need to go to the Arctic. To the Bazhenov suite and small deposits]. Moscow, Oil and Gas Vertical, 2019. – No. 14 (458), pp. 12–17.
7. Yakimov S.B. Current state and promising directions for reducing heat losses in cable lines of high-power ESP in OAO NK Rosneft. *Equipment and technologies for the oil and gas complex*, 2016, no. 3, pp. 40–46. In Rus.
8. Liang X., He J., Du L. Electrical submersible pump system grounding: current practice and future trend. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2015, vol. 5, pp. 5030–5037.
9. Liang X., Ghoreishi O., Xu W. Downhole tool design for conditional monitoring of electrical submersible motors in oil field facilities. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2017, vol. 53, pp. 3164–3174.
10. Bremner C., Harris G., Kosmala A., Nicholson B., Ollre A., Percy M. Evolving technologies: electrical submersible pumps. *Oil-field Rev.*, 2006, vol. 18, pp. 30–43.
11. Fonsêca D., Salazar A., Gonçalves N., Villarreal V. Electrical modelling of an electrical submersible pump system three-phase power cable used in power line communication. *Przeglad Elektrotechniczny*, 2019, vol. 10, pp. 22–26.
12. Isaev Y.N., Kolchanova V.A., Tarasenko S.S., Tikhomirova O.V. Mathematical models of synchronous generators for different spatial distances of disturbance point. *International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)*. 2015. pp. 1–5. Available at: ieeexplore.ieee.org/document/7414894 (accessed 20.04.2021).
13. IEEE draft recommended practice for specifying electric submersible pump cable-ethylene-propylene rubber insulation. *IEEE P1018/D07*, 17 Nov. 2012, pp. 1–43. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6357350> (accessed 20.04.2021).
14. De Moura Fonsêca D.A., Salazar A.O., Villarreal E.R.L., Echaiz Espinoza G.A., Leite A.C.Q.B. Downhole telemetry systems to monitor electric submersible pumps parameters in oil well. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 12824–12839.
15. Han J., Qiang G. Research on downhole multi-parameters monitoring system. *Proc. of the 7th International Power Electronics and Motion Control Conference*. Harbin, China, 2012. pp. 2765–2768.
16. Spagnolo S., Pilone S., Corti L., Liantonio G., Rizza G., Tita G.E., Kitsoukou D.N. Fully retrievable ESP: a new artificial lift concept. *International Petroleum Technology Conference*. Beijing, China, 2013. 115 p.
17. Liang X., Fleming E. Electrical submersible pump systems: evaluating their power consumption. *IEEE Ind. Appl. Mag.*, 2013, vol. 19, pp. 46–55.
18. GOST R 51777-2001. *Kabeli dlya ustanovok pogruzhnykh elektronasov. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [State Standart R 51777-2001. Cables for installations of submersible electric pumps. General technical conditions]. Moscow, StandardInform Publ., 2001. 18 p.
19. Kalantarov P.L., Zeitlin L.A. *Raschet induktivnostey: spravochnaya kniga* [Calculation of inductances: reference book]. 3rd ed., rev. and add. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1986. 488 p.
20. Metwally I.A., Gastli A. Factors affecting transient overvoltages of electric submersible pumps. *IEEE Potentials*, 2006, vol. 25, no. 5, pp. 13–17.
21. Iossel Yu.Ya., Kochanov E.S., Strunsky M.G. *Raschet elektricheskoy emkosti* [Calculation of capacitances]. St-Petersburg, Energoizdat Publ., 1981. 288 p.
22. Liu Y., Wang L., Gao H., Zhang H., Xu D. Overvoltage mitigation of submersible motors with long cables of different lengths. *17th International Conference on Electrical Machines and Systems*. Hangzhou, China, 2014. pp. 638–644.

Received: 20 May 2021.

Information about the authors

Alexander S. Glazyrin, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University; professor, Yugra State University.

Yusup N. Isaev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University

Sergey N. Kladiev, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Andrey P. Leonov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Ivan V. Rakov, design engineer, Scientific Manufacturing Enterprise «Tomsk Electronic Company».

Stanislav V. Kolesnikov, graduate assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

Sergey V. Langraf, head of the embedded software development sector, NPF Mechatronica-Pro Ltd.

Alexander A. Filipas, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Vladimir A. Kopyrin, Cand. Sc., associate professor, Industrial University of Tyumen.

Rustam N. Khamitov, Dr. Sc., professor, Omsk State Technical University; professor, Tyumen Industrial University.

Vladimir Z. Kovalev, Dr. Sc., professor, Yugra State University.

Alexey V. Lavrinovich, engineer, Tomsk Research and Design Institute of Oil and Gas.

УДК 624.131

ПРОГНОЗ УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНОВ УЧАСТКА БЕРЕГА ХИМКИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Ушаков Александр Сергеевич¹,
ushakovi@inbox.ru

Кулешов Александр Петрович¹,
87kuleshov@mail.ru

¹ Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе,
Россия, 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23.

Актуальность работы обусловлена необходимостью анализа существующих способов расчета коэффициента устойчивости склона. В работе проанализированы три метода расчета, приведен анализ по рациональной области использования каждого метода. Рекомендации по выбору методов расчета разработаны на основе анализа существующих способов расчета, сравнения их применительно к практическим вычислениям.

Цель: прогнозный расчет устойчивости склона участка берега Химкинского водохранилища, сравнительный анализ величин коэффициентов устойчивости, полученных различными методами с использованием современного математического аппарата, реализованного в программных комплексах: «PSK-98M5», «SCAD Office» и «Plaxis», оценка возможности применения используемых численных способов расчета.

Методы: анализ отечественного и зарубежного опыта расчета устойчивости склонов, сбор и оценка имеющейся инженерно-геологической информации, выбор граничных условий, математическое моделирование, сопоставление результатов расчетов, полученных различными методами, оценка уязвимости объектов и прогноз развития деформаций в основании зданий вследствие оползневого процесса.

Результаты. Математические расчеты проведены с помощью различных программных комплексов с использованием нескольких моделей и методов в соответствии с рекомендациями действующей нормативной документации. Из результатов расчетов следует, что более высокий коэффициент устойчивости получен при расположении нагрузки от проектируемого сооружения выше по склону, и наоборот, при расположении ниже по склону той же нагрузки коэффициент устойчивости уменьшается. Программный комплекс «SCAD Office» дает завышенные результаты. Это связано, по всей видимости, с тем, что в данной программе геометрические параметры склона фактически никак не вводятся. Наиболее приближенными к действительности являются результаты, полученные в программе «Plaxis», так как она разбивает введенную модель на огромное количество простых геометрических фигур (треугольников) и значения коэффициента считаются в каждой узловой точке. Это обстоятельство существенно увеличивает точность расчета и намного приближает математическую модель к природным условиям.

Ключевые слова:

Прогноз устойчивости, коэффициент запаса, граничные условия, деформации и напряжения, линия скольжения, расчетное сечение, физико-механические характеристики, метод конечных элементов, программный комплекс, склон, сравнительный анализ.

Введение

При большом разнообразии инженерно-геологических условий территории г. Москвы нередко, при строительстве новых сооружений на неустойчивых грунтах, приходится прибегать к расчетам устойчивости склонов [1, 2 и др.].

Неучёт таких моментов, как оползневые склоны, суффозионный вынос, т. е. процессов, приводящих к сползанию или разрушению склона, может привести к деформациям, разрушениям сооружений, а также нанести вред здоровью человека и привести к летальному исходу.

Поэтому при осуществлении застройки на таких участках необходим точный расчет коэффициента запаса устойчивости склона, который позволит надежно эксплуатировать проектируемые здания и сооружения.

Определение формы и пространственного положения критической поверхности скольжения с минимальным коэффициентом запаса является одним из ключевых вопросов анализа устойчивости склонов [3, 4].

Коэффициент запаса устойчивости определяет соотношение между сдвигающими напряжениями на поверхностях скольжения и сопротивлением грунта сдвигу. Его величину рекомендуется принимать в зависимости от класса сооружений.

В соответствии с указаниями пп. 4.2.11, 4.4.11 СП 11-105-97 часть 2 и п. 6.7.2.9 СП 47.13330.2016 для обеспечения надежности оценок и прогнозов устойчивости склонов рекомендуется осуществлять расчеты различными методами в целях повышения надежности полученных результатов [5, 6].

Для каждого типа склонов рекомендуется задавать не менее одного расчетного створа по направлению ожидаемого оползневого смещения с захватом по высоте всей потенциально неустойчивой зоны [7, 8 и др.].

Способы и методы выполнения расчетов устойчивости склонов рекомендуется принимать согласно имеющимся методическим документам по количественной оценке и прогнозу устойчивости оползневых склонов [9, 10 и др.].

Целью данного исследования является сравнительный анализ методов расчета устойчивости склонов и прогнозный расчет склонов участка берега Химкинского водохранилища.

Для реализации поставленной цели решены задачи, связанные с рассмотрением инженерно-геологических условий северо-западной части г. Москвы и детальным изучением участка строительства:

- уточнение геоморфологических и геологических условий участка;
- выделение геологических тел до уровня МГТ-3 (ИГЭ);
- изучение гидрогеологических условий участка;
- выявление опасных экзогенно-геологических процессов (ЭГП) и определение области их развития;
- расчет коэффициента устойчивости склона в программных комплексах «SCAD Office», «Plaxis» и PSK-98M5 [11].

Предметом исследования является локальная литотехническая система со своей областью влияния и сферой взаимодействия, в пределах которой рассмотрены следующие разделы: характеристика подсистемы «сооружение», методика и объемы выполненных инженерно-геологических изысканий, инженерно-геологические условия территории строительства, рельеф и геоморфологические условия, стратиграфогенетические комплексы, гидрогеологические условия, физико-механические свойства грунтов, экзогенные геологические процессы, происходящие на рассматриваемой территории.

В работе были использованы технические отчеты и заключения, составленные МП «АПУ-Химки», а также фондовые материалы [12–14 и др.].

Инженерно-геологическая характеристика участка

Исследуемый объект расположен на левом берегу Химкинского водохранилища, на участке, предназначенном для строительства многоэтажной жилой застройки с культурно-оздоровительным центром по адресу: Московская область, городской округ Химки, микрорайон Левобережный, ул. Библиотечная.

Проектируемая застройка включает в себя:

- 1) три индивидуальных 17-ти этажных секционных жилых дома и встроено-пристроенный оздоровительный центр к жилому дому. Здания сложной формы в плане, габариты 35×35 м, 1 этаж подземный, техподполье глубиной 2,5–3,0 м от поверхности земли. Предполагаемый тип фундамента – монолитная ж/б плита на естественном основании. Нагрузка на фундамент 30–35 т/м²;
- 2) дом детского творчества с кружковыми группами на 60 мест. Представляет собой индивидуальное трехэтажное здание социального назначения. Габариты 38×27 м, 3 этажа наземных и мансарда, 1 этаж подземный, техподполье глубиной 2,5–3,0 м от поверхности земли. Предполагаемый тип фундамента – монолитная ж/б плита на естественном основании. Нагрузка на фундамент 15–20 т/м²;
- 3) проектируемая многоэтажная автостоянка имеет 6 наземных этажей и 1 подземный, габариты

34×68 м, техподполье глубиной 2,5–3,0 м от поверхности земли. Предполагаемый тип фундамента – монолитная ж/б плита на естественном основании. Нагрузка на фундамент 550 т на опору.

В геоморфологическом отношении участок работ расположен в пределах пологонаклонной флювиогляциальной равнины, прорезанной руслом реки Химки, по долине которой сооружен канал имени Москвы. Абсолютные отметки поверхности площадки работ изменяются от 169,00 до 176,43 м. Поверхность участка представляет собой территорию с регулярными посадками деревьев, предназначенных для укрепления склона. В верхней части участка выполнена вертикальная планировка.

Геологический разрез площадки, по результатам ранее выполненных инженерно-геологических изысканий, изучен до глубины 40 м. По литологическому составу и физико-механическим свойствам грунтов в сфере взаимодействия выделено семь инженерно-геологических элементов (ИГЭ):

- почвенно-растительный слой (pQIV) встречен повсеместно;
- современные техногенные (tQIV) накопления (ИГЭ-1) представлены насыпным грунтом с включениями обломков кирпича, мусора строительно-бытового;
- верхнечетвертичные покровные (prQIII) отложения (ИГЭ-2) представлены суглинком тугопластичным, с включениями остатков растений;
- средне-верхнечетвертичные водно-ледниковые отложения (fQII-III) представлены песком средней крупности, средней плотности, влажным до водонасыщенного, с пятнами ожелезнения, с редкими линзами суглинка мягкопластичного, с редкими прослоями песка мелкого, с включениями гравия и гальки (ИГЭ-3);
- среднечетвертичные ледниковые отложения (gQII) представлены суглинком полутвердым, с линзами песка мелкого, с прослоями суглинка тугопластичного, с включениями гравия, щебня и гальки, обводненным по прослоям песка мелкого (ИГЭ-4);
- среднечетвертичные водно-ледниковые (fQII) отложения распространены не повсеместно, представлены песком средней крупности, средней плотности, влажным до водонасыщенного, с частыми прослоями песка мелкого, местами до пылеватого (ИГЭ-5);
- нижнемеловые отложения (K₁) представлены песком мелким, до пылеватого, плотным, водонасыщенным (ИГЭ-6).

Гидрогеологические условия представлены двумя водоносными горизонтами.

Первый от поверхности водоносный горизонт приурочен к водно-ледниковым пескам средне-верхнечетвертичного возраста (ИГЭ-3). Воды являются безнапорными.

Второй от поверхности водоносный горизонт приурочен к песчаным прослоям в ледниковых отложениях (ИГЭ-4), водно-ледниковым пескам среднечетвертичного возраста (ИГЭ-5) и нижнемеловым пес-

кам (ИГЭ-6). Водоносный горизонт является суб-напорным.

По типу подтопленности территория относится к III-му типу с наиболее вероятной скоростью подъема уровня грунтовых вод 0,1–0,3 м/год в первые 10 лет периода эксплуатации. При величине критического уровня подтопления 3,0 м территория относится к неподтопленной.

Из опасных экзогенных процессов, развитых на территории многоэтажной жилой застройки, следует отметить: сезонное промерзание грунтов, морозное пучение и снижение показателей прочностных и деформационных свойств грунтов вследствие их переувлажнения на локальных участках, аккумулирующих поверхностный сток.

В связи с присутствием значительного градиента в несвязных грунтах, чередованием относительно водоупорных и водоносных горизонтов, активной строительной и хозяйственной деятельности существует большая вероятность развития суффозионного и оползневых процессов.

Учитывая вышесказанное, можно предположить, что склон является потенциально оползневым, и поэтому необходимо провести ряд расчетов по оценке устойчивости склона и определению коэффициента устойчивости склона.

Оценка устойчивости склона

Для отдельных наиболее характерных участков склонов была выполнена серия расчетов устойчивости. Расчеты выполнялись тремя программными комплексами: «PSK-98M5», разработанным НПП «Сингеос»; «SCAD Office» и «Plaxis».

Программные комплексы «PSK-98M5» и «SCAD Office» базируются на одном из основных и популярных механико-математических методов при прогнозе устойчивости склона – методе круглоцилиндрической поверхности скольжения, рекомендуемом нормативными документами [15].

Этот метод весьма распространен в строительной практике и применяется с помощью самых различных приемов. Существует большое количество названий рассматриваемого метода и его разновидностей: методы Бишопа, Феллениуса и «Корпуса Инженеров № 1» и т. д. [16].

В программе «Plaxis» реализуется метод конечных элементов (МКЭ) – наиболее эффективный современный способ численного решения инженерных, физических и математических задач инженерной геологии и механики грунтов, строительной механики.

Все расчеты выполнялись по линиям инженерно-геологических разрезов 2-2а и 3-3а (рис. 1).

Первый профиль характеризует склон, ориентированный к водохранилищу, второй – участок склона в направлении от проектируемого здания в овраг.

Расчеты выполнялись при расчетных ($\alpha=0,95$) значениях физико-механических характеристик грунтов. Прогнозируемые уровни грунтовых вод задавались незначительно (на 0,2–0,8 м) превышающими значения, зафиксированные при изысканиях. В расчетах была принята нагрузка на 1 м² плиты 30–35 т/м² и пригрузка 1,3 кг/см² (0,13 МПа), равномерно распределенная по всей площади подошвы фундамента.

Соответственно, чтобы выполнить сравнительную оценку методов расчета устойчивости склона, в программных комплексах «SCAD Office» и «Plaxis» была принята также пригрузка 1,3 кг/см².

Расчет устойчивости склонов программным комплексом «PSK-98M5»

В основе программы «PSK-98M5» лежит математическая модель в виде системы уравнений предельного равновесия, отражающих соотношение сдвигающих и удерживающих сил в грунтовом массиве с учетом сил взаимодействия по боковым граням расчетных отсеков и соответствующих напряженному состоянию массива непосредственно перед началом смещения оползня.

Данная программа осуществляет автоматический поиск поверхности смещения (реальной или потенциальной) оползня, определяя поверхность с минимальным коэффициентом устойчивости. Алгоритм поиска позволяет анализировать поверхность скольжения любой формы – без ограничений на количество точек перегиба.

Программа производит автоматическое разбиение склона на блоки заданной длины, разбиение регулируется по высоте и по профилю в широких пределах. Коэффициент устойчивости рассчитывается итерационным методом путем решения системы уравнений равновесия горизонтальных и вертикальных сил для блоков плоской модели склона.

Предусмотрена возможность учитывать силы давления напорных подземных вод, силу давления фильтрационного потока, воздействие различных пригрузок и сейсмических (в т. ч. взрывных) ускорений.

Все расчеты показали достаточный запас устойчивости K_u в пределах 2,71 (табл. 1) – 2,97 (табл. 2). Результаты расчетов устойчивости склона по линиям разреза 2-2а и 3-3а представлены, соответственно, в табл. 1, 2.

Таблица 1. Результаты расчетов устойчивости склона по линии разреза 2-2а при прогнозном уровне грунтовых вод (ГТВ)

Table 1. Results of calculations of slope stability along the section line 2-2a at the forecast ground water level

Отметка по оси X Mark on the X-axis	Высот. отм. поверхности скольжения Height of the sliding surface	Мощность оползневой тела Thickness of the landslide body	Вес блока Unit weight	Нормальная нагрузка Normal load	Сдвигающее усилие Shear force
м/м			T _c /T _s		
24,0	175,0	0,0	0,0	0,0	0,0
28,0	172,3	2,42	9,5	8,0	2,3
32,0	170,1	4,48	27,1	23,4	2,8
36,0	168,3	5,89	40,6	37,3	10,9
40,0	166,4	7,25	51,5	46,5	23,3
44,0	165,0	8,16	60,4	59,1	33,4
48,0	164,0	8,40	64,9	66,5	38,4
52,0	163,0	8,62	66,7	64,2	44,8
56,0	162,4	8,19	65,9	70,1	43,5
60,0	161,8	7,79	58,5	57,3	42,4
64,0	161,6	6,60	49,6	54,2	34,8
68,0	161,8	4,00	34,6	38,0	26,2
72,0	162,9	3,00	23,8	28,6	14,4
76,0	165,4	0,00	11,8	14,0	0,0

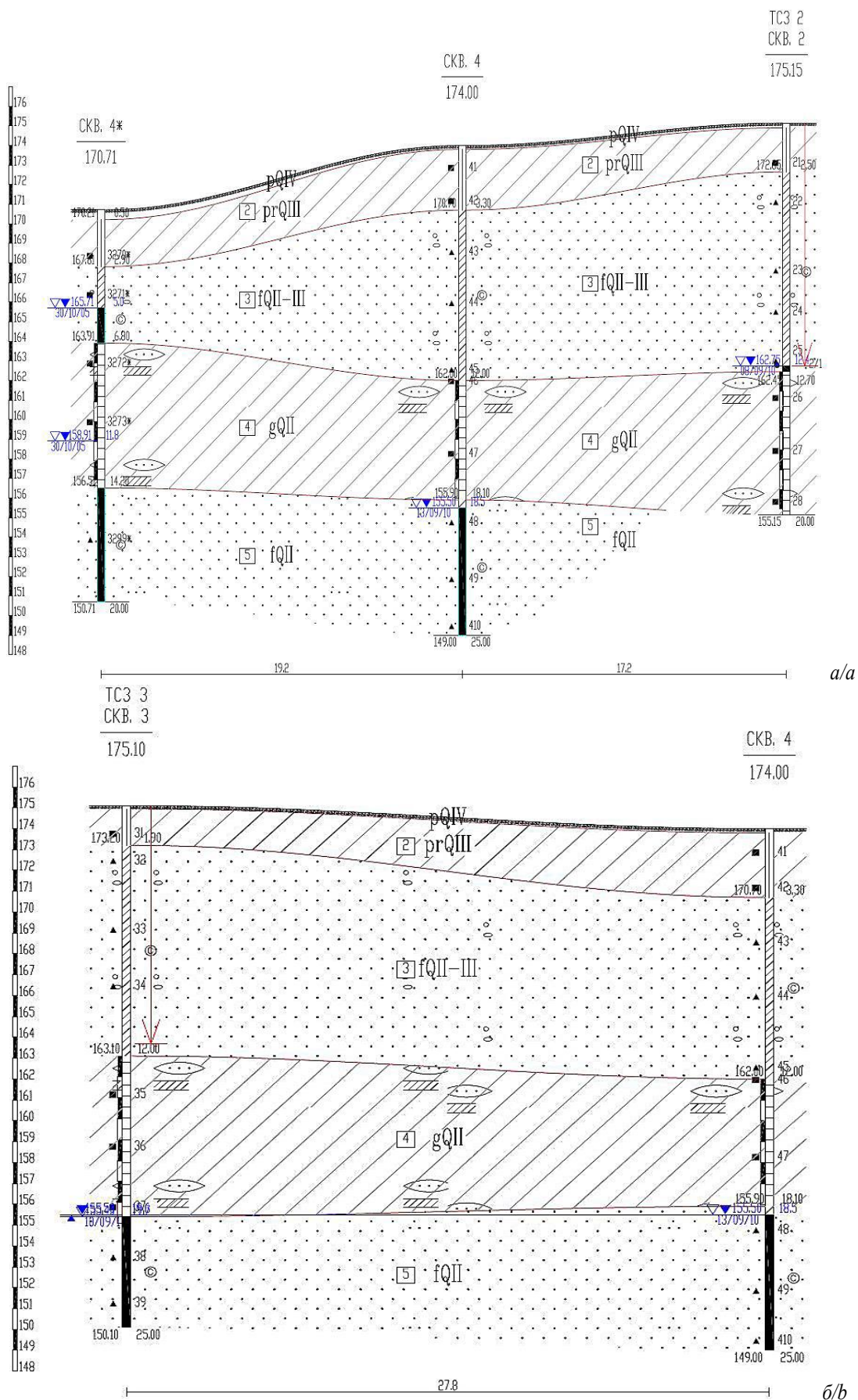


Рис. 1. Инженерно-геологические разрезы по линиям 2-2а (а) и 3-3а (б)
 Fig. 1. Engineering and geological sections along lines 2-2a (a) and 3-3a (b)

Таблица 2. Результаты расчетов устойчивости склона по линии разреза 3-3а при прогнозном уровне грунтовых вод (УГВ)

Table 2. Results of calculations of slope stability along the section line 3-3a at the forecast ground water level (UGV)

Отметка по оси X Mark on the X-axis	Высот. отм. поверхности скольжения Height of the sliding surface	Толщина тела оползневого тела Thickness of the landslide body	Вес блока Unit weight	Нормальная нагрузка Normal load	Сдвигающее усилие Shear force
м/м			T _c /T _s		
34,0	175,7	0,02	0,0	0,0	0,0
36,0	173,9	1,73	5,4	4,1	0,3
38,0	172,8	2,83	8,9	7,8	3,6
40,0	172,0	3,57	12,1	11,8	6,3
42,0	171,3	4,16	14,3	13,9	8,9
44,0	170,8	4,38	15,6	15,5	10,9
46,0	170,3	4,48	16,0	16,2	12,0
48,0	170,0	4,46	15,9	16,4	12,2
50,0	169,8	4,26	15,4	16,0	11,5
52,0	169,7	3,94	14,5	15,1	10,0
54,0	169,5	3,91	14,0	13,2	9,7
56,0	169,4	3,85	14,2	14,7	8,4
58,0	169,4	2,61	12,2	12,7	6,5
60,0	170,5	0,14	5,4	7,9	0,0

Расчет устойчивости склонов программным комплексом «SCAD Office»

Расчет устойчивости склона и поиск наиболее вероятной поверхности скольжения осуществляется при заданных интервалах его начала и конца. В данной программе это четыре числа: r_1, r_2 , определяющие интервал изменения допускаемых значений абсцисс начала оползня, и аналогичные данные для конца оползня – r_3, r_4 .

Необходимо, чтобы выполнялись следующие правила задания значений r : $r_4 > r_1$; $r_2 \geq r_1$; $r_4 \geq r_3$. Учитывая вышесказанное, принято, что $r_1=5,5$ м; $r_2=10,2$ м; $r_3=28,4$ м; $r_4=40$ м для обеих расчетных линий. Уклон

склона задается путем ввода абсолютных значений высот по скважинам.

Расчеты велись по трем из восьми методик, предложенных в программном комплексе «SCAD Office»: по методу Феллениуса, Бишопа и «Корпуса инженеров № 1».

Коэффициенты запаса устойчивости по линиям 2-2а и 3-3а, полученные по трем вышеуказанным методам, представлены в табл. 3.

Таблица 3. Коэффициенты запаса устойчивости
Table 3. Stability margin coefficients

Метод расчета Calculation method	Метод Феллениуса Fellenius Method	Метод Бишопа Bishop Method	Метод «Корпуса инженеров № 1» Method of «Corps of engineers no. 1»
Линия расчета Calculation line			
Линия 2-2а Line 2-2a	4,5	4,7	4,5
Линия 3-3а Line 3-3a	12,2	12,3	12,1

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что коэффициент запаса устойчивости по трем представленным методам практически не отличаются и в среднем для линии 2-2а равен 4,6, а для линии 3-3а – 12,2, т. е. склон остается устойчивым.

Это еще раз доказывает, что все три метода всего лишь разновидности общего для всех метода круглоцилиндрической поверхности скольжения.

Что же касается такого различия коэффициентов устойчивости между расчетными линиями, то это, по всей видимости, связано с различными уклонами склона по эти двум направлениям (по линии 2-2а перепад высот 4,44 м, а по линии 3-3а – 1,10 м).

Так как предполагаемые линии скольжения не имеют отличий между методами расчета, а отличаются только по расчетным сечениям, то целесообразно представить только линии скольжения, характеризующие расчетные сечения 2-2а, 3-3а (рис. 2).

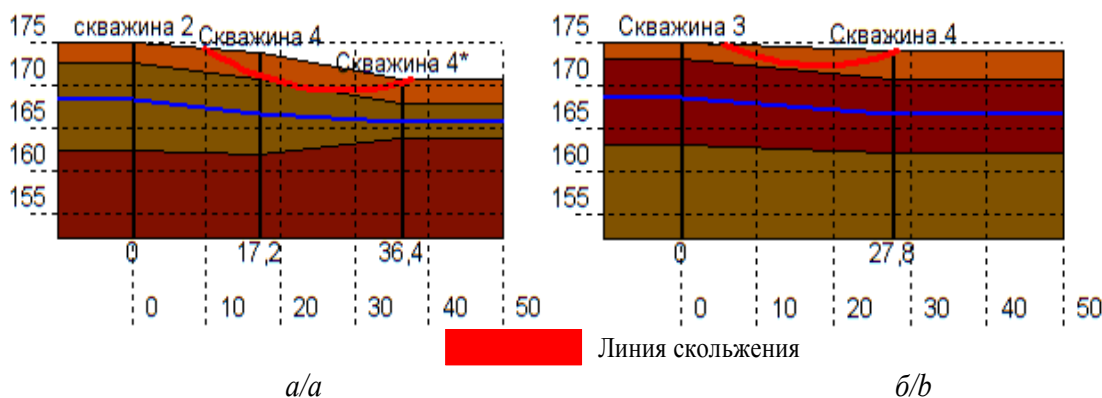


Рис. 2. Предполагаемая линия скольжения по расчетному сечению 2-2а (а) и 3-3а (б)

Fig. 2. Estimated sliding line for the calculated cross section 2-2a (a) and 3-3a (b)

Расчет устойчивости склонов программным комплексом «Plaxis»

Программный комплекс «Plaxis» – это один из наиболее новых, точных продвинутых и популярных пакетов программ для выполнения разного рода ин-

женерных (в том числе и инженерно-геологических) расчетов [17].

Plaxis представляет собой специализированную двумерную и трехмерную компьютерную программу, основанную на МКЭ.

Реальная ситуация может быть смоделирована с помощью модели плоской деформации или осесимметричной модели.

Программа имеет удобный графический интерфейс, который дает пользователю возможность быстро создавать геометрическую модель и сетку конечных элементов, основанную на представленном вертикальном поперечном разрезе [18, 19 и др.].

Механическое поведение каждого элемента выражается с помощью конечного числа степеней свободы или значений функций в узловых точках.

Таким образом, поведение математической модели определяется поведением дискретной модели, которая получена путем сборки всех элементов.

Основными типами конечных элементов являются: собственная размерность, узловые точки, геометрия элемента, степени свободы, узловые силы, определяющие соотношения, свойства сечения [20].

Геометрические параметры склона по двум расчетным сечениям для удобства, наглядности полученных результатов и более точного сравнения задавались такими же, как и в программе «PSK-98M5».

В результате расчета коэффициент устойчивости K_y по линии 2-2а – 1,4, деформации, развивающиеся при этом в грунте, представлены на рис. 3. Важно отметить, что деформации развиваются совсем незначительные только внизу склона, а соответственно никакого негативного влияния на сооружение они оказывать не будут, что подтверждает также коэффициент устойчивости, равный, как упоминалось выше, 1,4.

По расчетному сечению 3-3а коэффициент устойчивости K_y равен 2,6, деформации в грунте (рис. 4) здесь выражены намного сильнее, чем в первом случае. Это, видимо, связано с более резким уклоном склона у его подножия.

Несмотря на более высокие деформации, склон остается устойчивым и негативного влияния на сооружение не оказывает.

Однако известно, что в ходе изысканий техническое задание было изменено и нагрузки увеличились до 30 т/м².

В таком случае было целесообразно провести расчет устойчивости склона при данной нагрузке по оптимальному расположению склона (у его подножия или вверху склона) наиболее эффективным методом – методом конечных элементов.

Физико-механические характеристики свойств грунтов остаются теми же, что и в предыдущих расчетах. Расчет проводился по расчетному сечению 3-3а.

Рассмотрим, два случая расположения сооружения:

- 1) сооружение находится выше по склону. Коэффициент устойчивости склона по линии 3-3а равен 2,4. Деформации в грунте развиваются (рис. 5) значительные, но при этом они не приводят к оползанию склона, о чем говорит достаточно высокий коэффициент устойчивости.
- 2) сооружение находится у подножия склона. Коэффициент устойчивости склона при таком расположении сооружения уменьшился и составил 1,8. Картина распределения деформаций в грунте представлена на рис. 6.

Из результатов расчетов следует, что более высокий коэффициент устойчивости получен при расположении нагрузки от проектируемого сооружения выше по склону, и, наоборот, при расположении ниже по склону той же нагрузки коэффициент устойчивости уменьшается.

Поэтому рекомендуется располагать здание выше по склону, чтобы обеспечить значительный запас устойчивости и избежать возможных негативных последствий при оползании склона, которые могут нанести вред здоровью человека.

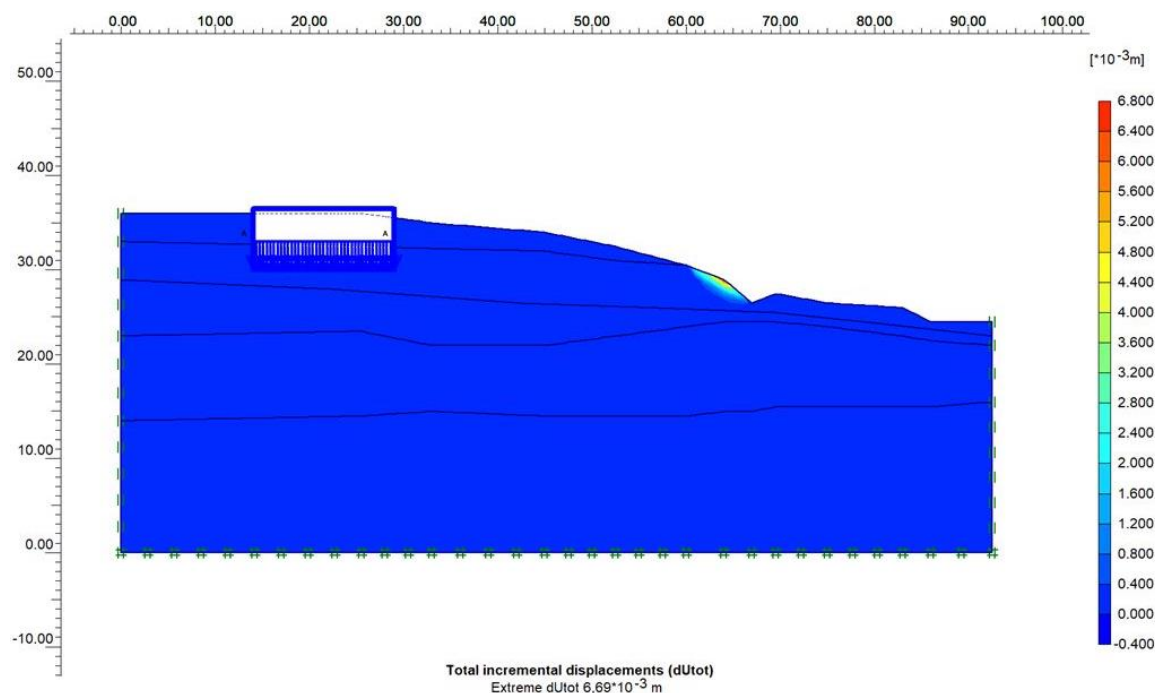


Рис. 3. Развитие деформаций в грунте по расчетному сечению 2-2а

Fig. 3. Development of deformations in the ground according to the calculated cross-section 2-2a

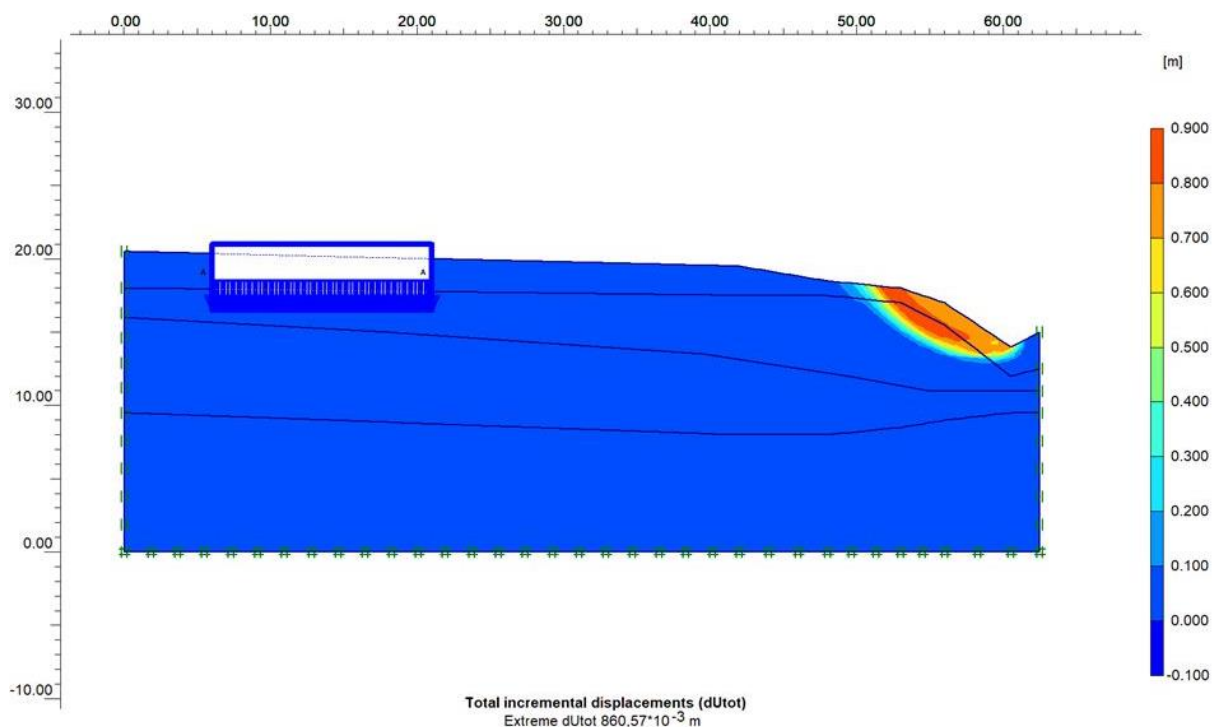


Рис. 4. Развитие деформаций в грунте по расчетному сечению 3-3а

Fig. 4. Development of deformations in the ground according to the calculated cross-section 3-3a

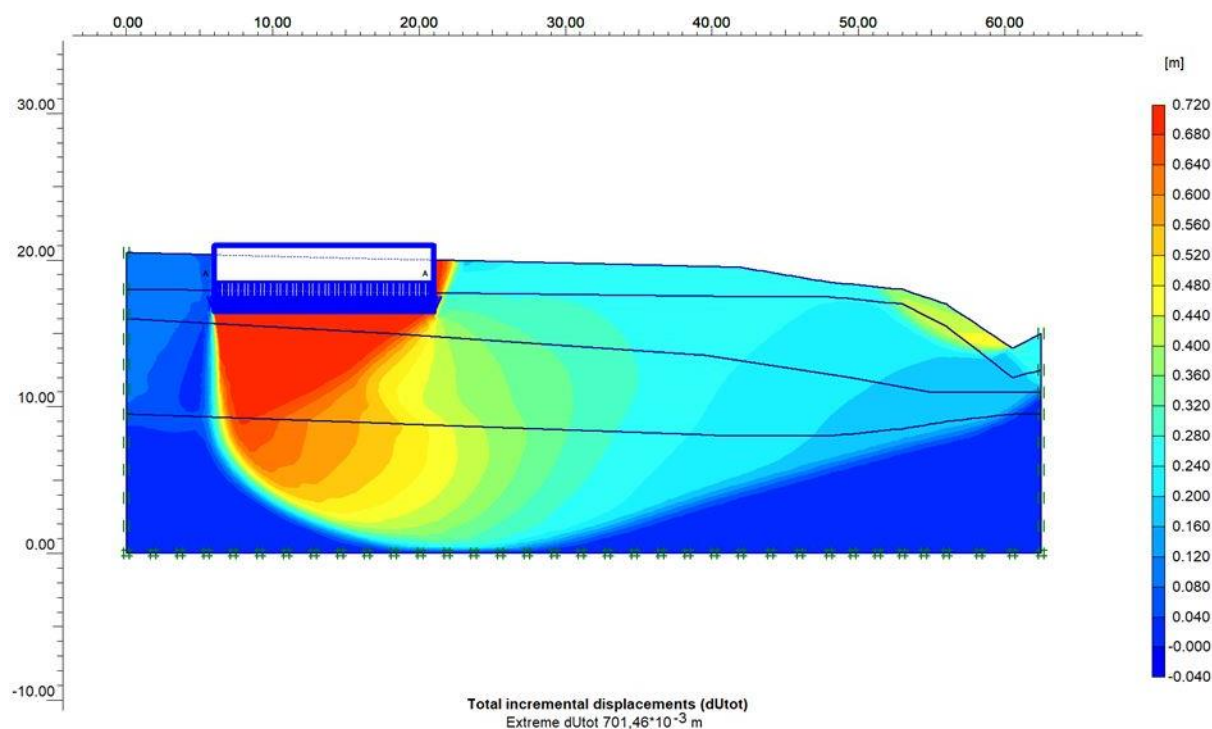


Рис. 5. Развитие деформаций в грунте по расчетному сечению 3-3а при нагрузке 30 t/m^2 (сооружение – выше по склону)

Fig. 5. Development of deformations in the ground along the calculated cross-section 3-3a at a load of 30 t/m^2 (construction is higher up the slope)

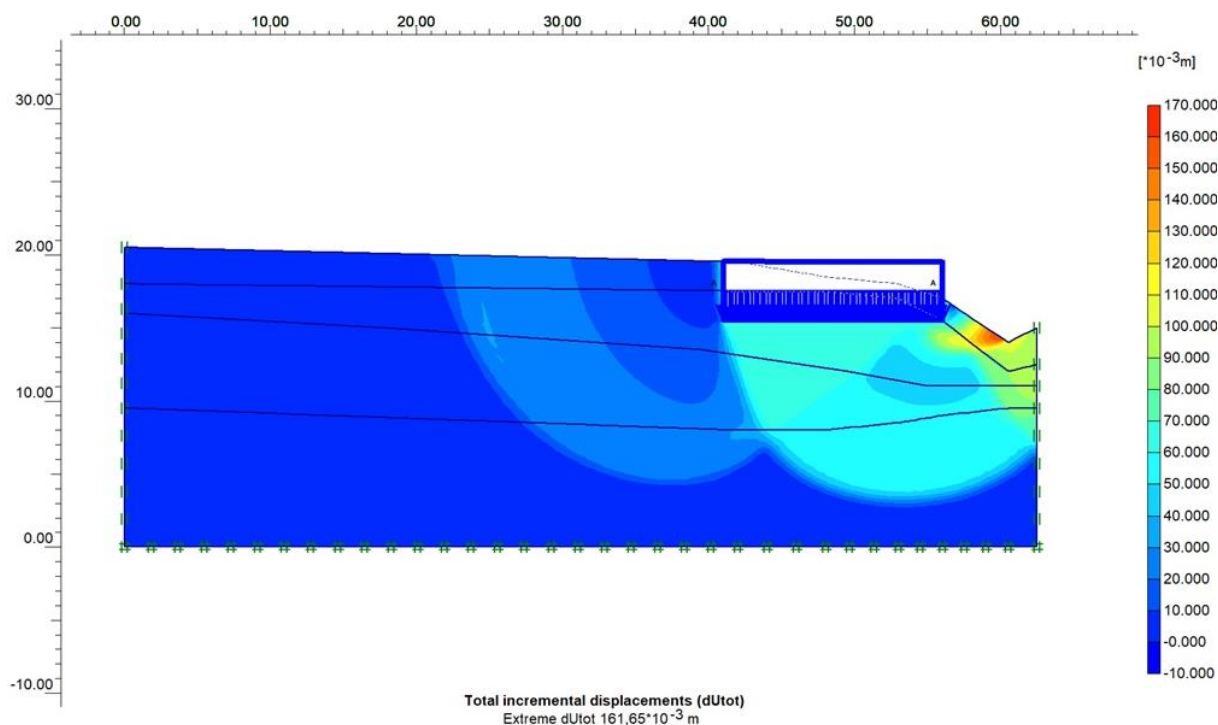


Рис. 6. Развитие деформаций в грунте по расчетному сечению 3-3а при нагрузке 30 т/м^2 (сооружение – у подножия склона)

Fig. 6. Development of deformations in the ground according to the calculated cross-section 3-3a at a load of 30 t/m^2 (construction is at the foot of the slope)

Результаты исследования и их обсуждение

Для удобства анализа все значения, полученные в результате расчетов по трем программам, коэффициента устойчивости сведены в табл. 4.

Таблица 4. Сравнительная таблица коэффициентов устойчивости склона

Table 4. Comparative table of slope stability coefficients

Методы расчета устойчивости Methods for calculating stability Расчетные сечения Design cross sections	Метод конечных элементов (программа «Plaxis») Finite element method («Plaxis» program)	Метод круглоцилиндрической поверхности скольжения Round-cylindrical sliding surface method	
		Программа «SCAD Office» «SCAD Office» program	Программа «PSK-98M5» «PSK-98M5» program
Сечение 2-2а Line 2-2a	1,4	4,6	2,97
Сечение 3-3а Line 3-3a	2,6	12,2	2,71

Коэффициент запаса устойчивости получился больше единицы, а это означает, что склон устойчив и никакого негативного влияния при таких нагрузках ($1,3 \text{ кг/см}^2$) на сооружение оказывать не будет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буфеев Ф.К., Фоменко И.К. Влияние методов расчёта и моделей распределения свойств грунтов на результаты количественной оценки устойчивости склонов // Известия высших

учебных заведений. Геология и разведка. – 2016. – № 2. – С. 33–38.

Как видно из результатов, программный комплекс «SCAD Office» дает завышенные значения. Это связано, по всей видимости, с тем, что в данной программе геометрические параметры склона фактически никак не вводятся. Уклон рельефа создается только за счет ввода абсолютных отметок по скважинам. Поэтому коэффициенты устойчивости склона, полученные этой программой, являются не совсем достоверными.

Из оставшихся двух методов и двух программ наиболее приближенными к действительности являются результаты полученные в программе «Plaxis», так как она разбивает введенную модель на огромное количество простых геометрических фигур (треугольников) и значения коэффициента считаются в каждой узловой точке. Это обстоятельство существенно увеличивает точность расчета и намного приближает математическую модель к природным условиям.

Так как коэффициент устойчивости, полученный при расположении сооружения у подножия склона, меньше, чем аналогичный выше по склону, то рекомендуется располагать здание выше по склону, чтобы обеспечить значительный запас устойчивости и избежать возможных негативных последствий при оползании склона, которые могут нанести вред здоровью человека.

2. Пургина Д.В., Строкова Л.А., Кузеванов К.И. Моделирование гидрогеологических условий для обоснования противооползневых мероприятий на участке набережной реки Камы в горо-

- де Пермь // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 1. – С. 116–127.
3. Сравнительный анализ методов расчета устойчивости склона в объемной постановке задачи / О.Н. Сироткина, В.В. Тарабукин, И.К. Фоменко, Д.Д. Шубина // Международный научно-исследовательский журнал. – 2020. – Т. 99. – № 9. – С. 55–62.
 4. Кулешов А.П., Пендин В.В. Влияние методики определения свойств грунтов в численных расчетах деформаций // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 12. – С. 63–74.
 5. Оценка оползневой риска (на примере северо-западной части провинции Лаокай, Вьетнам) / Ч.К. Нгуен, И.К. Фоменко, О.В. Зеркаль, В.В. Пендин // Инженерная геология. – 2018. – Т. 13. – № 3. – С. 40–53.
 6. Пендин В.В. Комплексный количественный анализ информации в инженерной геологии. – М.: КДУ, 2009. – 350 с.
 7. Строчкова Л.А., Ермолаева А.В. Районирование территории по степени опасности оседания земной поверхности при проектировании магистрального газопровода в южной Якутии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 10. – С. 59–68.
 8. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. – М.: Стандартинформ, 2016. – 69 с.
 9. Строчкова Л.А., Епифанова Е.А., Коржнева Т.Г. Численный анализ поведения основания опоры моста на старой железнодорожной линии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 5. – С. 125–139.
 10. Улицкий В.М., Шашкин А.Г. Геотехническое сопровождение реконструкции городов. – М.: Изд-во АСВ, 1999. – 327 с.
 11. Фоменко И.К., Зеркаль О.В. Оценка устойчивости склонов при инженерных изысканиях: нормативные требования и проблемы их выполнения // Инженерные изыскания. – 2016. – № 10–11. – С. 64–70.
 12. Brakorenko N.N. Impact of oil on groundwater chemical composition // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – № 27. – 6 p.
 13. Slope stability and stabilization methods / L.W. Abramson, T.S. Lee, S. Sharma, G.M. Boyce. – New York, USA: John Wiley & sons, 2002. – 736 p.
 14. Plaxis. Material Models Manual. – 216 p. URL: <https://www.plaxis.ru> (дата обращения 11.09.2020).
 15. Phi H.T., Strokova L.A. Prediction maps of land subsidence caused by groundwater exploitation in Hanoi, Vietnam // Resource Efficient Technologies. – 2015. – V. 1. – Iss. 2. – P. 80–89.
 16. Terrestrial laser scanning technology for deformation monitoring and surface modeling of arch structures / H. Yang, M. Omidalizandi, X. Xu, I.I. Neumann // Composite Structures. – 2016. – V. 149. – P. 93–105.
 17. Gitirana G. (Jr.), Santos M.A., Fredlund M. Three-dimensional analysis of the Lodalen landslide // Proceedings of the GeoCongress. – New Orleans, 2008. – 5 p.
 18. Yardim Y., Mustafaraj E. Effects of soil settlement and deformed geometry on a historical structure // Natural hazards and Earth System Sciences. – 2015. – V. 15. – P. 1051–1059.
 19. Terrestrial laser scanner for monitoring the deformations and the damages of buildings / G. Vacca, F. Mistretta, F. Stochino, A. Dessi // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences. – 2016. – V. 41. – Iss. B5. – P. 453–460.
 20. Deformations of soil in deep excavations: Comparing calculation results with in-situ measurements / V.M. Ulitsky, A.G. Shashkin, K.G. Shashkin, M.B. Lisyuk, V.A. Vasenin // Proc. of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: the Academia and Practice of Geotechnical Engineering. – St. Petersburg, 2009. – V. 3. – P. 2107–2110.

Поступила 06.10.2020 г.

Информация об авторах

Ушаков А.С., аспирант кафедры инженерной геологии Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе.

Кулешов А.П., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры инженерной геологии Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе.

UDC 624.131

FORECAST OF SLOPE STABILITY OF THE BANK SECTION OF THE KHMINKI RESERVOIR

Alexander C. Ushakov¹,
ushakovi@inbox.ru

Alexander P. Kuleshov¹,
87kuleshov@mail.ru

¹ Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University,
23, Miklukho-Maklay street, Moscow, 117997, Russia.

The relevance of the work is caused by the need to analyze the existing methods for calculating the slope stability coefficient. The paper analyzes three calculation methods and provides an analysis of the rational use of each method. Recommendations on the choice of calculation methods are developed based on the analysis of existing calculation methods and their comparison in relation to practical calculations.

The main aim: predictive calculation of the slope stability of the bank section of the Khimki reservoir, comparative analysis of the values of the stability coefficients obtained by various methods using modern mathematical tools implemented in software complexes: «PSK-98M5», «SCAD Office» and «Plaxis», evaluation of the possibility of using one of the applied numerical methods of calculation.

Methods: analysis of domestic and foreign experience in calculating slope stability, collection and evaluation of available engineering and geological information, selection of boundary conditions, application of analytical and numerical solutions, comparison of calculation results obtained by various methods, assessment of the vulnerability of objects and forecast of deformations in the base of buildings under the influence of landslide development.

Results. Mathematical calculations were performed by various software systems using several models and methods in accordance with the recommendations of the current regulatory documentation. From the results of calculations, it follows that a higher stability coefficient is obtained when the load from the designed structure is located higher up the slope, and vice versa, when the same load is located lower down the slope, the stability coefficient decreases. The «SCAD Office» software package gives inflated results. This is probably due to the fact that in this program, the geometric parameters of the slope are not actually entered in any way. The results obtained in the Plaxis program are the closest to reality, since it splits the entered model into a huge number of simple geometric shapes (triangles) and the coefficient values are calculated at each node point. This circumstance significantly increases the accuracy of the calculation and brings the mathematical model much closer to natural conditions.

Key words:

Stability forecast, margin coefficient, boundary conditions, deformations and stresses, sliding line, calculated cross-section, physical and mechanical characteristics, finite element method, software package, slope, comparative analysis.

REFERENCES

1. Bufeev F.K., Fomenko I.K. Influence of calculation methods and models of soil properties distribution on the results of quantitative assessment of slope stability. *News of higher educational institutions. Geology and exploration*, 2016, no. 2, pp. 33–38. In Rus.
2. Purgina D.V., Strokova L.A., Kuzevanov K.I. Modeling hydrogeological conditions for antilandslide measures justification on the plot of the Kama river embankment in Perm. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 1, pp. 116–127. In Rus.
3. Sirotkina O.N., Tarabukin V.V., Fomenko I.K., Shubina D.D. comparative analysis of methods for calculating slope stability in a three-dimensional problem statement. *International scientific research journal*, 2020, vol. 99, no. 9, pp. 55–62. In Rus.
4. Kuleshov A.P., Pendin V.V. Influence of methods for determining soil properties in numerical calculations of deformations. *Proceedings of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 12, pp. 63–74.
5. Nguyen Ch.K., Fomenko I.K., Zerkal O.V., Pendin V.V. Landslide risk assessment (on the example of the North-Western part of the province of Lao Cai, Vietnam). *Engineering Geology, PNIIS publishing house*, 2018, vol. 13, no. 3, pp. 40–53. In Rus.
6. Pendin V.V. *Kompleksny kolichestvenny analiz informatsii v inzhenernoy geologii* [Complex quantitative analysis of information in engineering Geology]. Moscow, KDU Publ., 2009. 350 p.
7. Strokova L.A., Ermolaeva A.V. Zoning according to the hazard level of earth surface subsidence when designing the main gas pipeline in south Yakutia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 10, pp. 59–68.
8. SP 22.13330.2016 *Osnovaniya zdaniy i sooruzheniy* [Code of rules 22.13330.2016. Soil bases of buildings and structures]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 69 p.
9. Strokova L.A., Epifanova E.A., Korzhneva T.G. Numerical analysis of bridge foundation behaviour on the old railway line. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 5, pp. 125–139. In Rus.
10. Ulitsky B.M., Shashkin A.G. *Geotekhnicheskoe soprovozhdenie rekonstruktsii gorodov* [Geotechnical support urban renewal]. Moscow, DIA Publ., 1999. 327 p.
11. Fomenko I.K., Zerkal O.V. Assessment of slope stability in engineering surveys: regulatory requirements and problems of their implementation. *Engineering survey*, 2016, no. 10–11, pp. 64–70. In Rus.
12. Brakorenko N.N. Impact of oil on groundwater chemical composition. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, no. 27, 6 p.
13. Abramson L.W., Lee T.S., Sharma S., Boyce G.M. *Slope stability and stabilization methods*. New York, USA, John Wiley & Sons, 2002. 736 p.
14. *Plaxis. Material Models Manual*. 216 p. Available at: <https://www.plaxis.ru> (accessed 11 September 2020).
15. Phi H.T., Strokova L.A. Prediction maps of land subsidence caused by groundwater exploitation in Hanoi, Vietnam. *Resource Efficient Technologies*, 2015, vol. 1, Iss. 2, pp. 80–89.
16. Yang H., Omidiazarandi M., Xu X., Neumann I.I. Terrestrial laser scanning technology for deformation monitoring and surface modeling of arch structures. *Composite Structures*, 2016, vol. 149, pp. 93–105.
17. Gitirana G. (Jr.), Santos M.A., Fredlund M. Three-dimensional analysis of the Lodalen landslide. *Proc. of the GeoCongress '2008*. New Orleans, 9–12 March 2008. 5 p.

18. Yardim Y., Mustafaraj E. Effects of soil settlement and deformed geometry on a historical structure. *Natural hazard and Earth system Sciences*, 2015, vol. 15, pp. 1051–1059.
19. Vacca G., Mistretta F., Stochino, F., Dessi A. Terrestrial laser scanner for monitoring the deformations and the damages of buildings. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 2016, vol. 41, Iss. B5, pp. 453–460.
20. Ulitsky V.M., Shashkin A.G., Shashkin K.G., Lisyuk M.B., Vasenin V.A. Deformations of soil in deep excavations: Comparing calculation results with in-situ measurements. *Proc. of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: The Academia and Practice of Geotechnical Engineering*. St. Petersburg, 2009. Vol. 3, pp. 2107–2110.

Received: 6 October 2020.

Information about the authors

Alexander C. Ushakov, postgraduate, Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University.

Alexander P. Kuleshov, Cand. Sc., associate professor, Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University.

Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Корректурa и перевод на английский язык *С.В. Жаркова*
Дизайн обложки *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива
Валерия Касаткина

Руководство для авторов и образец оформления статьи: izvestiya.tpu.ru

Подписано к печати 28.06.2021. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 24,31. Уч.-изд. л. 21,99.
Заказ 128-21. Тираж 500 экз.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ