

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 330, № 8, 2019

ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ

Редакционная коллегия

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

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

Подписной индекс в объединённом каталоге
«Пресса России» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2019

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Журнал «Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов» – рецензируемый научный журнал, издающийся с 1903 года.

Учредителем является Томский политехнический университет.

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций – Свидетельство ПИ № ФС 77-65008 от 04.03.2016 г.

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

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

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

Журнал представляет интерес для геологов, химиков, технологов, физиков, экологов, энергетиков, специалистов по хранению и транспортировке энергоресурсов, ИТ-специалистов, а также ученых других смежных областей. Тематические направления журнала «Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов»:

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

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

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

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

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

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

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

Volume 330, № 8, 2019

BULLETIN OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY. GEO ASSETS ENGINEERING

Editorial Board

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

AIMS AND SCOPES

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

The journal was founded in 1903.

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

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

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

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

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

- Geo Assets Exploration and Refining;
- Geo Assets Mining;
- Geo Assets Transportation;
- Geo Assets Deep processing;
- Energy-efficient production and conversion of energy based on Geo Assets;
- Safe disposal of Geo Assets and questions Geoecology;
- Geo-engineering of Eurasia and marginal sea.

Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering publishes only original research articles. All articles are peer reviewed by international experts. Both general and technical aspects of the submitted paper are reviewed before publication. Authors are advised to suggest 2 potential reviewers who are familiar with the research focus of the article. Final decision on any paper is made by the Editor in Chief.

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

The publication of manuscripts is free of charge.

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

- Разработка нейронных систем мониторинга и управления эмиссией вредных веществ для газотурбинных газоперекачивающих агрегатов и электростанций**
 Августинович В.Г., Кузнецова Т.А., Нугуманов А.Д. 7
Development of neural systems for monitoring and controlling emission of gas-transmission and power gas turbine units
 Avgustinovich V.G., Kuznetsova T.A., Nugumanov A.D.
- Изменение концентраций тяжелых металлов почв юга Среднеамурской низменности при длительном сельскохозяйственном использовании**
 Зубарев В.А., Мищук С.Н. 18
Changes in concentration of heavy metals in soils of Middle Amur Lowland under conditions of long period of agricultural use
 Zubarev V.A., Mishchuk S.N.
- Исследование температурного поля в слоистом пласте**
 Исламов Д.Ф., Садретдинов А.А. 27
Analysis of temperature field in layered reservoir
 Islamov D.F., Sadretdinov A.A.
- Исследование диспергирующего эффекта полимерных поверхностно-активных веществ в акриловых дисперсиях, применяемых для окраски устьевой арматуры нефтяных скважин**
 Дюрягина А.Н., Луценко А.А., Тюканько В.Ю. 37
Study of the disperse effect of polymeric surface-active substances in acrylic dispersions used for painting oil well armature
 Dyuryagina A.N., Lutsenko A.A., Tyukanko V.Yu.
- Исследование автоматизированной системы натяжения ремней привода станка-качалки**
 Уразаков К.Р., Тимашев Э.О., Шайжанов Н.С., Тугунов П.М. 45
Research of an automated system of tension of drive belts in a pumpjack
 Urazakov K.R., Timashev E.O., Shayzhanov N.S., Tugunov P.M.
- Поликритериальный подход к анализу мероприятий по повышению устойчивости узлов электродвигательной нагрузки нефтедобывающих предприятий**
 Лосев Ф.А., Сушков В.В. 55
Polycriteria approach to the analysis of actions for increasing electromotive loading stability of the oil-extracting enterprises
 Losev F.A., Sushkov V.V.
- Метод интегрированной оценки усталостных напряжений в структуре восстановленных лопаток ТЭЦ и ГЭС**
 Савинкин В.В., Кузнецова В.Н., Ратушная Т.Ю., Киселев Л.А. 65
Method of integrated assessment of fatigue stresses in the structure of the restored blades of CHP and HPS
 Savinkin V.V., Kuznetsova V.N., Ratushnaya T.Yu., Kiselev L.A.
- Новый подход к моделированию процесса формирования теплового режима термосифонов больших размеров для использования геотермальной теплоты**
 Максимов В.И., Нурпейис А.Е. 78
New approach to modelling the formation of large-sized thermosiphons thermal regime for using geothermal heat
 Maksimov V.I., Nurpeiis A.E.
- Влияние бета-облучения на параметры активности микропорошков алюминия**
 Ильин А.П., Мостовщиков А.В., Роот Л. О., Змановский С.В., Исмаилов Д.В., Рузиева Г.У. 87
Effect of beta-radiation exposure on the parameters of aluminum micropowders activity
 Ilyin A.P., Mostovshchikov A.V., Root L.O., Zmanovskiy S.V., Ismailov D.V., Ruzieva G.U.
- К вопросу безопасной эксплуатации подземного туристического комплекса «Царство вечной мерзлоты»**
 Петров А.Н., Киселев В.В., Романова Е.К., Сивцева А.И. 94
On the issue of safe operation of the underground travel complex «The kingdom of eternal frost»
 Petrov A.N., Kiselev V.V., Romanova E.K., Sivtseva A.I.
- Новый взгляд на гидрогеологические условия города федерального значения Севастополь**
 Новиков Д.А., Черных А.В., Дульцев Ф.Ф. 105
New look at hydrogeological conditions of the federal city of Sevastopol
 Novikov D.A., Chernykh A.V., Dultsev F.F.
- Эксилампы как перспективный источник УФ излучения для фотохимического обезвреживания мышьяксодержащих вод**
 Цыбикова Б.А., Батоева А.А. 123
Excilamps as a perspective source of UV radiation for photochemical detoxification of arsenic containing waters
 Tsybikova B.A., Batoeva A.A.
- Организация системы геоинформационного мониторинга состояния земельных ресурсов прибрежной зоны Новосибирского водохранилища**
 Карпик А.П., Аврунев Е.И., Добротворская Н.И., Дубровский А.В., Малыгина О.И., Попов В.К. 133
Organization of the system of geoinformation monitoring the land resources in Novosibirsk basin shore zone
 Karpik A.P., Avrunev E.I., Dobrotvorskaya N.I., Dubrovsky A.V., Malygina O.I., Popov V.K.
- Молекулярно-массовое распределение гуминовых кислот мерзлотных бугристых торфяников Европейского северо-востока России**
 Василевич Р.С., Вежов К.С., Лодыгин Е.Д. 146
Molecular-mass distribution of humic acids of permafrost peat mounds from the European north-east of Russia
 Vasilevich R.S., Vezhov K.S., Lodygin E.D.

- | | |
|--|---|
| <p>Стеганографическое встраивание дополнительных данных в снимки дистанционного зондирования земли с помощью метода QIM с переменным шагом квантования в частотной области
 Евсютин О.О., Кокурина А.С., Мещеряков Р.В.</p> <p>Магнетит с модифицированной поверхностью для водоочистки
 Чан Туан Хоанг, Юрмазова Т.А., Вайтулевич Е.А.</p> <p>Параметры активации золы уноса в качестве вяжущего при изготовлении бетонов
 Голик В.И., Дмитрак Ю.В., Качурин Н.М., Стась Г.В.</p> <p>Классифицирование по консистенции органоминеральных грунтов Западной Сибири
 Крамаренко В.В., Молоков В.Ю., Шинави А.Э.</p> <p>К вопросу обработки результатов геотехнического мониторинга за осадками сооружений
 Кулешов А.П., Пендин В.В.</p> <p>Влияние попутного нефтяного газа на степень извлечения углеводородов C_3 при совместной подготовке с газоконденсатным сырьем
 Гатиятов А.Р., Шишмина Л.В., Зятиков П.Н.</p> | <p>155 Steganographic embedding of additional data into the images of Earth remote sensing by QIM method with a variable quantization step in the frequency domain
 Evsyutin O.O., Kokurina A.S., Meshcheryakov R.V.</p> <p>163 Magnetite with modified surface for water treatment
 Hoang Tran Tuan, Yurmazova T.A., Vaitulevich E.A.</p> <p>173 Parameters of ash drain activation as a binder when making a concrete
 Golik V.I., Dmitrak Yu.V., Kachurin N.M., Stas G.V.</p> <p>180 Classification on consistency of organomineral soils of Western Siberia
 Kramarenko V.V., Molokov V.Yu., Shinawi A.E.</p> <p>190 On the issue of processing the results of monitoring of structure settlement
 Kuleshov A.P., Pendin V.V.</p> <p>205 Effect of associated petroleum gas on the rate of hydrocarbon C_3 recovery in co-treatment with gas condensate feedstock
 Gatiyatov A.R., Shishmina L.V., Zyatikov P.N.</p> |
|--|---|

УДК 621.4:681.5

РАЗРАБОТКА НЕЙРОННЫХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ ЭМИССИЕЙ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ ДЛЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ И ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Августинович Валерий Георгиевич¹,
august@avid.ru

Кузнецова Татьяна Александровна¹,
tatianaakuznetsova@gmail.com

Нугуманов Алексей Дамирович¹,
nugumanov@avid.ru

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Россия, 614990, Пермь – ГСП, Комсомольский пр., 29.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью решения задачи непрерывного мониторинга и автоматического управления эмиссией окислов азота и углерода во время эксплуатации газотурбинных установок в составе газоперекачивающих агрегатов и электростанций следующего поколения, характеризующихся низким уровнем генерации вредных веществ.

Цель: выполнение заданных норм на эмиссию при обеспечении устойчивости рабочего процесса горения в условиях воздействия внешних и внутренних факторов на основе создания технологий искусственного интеллекта робастных алгоритмов управления малоэмиссионными камерами сгорания газотурбинных газоперекачивающих агрегатов компрессорных станций магистральных газопроводов и электростанций, включающих прогнозирование их воздействия на окружающую среду.

Объект: малоэмиссионные камеры сгорания газотурбинных агрегатов.

Методы: методика синтеза многослойных искусственных нейронных сетей на основе теоремы Арнольда–Колмогорова–Хейт-Нильсена; алгоритм обратного распространения ошибки; методы натурного эксперимента для малоэмиссионных камер сгорания; методы симуляции и модельного эксперимента в среде MATLAB.

Результаты. Рассмотрены основные особенности малоэмиссионных камер сгорания газотурбинных установок. В качестве основной проблемы управления отмечается склонность малоэмиссионных камер сгорания к неустойчивой работе с одной стороны из-за близости режима работы к границе «бедного» срыва и с другой стороны – из-за режима виброгорения. Сформулирована задача управления эмиссией как минимизация доли расхода топлива через диффузионный контур с учетом ограничений по устойчивости рабочего процесса горения при изменении внешних и внутренних факторов в широком диапазоне. Обосновано решение задачи управления на основе интеллектуальных технологий, имеющих в своем составе встроенную математическую модель генерации вредных веществ. Разработан алгоритм построения математических моделей малоэмиссионных камер сгорания на основе искусственных нейронных сетей при учете значимости факторов влияния. В качестве примера решения задачи представлены: разработанная нейронная сеть и процесс ее обучения на базе экспериментальных данных реальной малоэмиссионной камеры сгорания. Получен массив данных натурного эксперимента с целью исследования характеристик эмиссии окислов азота и углерода NO_x и CO при работе малоэмиссионных камер сгорания промышленной энергоустановки повышенной мощности (16 МВт). На основе полученных данных спроектирована и обучена нейронная сеть, моделирующая эмиссию NO_x и CO на выходе малоэмиссионных камер сгорания. Результаты симуляции в среде MATLAB показали высокую точность разработанной модели. Проведено исследование значимости факторов для точности модели. Выявлено, что наибольшую значимость имеют параметры температуры и давления. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании отказоустойчивых систем автоматического управления газотурбинными агрегатами для повышения их надежности и экологической привлекательности.

Ключевые слова:

Газотурбинная установка, малоэмиссионное горение, система управления и мониторинга, искусственный интеллект, нейронная сеть.

Введение

Газоперекачивающее оборудование характеризуется большой технической сложностью и существенной экономической значимостью для системы транспортировки газа. В частности, в ОАО «Газпром» эксплуатируется более 4100 газоперекачивающих агрегатов (ГПА) суммарной мощностью 47,1 млн кВт. Приводные двигатели ГПА потребляют около 8 % объема транспортируемого газа, при этом в год в атмосферу выбрасывается 140 тыс. т оксидов азота, 270 тыс. т оксида углерода, 84,8 млн т диоксида углерода [1].

В соответствии с «Комплексной программой реконструкции и технического перевооружения объектов транспорта газа, дожимных и компрессорных станций» и «Комплексной программой

синхронизации ввода мощностей в добыче и транспорте газа», общая потребность ОАО «Газпром» в газокompрессорном оборудовании до 2020 г. оценивается в 100–125 ГПА суммарной мощностью 2000 МВт в год. Эти цифры определяют важность и масштаб проблемы совершенствования и развития одного из важнейших технологических секторов основного производства ОАО «Газпром».

Для организации комплексного и системного решения обозначенных проблем разработана «Научно-техническая политика ОАО «Газпром» в области газоперекачивающей техники», определяющая направления, приоритеты, цели, задачи и формы деятельности по обеспечению потребностей в современном и высокоэффективном газоперекачивающем оборудовании до 2020 г. [2]. В докумен-

те отмечается, что в соответствии с общемировой тенденцией приоритетной базой для развития технологий газоперекачки остается газотурбинный двигатель (ГТД) простого цикла, который не исчерпал возможностей для совершенствования.

Надежность работы ГТД во многом определяется эффективностью системы автоматического управления (САУ ГПА), наделенной функциями диагностики узлов двигателя. Развитие систем автоматического управления газоперекачивающей техники и диагностики идет по пути применения современных программно-технических средств с высоким быстродействием, надежных контрольно-измерительных приборов и исполнительных механизмов [1].

ГТД генерируют при работе вредные вещества, негативно влияющие на окружающую среду. При использовании природного газа в качестве вредных продуктов горения в камере сгорания, прежде всего, рассматриваются оксиды азота NO_x и углерода CO . В связи с тем, что государственная политика в области экологии направлена на ужесточение норм на выбросы вредных веществ (ВВ) в атмосферу, одним из важнейших аспектов улучшения характеристик ГТД является снижение эмиссии ВВ.

Основным способом решения этой задачи является создание и применение в составе ГТД серийных малоэмиссионных камер сгорания (МЭКС). В соответствии с СТО Газпром 2–3.5–138 содержание оксидов азота NO_x в отработавших газах (в сухих продуктах сгорания при нормальных условиях 0°C , 0,1013 МПа и условной концентрации кислорода 15 %) не должно превышать для МЭКС 50 мг/м^3 [2, 3]. Дальнейшее развитие МЭКС позволит довести уровень эмиссии NO_x до 20 мг/м^3 и ограничить эмиссию CO до 20 мг/м^3 [4].

Таким образом, при разработке подсистем САУ ГПА, регулирующих работу МЭКС в составе современных инновационных газотурбинных газоперекачивающих агрегатов компрессорных станций магистральных газопроводов, актуальной задачей является выполнение исследований, направленных на создание робастных алгоритмов управления МЭКС, включающих прогнозирование их воздействия на окружающую среду. Также актуальной является задача непрерывного мониторинга генерации вредных веществ во время эксплуатации газотурбинных установок.

Основные методы и содержание исследования

Безусловно, самым важным и сложным для управления объектом в двигателе следующего поколения является малоэмиссионная камера сгорания, обеспечивающая заданные нормы на эмиссию вредных веществ.

Несмотря на то, что технологии обеспечения малоэмиссионного горения в общем виде известны [5, 6], задача дальнейшего снижения уровня эмиссии вредных веществ является очень сложной. Главная трудность решения этой задачи ложится на интеллектуальную САУ малоэмиссионной ка-

мерой сгорания (МЭКС). Это обусловлено узким диапазоном устойчивой работы МЭКС, существенно зависящим от внешних параметров, возможностью возникновения термоакустических автоколебаний в ней, а также наличия нелинейностей (например, отключающихся коллекторов).

Традиционные методы управления МЭКС, учитывающие все эти особенности, в данном случае не дают адекватного решения проблемы. Представляется, что успешное решение задачи управления МЭКС необходимо искать в применении технологии искусственного интеллекта (ИИ) и, в частности, нейронных сетей.

Задача управления МЭКС разделяется на следующий ряд подзадач: активное управление процессом горения и устойчивостью горения, управление неоднородностью температурного поля на выходе из камеры сгорания, управление эмиссией ВВ. При этом в настоящее время проблема управления эмиссией, неразрывно связанная с обеспечением устойчивости процесса горения, является одной из наиболее приоритетных.

Большую часть от общей эмиссии ВВ составляют оксиды углерода CO_x , в частности – диоксид углерода CO_2 , который образуется при использовании для топливных нужд ГПА природного газа. Известно, что количество выбросов CO_2 пропорционально количеству сжигаемого топливного газа, т. е. чем выше КПД газотурбинной установки, тем меньше выбросы CO_2 . При «богатой» (соотношение расходов воздуха и топлива меньше стехиометрического) смеси в зоне горения окись углерода CO образуется в больших количествах. Образование CO в этом случае определяется нехваткой кислорода для полного окисления топлива. Некоторое количество CO образуется и при «бедных» (соотношение расходов воздуха и топлива больше стехиометрического) смесях, что объясняется диссоциацией диоксида углерода CO_2 в зоне высоких температур за первичной зоной камеры сгорания. Исследования показывают, что значительное количество окиси азота NO образуется на режимах малой мощности, когда температура газа понижена и из-за низкой скорости реакции окисления размеров топочного пространства камеры сгорания не хватает для завершения реакции полного окисления до CO_2 . В то же время при больших нагрузках (температурах пламени) количество CO в выхлопных газах ГТД мало. Углекислота CO_2 не токсична и не взрывоопасна, однако при ее концентрациях в воздухе свыше 5 % (92 мг/м^3) снижается доля кислорода, что может привести к кислородной недостаточности и удушью. Уменьшения выбросов CO_2 можно достигнуть за счет снижения расхода газа через камеру сгорания и замены ГПА на новые, малоэмиссионные агрегаты с повышенным уровнем КПД до 35–39 % [2].

Другую существенную часть от общей эмиссии ВВ составляют окислы азота (NO_x), которые образуются в результате окисления азота, содержащегося в воздухе. Установлено, что влияние азота то-

плива достаточно мало. Основную долю окислов азота составляет окись NO, которая может окисляться до двуокиси азота NO₂ при низких температурах. В камерах сгорания образование NO₂ возможно только на режимах малого газа, когда их доля может быть значительной. При этом окись азота NO образуется в высокотемпературных зонах камеры сгорания при максимальных температурах газа, поэтому максимум ее концентрации наблюдается на режимах максимальной мощности. Этот процесс эндотермичен и идет с заметной скоростью при температурах выше 1800 К [2].

В газотурбинных установках следующего поколения обеспечение современных требований по эмиссии ВВ может быть обеспечено только в схеме с «бедным» фронтом камеры сгорания. В результате камера сгорания такого типа имеет достаточно узкий диапазон режимов работы и требует подключения (отключения) коллекторов, что создает ряд дополнительных проблем [7].

Малоэмиссионные камеры сгорания с «бедным» фронтом склонны к неустойчивости с одной стороны из-за близости режима работы к границе «бедного» срыва и с другой стороны – к виброгорению (термоакустической неустойчивости) из-за возможной малой длины зоны горения, обусловленной готовностью топливовоздушной смеси к воспламенению [8–10]. Следовательно, подсистема САУ ГПА, регулирующая работу МЭКС, должна включать в себя идентификатор приближения к границе «бедного» срыва, которая существенно зависит от внешних условий. Кроме того, необходим высокочастотный (работающий на частоте 100–1000 Гц) исполнительный механизм (ИМ), управляющий расходом топлива при возникновении термоакустической неустойчивости. Функция этого ИМ – обеспечить запас устойчивости процесса горения по фазе, т. е. активно влиять на обратную связь при автоколебаниях этого типа [11].

Обозначенный выше узкий диапазон режимов работы МЭКС, ограниченный с одной стороны нормируемым уровнем эмиссии окислов азота, а с другой – неприемлемыми в эксплуатации режимами срыва пламени или виброгорения (термоакустическими автоколебаниями) определяет основные сложности проектирования алгоритмов управления МЭКС.

В промышленных энергоустановках повышенной мощности (от 10 до 50 МВт) узел камеры сгорания является силовым узлом двигателя, воспринимающим вес турбины, силы и моменты, возникающие в камере сгорания и турбине при работе двигателя [12, 13]. Он включает корпус, собственно камеру сгорания, где расположены рабочие топливные форсунки (горелки), воспламенители, топливные коллекторы. Конструктивные особенности камеры сгорания кольцевого типа должны обеспечивать быстрое воспламенение и переброску пламени при запуске, а также оптимальную организацию процесса горения в сочетании с эффективной системой послыйного охлаждения стенок.

Все это призвано обеспечить устойчивую работу камеры сгорания на всех режимах, равномерное поле температур на входе в турбину и высокую эксплуатационную надежность в течение всего ресурса.

В общем случае МЭКС ГТД состоит:

- из фронтального устройства из горелок с лопаточным завихрителем и соплом и двумя контурами подачи топлива (т. н. диффузионным и гомогенным), функцией которого является подача и равномерное перемешивание топливовоздушной смеси за счет поперечных пульсаций концентраций (т. н. гомогенный контур с минимальной неоднородностью состава топливо-воздушной смеси и, соответственно, низким уровнем эмиссии) и обеспечение устойчивости пламени (т. н. диффузионный контур с большой неоднородностью состава топливо-воздушной смеси с расходом до 30 % общего расхода топлива, являющийся основным генератором эмиссии ВВ);
- топочного пространства, в котором осуществляется процесс горения. Длина топочного пространства определяется временем пребывания смеси, необходимого, для завершения горения.

По сути, задача управления эмиссией сводится к заданию (минимизации) доли расхода топлива через диффузионный контур с учетом ограничений по устойчивости рабочего процесса горения при изменении внешних и внутренних факторов в широком диапазоне.

В качестве основной целевой функции управления выбирается минимальный уровень эмиссии окислов азота и углерода. Для общности полученных решений в качестве дополнительной целевой функции предлагается рассматривать нормируемый интегральный уровень эмиссии за полный цикл работы двигателя.

Выполнение этих функций (критериев) соответственно может быть осуществлено т. н. *смарт-регулятором* – системой управления, построенной, например, по принципу нейронной сети [14, 15], в своем составе имеющей встроенную математическую модель генерации эмиссии окислов азота.

Выбор нейронного алгоритма как основы построения встроенной математической модели генерации эмиссии окислов азота объясняется его технологической простотой и высоким быстродействием [16]. Следует отметить, что математические модели высокого уровня требуют существенных вычислительных мощностей, применения сложного программного обеспечения и характеризуются сравнительно низким быстродействием [17].

В настоящее время технология построения моделей типа нейронных сетей достаточно широко применяется в том числе и для прогнозирования эмиссии окислов азота и углерода [18].

Опыт применения технологии нейронных сетей для задач управления двигателем в целом показывает, что основными проблемами являются: недо-

статочное информационное насыщение входной информацией (ограниченное количество подаваемых на вход в сеть измеряемых параметров) и слабая корреляция измеряемых параметров с некоторыми состояниями системы (вектор состояния имеет большую размерность, чем вектор входа). Как правило, количество измеряемых параметров на двигателе минимизируется, исходя из необходимости обеспечения надежности системы в целом.

Поэтому для обеспечения необходимой входной информацией нейронной САУ ГПА целесообразно использовать встроенную математическую модель камеры сгорания. Как показывает опыт [19], для решения задачи прогнозирования эмиссии с погрешностью не более 15 % эффективно используется нейронная сеть, имеющая 6 входов и 12 нейронов в скрытом слое с линейными функциями активации.

В случае применения встроенной математической модели камеры сгорания при обучении нейронной сети мы получаем отклонение параметра измеренного уровня эмиссии от модельного значения, границы «бедного» срыва и виброгорения. Далее ведется оптимизация параметров нейронной САУ ГПА или газотурбинной электростанции, целью которой является удовлетворение условию адекватного отображения обучающих данных.

Результаты моделирования и экспериментальных исследований

Как уже отмечалось, основной особенностью МЭКС новых поколений двигателей как объекта управления является существенная нелинейность, обусловленная, в частности, дискретным разделением на области работы со специфическими свойствами, обуславливающими сложность идентификации характеристик МЭКС, и, как следствие, неполноту и некорректность математического описания.

В настоящей работе идентификация МЭКС производится на основе построения нейронной сети, эффективно позволяющей увеличить качество решения задачи идентификации объектов высокой размерности на основе синтеза гибких и простых с математической точки зрения алгоритмов [20].

Структура сети определяется математической постановкой задачи. Нейронная сеть позволяет описывать нелинейные объекты в терминах «вход-выход». При этом нейронная сеть преобразует многомерный вектор входа $X(x_1, x_2, \dots)$ в многомерный вектор выхода $Y(y_1, y_2, \dots)$.

Возможность математического описания такого преобразования в виде суммы полиномов с различными весовыми коэффициентами при координатах X подтверждает теорема Арнольда–Колмо-

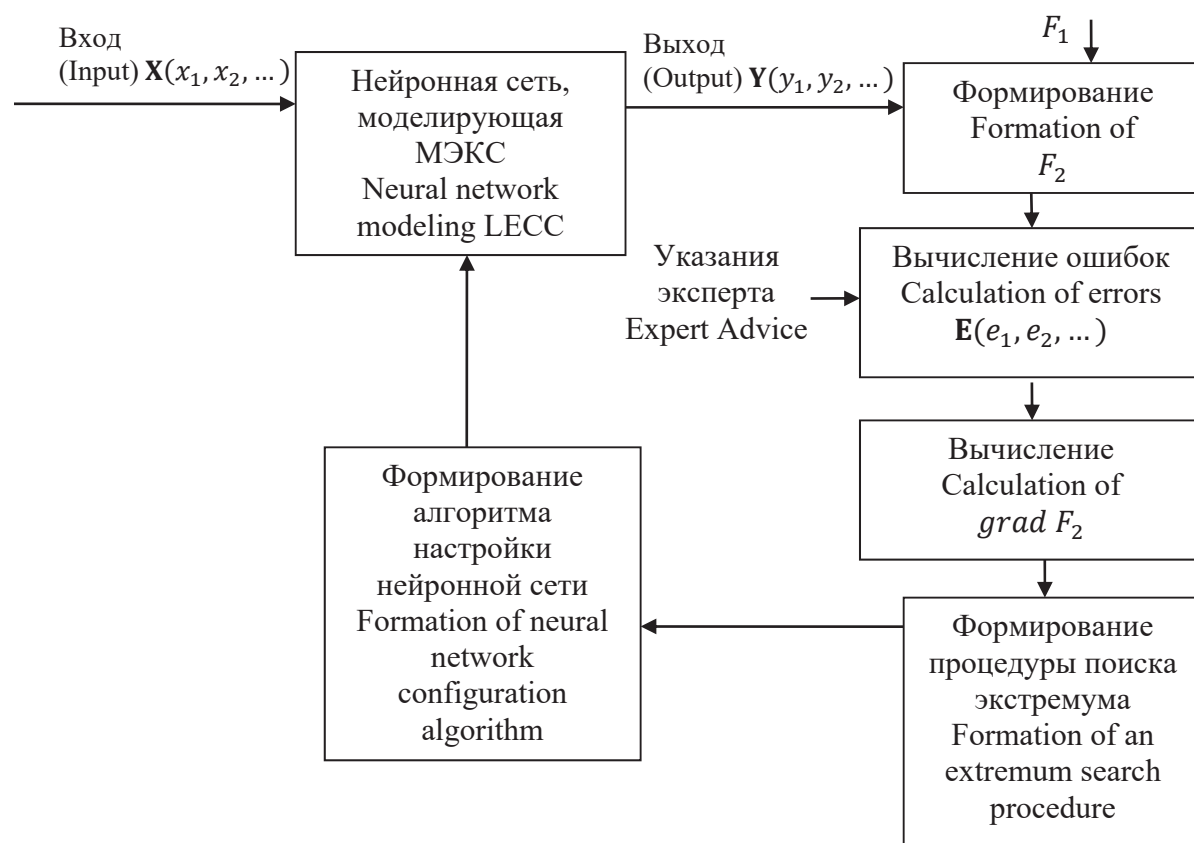


Рис. 1. Синтез нейросетевого алгоритма идентификации параметров МЭКС: F_1, F_2 функционалы первичной и вторичной оптимизации нейронной сети; $X(x_1, x_2, \dots), Y(y_1, y_2, \dots), E(e_1, e_2, \dots)$ – векторы входа, выхода и ошибки нейронной сети

Fig. 1. Synthesis of neural algorithm for identification of low-emission combustion chamber (LECC) parameters: F_1, F_2 are the functionals of primary and secondary optimization of the neural network; $X(x_1, x_2, \dots), Y(y_1, y_2, \dots), E(e_1, e_2, \dots)$ are the input, output and error vectors of a neural network

горова–Хехт-Нильсена (КАХН) [21, 22], согласно которой для любого множества непротиворечивых между собой пар отличных друг от друга входных и выходных векторов произвольной размерности существует двухслойный персептрон с сигмоидными функциями активации и с конечным числом нейронов, который для каждого входного вектора X формирует соответствующий ему выходной вектор Y .

Полученная таким образом модель реализует функцию нескольких переменных $(x_1, x_2, \dots)$ в виде суммы функций одной переменной x_i с различными весовыми коэффициентами w_i .

Алгоритм решения задачи идентификации на основе построения нейросетевого алгоритма определяется методикой синтеза многослойных искусственных нейронных сетей, которая включает этапы [23, 24]:

- 1) получение экспериментальных данных, описывающих идентифицируемый объект, на основе натурального эксперимента;
- 2) определение вектора входных сигналов (параметров) нейронной сети $X(x_1, x_2, \dots)$;
- 3) формирование функционала первичной оптимизации нейронной сети F_1 при решении поставленной задачи идентификации;
- 4) определение вектора выходных сигналов (параметров) нейронной сети $Y(y_1, y_2, \dots)$;
- 5) определение вектора ошибки нейронной сети $E(e_1, e_2, \dots)$;
- 6) формирование функционала вторичной оптимизации нейронной сети F_2 через сигналы, действующие в системе;
- 7) выбор метода поиска экстремума функционала вторичной оптимизации F_2 ;
- 8) аналитическое определение преобразования, осуществляемого нейронной сетью, выбор конкретной структуры нейронной сети;
- 9) нахождение аналитического выражения для определения градиента функционала вторичной оптимизации нейронной сети $grad F_2$ по настраиваемым параметрам;
- 10) формирование алгоритма настройки нейронной сети;
- 11) выбор начальных условий при настройке нейронной сети;
- 12) выбор типовых входных сигналов для тестирования нейронной сети;
- 13) реализация плана модельного эксперимента по оптимизации цепи (рис. 1).

При апробации методики проектирования нейронной сети для прогнозирования эмиссии ВВ рассмотрена реальная камера сгорания ГТУ мощностью 16 МВт, представленная на рис. 2.

Рассматривая МЭКС относится к противоточному типу с двенадцатью выносными жаровыми трубами с организацией горения «бедной» предварительно перемешанной смеси. В МЭКС применяется фронтное устройство одномодульного типа со стабилизацией пламени плохообтекаемым телом. Система охлаждения жаровой трубы импактно-

конвективная. МЭКС имеет три топливных коллектора: диффузионный коллектор, гомогенный коллектор, коллектор воспламенителей.

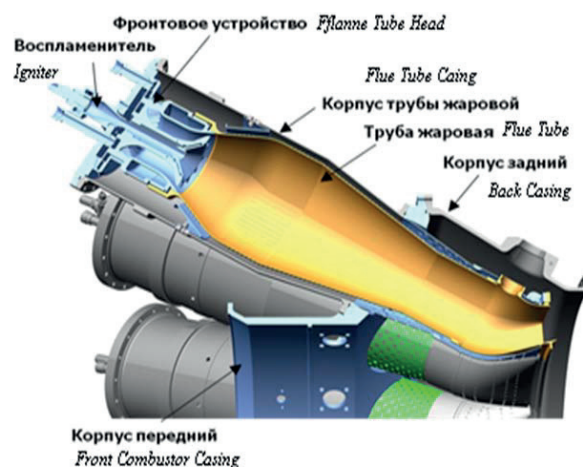


Рис. 2. Исследуемая промышленная МЭКС газотурбинной установки мощностью 16 МВт

Fig. 2. Industrial low-emission combustion chamber of 16 MW Gas-Turbine Unit

Для разработки модели МЭКС выбрана типичная для задач данного класса структура двухслойного персептрона – полносвязной нейронной сети с прямой передачей сигнала (рис. 3).

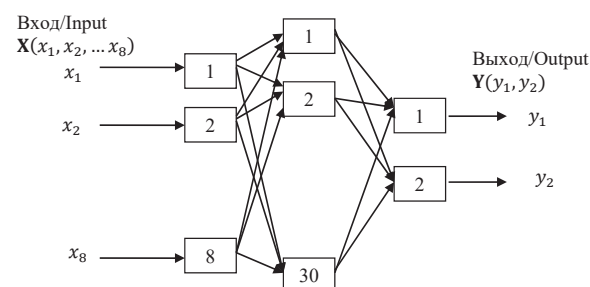


Рис. 3. Структура нейронной сети для моделирования МЭКС

Fig. 3. Neural network structure for modeling LECC

Полносвязные сети представляют собой искусственные НС, каждый нейрон которых передает свой выходной сигнал остальным нейронам, в том числе и самому себе. В рассматриваемой структуре нейроны регулярным образом организованы в слой. Слой содержит совокупность нейронов с едиными входными сигналами. Входной (нулевой) слой служит для ввода значений входных переменных. В общем случае двухслойный персептрон состоит из 3 слоев, пронумерованных слева направо. Внешние входные сигналы подаются на входы нейронов первого слоя (входной слой нумеруют как нулевой), а выходами сети являются выходные сигналы последнего слоя. Каждый из скрытых и выходных нейронов соединен со всеми элементами предыдущего слоя.

В качестве координат вектора входа $X\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8\}$ нейронной сети выбраны восемь входных параметров МЭКС:

- 1) x_1 – режим работы;
- 2) x_2 – температура за компрессором T_c ;
- 3) x_3 – давление P_c ;
- 4) x_4 – расход воздуха G_A ;
- 5) x_5 – расход топлива G_T ;
- 6) x_6 – температура газа T_G ;
- 7) x_7 – амплитуда пульсаций на частотах А200–400 Гц;
- 8) x_8 – доля топлива в пилотной горелке PFR.

В качестве координат вектора выхода $Y(y_1, y_2)$ нейронной сети выбраны два выходных параметра МЭКС, характеризующих эмиссию вредных веществ:

- 1) y_1 – концентрация NO_x ;
- 2) y_2 – концентрация CO .

При построении полносвязной двухслойной нейронной сети, имеющей один скрытый слой нейронов, необходимо определять оптимальное количество элементов в скрытом слое. Следствие из теоремы КАХН, лежащей в основе построения нейронных сетей, позволяет определить оптимальное количество нейронов в скрытом слое, которое обеспечивает с одной стороны минимальную ошибку обучения, а с другой – минимальную ошибку обобщения.

Оптимальное количество нейронов в скрытом слое зависит от числа синаптических весов (связей), которое может быть оценено по формуле [21]:

$$\frac{N_y Q}{1 + \log_2(Q)} \leq N_w \leq N_y \left(\frac{Q}{N_x} + 1 \right) (N_x + N_y + 1) + N_y, \quad (1)$$

где N_x – размерность входного сигнала; N_y – размерность выходного сигнала; Q – число элементов обучающей выборки; N_w – необходимое число синаптических связей.

В зависимости от полученного диапазона синаптических связей N_w можно оценить число нейронов в скрытых слоях. В частности, для двухслойного персептрона число нейронов скрытого слоя равно:

$$N = \frac{N_w}{N_x + N_y}. \quad (2)$$

Поскольку приведенные формулы (1), (2) являются оценочными, на практике оптимальное число нейронов скрытого слоя, необходимое для достижения желаемой точности модели, определяется экспериментальным путем. Очевидно, что с увеличением числа нейронов в скрытом слое точность модели возрастает. При этом увеличивается время обучения сети, и снижается быстродействие системы.

Из теоремы КАХН следует, что для любой функции многих переменных существует отображающая ее НС фиксированной размерности, при настройке (обучении) которой могут использоваться три степени свободы:

- область значений сигмоидальных функций активации нейронов скрытого слоя;
- наклон сигмоид нейронов этого слоя;
- вид функций активации нейронов выходного слоя.

Массив данных натурального эксперимента, использованных для разработки нейронной сети, моделирующей работу МЭКС, приведен в таблице.

По данным натурального эксперимента сформированы 26 обучающих выборок, одна тестирующая и одна прогнозирующая выборки. В качестве целей выбраны соответствующие массивы y_1, y_2 .

Моделирование нейронной сети, структурная схема которой приведена рис. 3, велось в пакете MATLAB.

В рассматриваемом практическом примере в процессе обучения нейронной сети оптимизация скрытых слоев ведется на основе алгоритма обратного распространения ошибки.

График изменения среднеквадратичной ошибки σ в течение всего периода обучения приведен на рис. 4.

Наилучший результат настроек нейронной сети в смысле критерия минимума среднеквадратичной ошибки дал среднюю относительную ошибку тестирования 10 %, среднюю относительную ошибку прогнозирования 3 %.

Таблица. Массив данных натурального эксперимента

Table. Data array of the full-scale experiment

Режим Mode, %	T_c , К	P_c , кгс/см ² kgf/cm ²	G_A , кг/с kg/s	G_T , кг/с kg/s	T_G , К	A200–400 Гц, кгс/см ² A200–400 Hz, kgf/cm ²	PFR, %	NO_x при 15 % O_2 , мг/м ³ NO_x at 15 % of O_2 , mg/m ³	CO 15 %, мг/м ³ mg/m ³
min	470,7	9,58	2,365	0,022	893	0,0027	100,0	74,5	1507,3
40	486,9	13,6	3,1	0,0	980,8	0,0040	100,0	96,7	673,3
50	503,8	14,39	3,265	0,039	1033	0,0046	100,0	121,2	526,0
50	576,6	14,50	3,106	0,043	1156	0,0046	100,0	214,3	207,1
50	616,4	14,21	2,945	0,043	1220	0,0046	100,0	280,6	99,3
50	654,8	13,52	2,835	0,044	1296	0,0048	100,0	346,5	37,1
50	656,7	13,39	2,951	0,046	1289	0,0032	15,5	38,4	4473,9
70	529,6	14,35	3,276	0,045	1118	0,0044	100,0	186,7	347,4
70	625,1	16,34	3,212	0,053	1298	0,0028	15,0	34,0	4213,1
70	625,5	17,24	3,165	0,061	1399	0,0028	15,6	62,0	65,6
70	623,8	16,11	3,246	0,053	1292	0,0046	100,0	329,6	45,4
70	673	16,54	3,226	0,056	1370	0,0034	15,1	50,6	337,3
70	673,3	16,73	3,220	0,059	1400	0,0036	15,0	60,5	51,8
70	688,3	16,43	3,172	0,057	1409	0,0041	15,1	66,7	17,2
70	687,8	16,43	3,173	0,058	1408	0,0049	9,7	40,5	36,1
100	564,7	18,08	3,132	0,065	1399	0,0038	15,2	66,3	62,8
100	564,1	16,98	3,189	0,055	1278	0,0034	14,4	70,6	5218,6
100	609	17,67	3,165	0,056	1329	0,0032	19,9	59,0	1411,7
100	609,3	18,00	3,133	0,061	1385	0,0026	15,2	61,3	102,8
100	608,6	17,40	3,171	0,055	1310	0,0029	15,1	37,9	2474,3
100	638,8	17,38	3,172	0,061	1409	0,0039	15,2	116,6	29,5
100	641,9	17,52	3,172	0,059	1388	0,0030	12,0	44,9	142,3
100	664,5	17,26	3,177	0,061	1426	0,0051	10,1	44,3	9,4
100	684,4	17,24	3,181	0,063	1462	0,0060	10,0	55,4	1,1
100	684,9	17,27	3,181	0,063	1464	0,0077	6,9	39,7	1,1
100	729,4	17,39	3,179	0,067	1544	0,0080	10,0	94,5	4,2
100	726,4	17,39	3,183	0,067	1538	0,0117	7,0	66,5	1,5
100	727,2	17,41	3,182	0,067	1537	0,0161	4,8	51,0	2,0
100	727,3	17,40	3,180	0,067	1537	0,0206	3,9	44,6	1,5

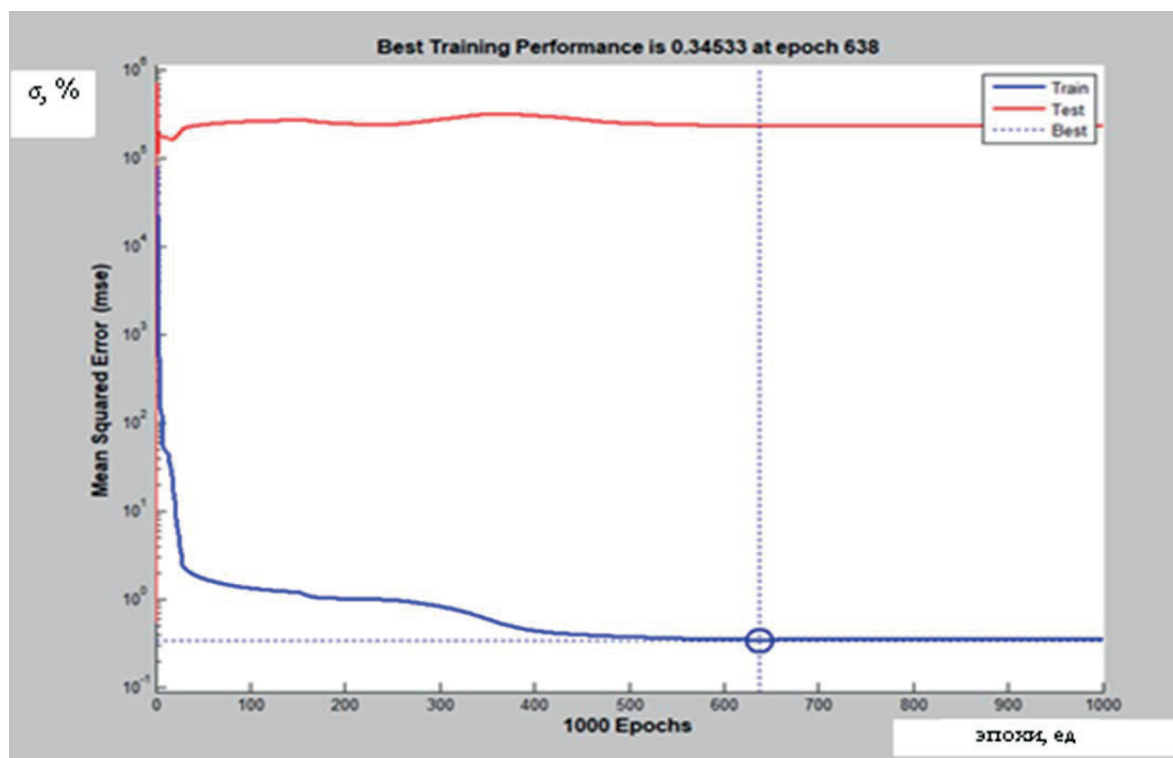


Рис. 4. Изменение среднеквадратичной ошибки в течение обучения

Fig. 4. Evolution of the root-mean-square error during training period (1000 epochs)

Исследование значимости для точности модели, а следовательно, степени влияния на величину эмиссии вредных веществ в атмосферу, координат вектора входа $X\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8\}$ иллюстрируется рис. 5.

Как показал анализ, наиболее значимым для увеличения эмиссии NO_x является x_3 – давление P_k . Существенное влияние на ошибку модели по данному выходному параметру оказывают также x_6 – температура газа T_g , x_7 – частота пульсации

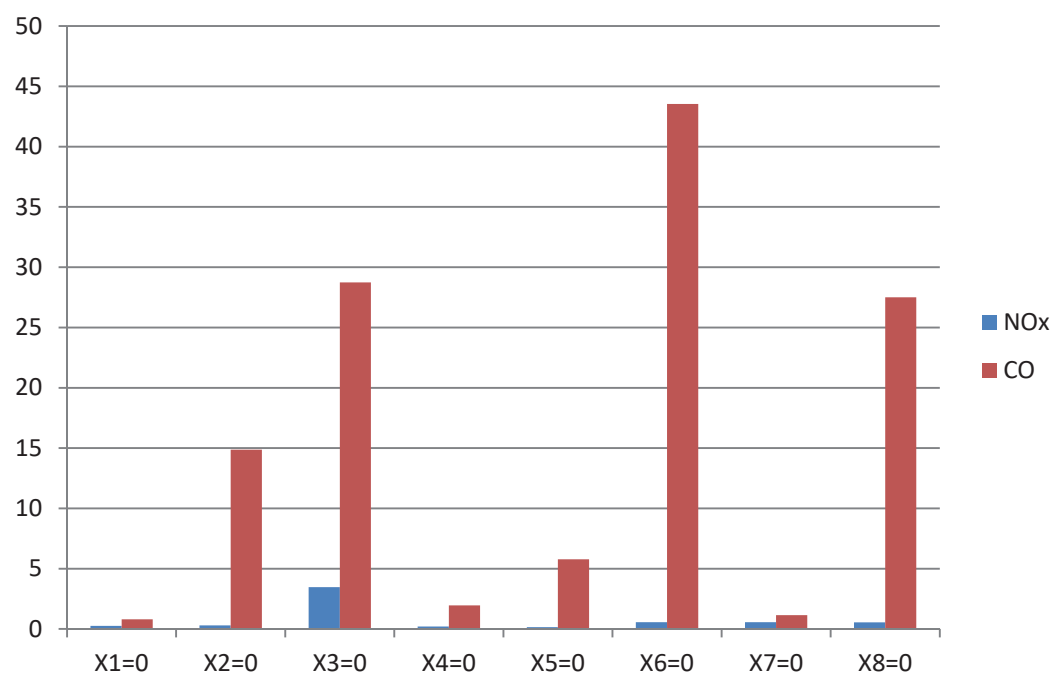


Рис. 5. Исследование степени влияния входных параметров МЭКС на величину эмиссии загрязняющих веществ в атмосферу

Fig. 5. Results of studies of the effect of LECC input parameters on the emission of pollutants into the atmosphere

A200–400 Гц, x_8 – доля топлива в пилотной горелке PFR. Но влияние этих параметров почти в 6,5 раз меньше.

Наиболее значимым для увеличения эмиссии СО является x_6 – температура газа T_{Γ} . Существенное влияние на ошибку модели по данному выходному параметру оказывают также x_3 – давление P_K и x_8 – доля топлива в пилотной горелке PFR. Однако их действие в 1,5 раза меньше, чем влияние T_{Γ} . Также следует отметить влияние x_2 – температура за компрессором T_K , которое почти в 3 раза меньше, чем влияние T_{Γ} .

Кроме того, следует отметить значительно большую чувствительность эмиссии СО к полноте набора входных параметров. В частности, наиболее значимые параметры разнятся по влиянию в 12,5 раз.

Таким образом, на основании данных модельного эксперимента можно утверждать, что наиболее

значимыми параметрами, влияющими на точность модели МЭКС, являются: давление P_K , температура газа T_{Γ} , доля топлива в пилотной горелке PFR.

Заключение

Проведенное моделирование в среде MatLab подтверждает гипотезу возможности построения робастных моделей МЭКС на основе искусственных нейронных сетей при учете значимости факторов влияния.

В целом полученные результаты соответствуют современным международным требованиям к системным исследованиям структуры и функционированию сложных объектов и могут быть использованы при проектировании отказоустойчивых систем автоматического управления газотурбинными двигателями для повышения его надежности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Научно-техническая политика ПАО «Газпром» в области газоперекачивающей техники. URL: <http://www.turbiniist.ru/12878-nauchno-tehnicheskaya-politika-oao-gazprom-v-oblasti-gazoperekachivayuschey-tehniki.html> (дата обращения 20.04.2018).
2. Забелин Н.А., Лыков А.В., Рассохин В.А. Эмиссия загрязняющих веществ от газотранспортной системы ОАО «ГАЗПРОМ» // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2013. – № 3 (178). – С. 294–305.
3. СТО Газпром 2-3.5-138-2007. Типовые технические требования к газотурбинным ГПА и их системам. URL: <http://elima.ru/docs/index.php?id=6267> (дата обращения 20.04.2018).
4. Кибарин А.А., Ходанова Т.В. Повышение экологической безопасности газоперекачивающих компрессорных станций за счет модернизации ГПА // Современные наукоемкие технологии. – 2009. – № 11. – С. 35–37.
5. Reddy D.R., Lee C.M. An Overview of Low-Emission Combustion Research at NASA Glenn // Proceedings of ASME Conference Turbo-Expo. – Seoul, South Korea, June 13–17, 2016. – P. V04AT04A003. DOI: 10.1115/GT2016-56100.
6. Model Based Prediction of off-Design Operation Condition NO_x Emission from DLE Gas Turbine Combustors / M. Lauer, J. Färber, F. Reiß, J.E. Masalme // Proceedings of ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. V. 4A: Combustion, Fuels and Emissions. – Charlotte, North Carolina, June 26–30, 2017. – P. V04AT04A003. DOI: 10.1115/GT2017-63063.
7. Avgustinovich V.G., Kutsenko Y.G. Creation and Application of Combined Calculation Methodology for Low Emission Combustion Chamber // Russian Aeronautics. – 2011. – V. 54. – № 2. – P. 170–178.
8. Campa G., Juniper M.P. Obtaining Bifurcation Diagrams with a Thermoacoustic Network Model // Proceedings of ASME Conference Turbo Expo 2012. GT2012-62241. – Copenhagen, 2012. – 11 p.
9. High Frequency Thermoacoustic Modulation Mechanisms in Swirl-Stabilized Gas Turbine Combustors. P. I: Experimental Investigation of Local Flame Response / F. Berger, T. Hummel, M. Hertwech, J. Kaufmann, B. Schuermans, T. Sattelmayer // Proceedings of ASME Conference Turbo Expo 2016. GT2016-57583. – Seoul, 2016. – 13 p.
10. Experimental Analysis of High-Amplitude Temporal Equivalence Ratio Oscillations in the Mixing Section of a Swirl-Stabilized Burner / R. Blumner, C.O. Pascheret, K. Oberleithner, B. Cosic // Proceedings of ASME Conference Turbo Expo 2016. GT2016-56585. – Seoul, 2016. – 10 p.
11. Dynamic Suppression in Liquid-Fuelled Combustors Using Fuel Modulation / Z. Hong, J.T. Herbon, J.M. Haynes, K.R. McManus // Proceedings of ASME Conference Turbo Expo 2012. GT2012-69703. – Copenhagen, 2012. – 10 p.
12. Каталог: Газотурбинные установки и промышленное оборудование на их основе. – М.: VEYA Investments Ltd., 2018. – 52 с. URL: <http://docplayer.ru/28095044-Katalog-gazoturbinnye-ustanovki-i-promyshlennoe-oborudovanie-na-ih-osnove.html> (дата обращения 02.04.2018).
13. Каталог газотурбинного оборудования 2017. – Рыбинск, Ярославская область: ИД «Газотурбинные технологии», 2017. – 384 с.
14. Нейрокомпьютеры в авиации (самолеты) / под ред. В.И. Васильева и др. – М.: Радиотехника, 2003. – 496 с.
15. Кузнецова Т.А., Августинovich В.Г. Применение технологий искусственного интеллекта для управления малоэмиссионной камерой сгорания авиационного двигателя // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2017. – Т. 15. – № 9. – С. 18–28.
16. Шаламов А.В., Мазеин П.Г. Нейронные сети как новый подход к управлению технологическим оборудованием // Известия Челябинского научного центра. Проблемы машиностроения. – 2003. – Вып. 1 (18). – С. 60–64.
17. Куценко Ю.Г. Методология проектирования малоэмиссионных камер сгорания ГТД на основе математических моделей физико-химических процессов: дис. ... д-ра техн. наук. – Пермь, 2010. – 193 с.
18. Lamont W.G., Roa M., Lucht R. Application of Artificial Neural Networks for the Prediction of Pollutant Emissions and Outlet Temperature in Fuel Staged Gas Turbine. Combustion Rig // Proceedings of ASME Conf. Turbo Expo. – Dusseldorf, 2014. – GT2014-25030. – 10 p.
19. Vanderhaegen E., Deneve M. Predictive Emissions Monitoring Using a Continuously Updating Neural Network // Proceedings of ASME Conf. Turbo Expo. – Glasgow, 2010. – GT2010-22899.
20. Галушкин А.И. Нейроматематика: методы решения задач на нейроматематике. – М.: НИИ «Квант», 1991. – 44 с.
21. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. 2-е изд., стереотип. – М.: Горячая линия-Телеком, 2002. – 382 с.

22. Ясницкий Л.Н. Интеллектуальные системы. – М.: Лаборатория знаний, 2016. – 221 с.
23. Галушкин А.И. Нейронные сети. Основы теории. – М.: Горячая линия-Телеком, 2017. – 496 с.
24. Tagliarini G.A., Page E.W. Solving constraint satisfaction problems with neural networks // Proceedings of IEEE 1st Int. Conf. Neural Networks. – San Diego, California, June 21–24, 1987. – V. 3. – P. 741–747.

Поступила 09.05.2018.

Информация об авторах

Августинович В.Г., доктор технических наук, профессор кафедры авиационных двигателей Аэрокосмического факультета Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Кузнецова Т.А., кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и технологий в электротехнике Электротехнического факультета Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Нугуманов А.Д., аспирант кафедры авиационных двигателей Аэрокосмического факультета Пермского национального исследовательского политехнического университета.

UDC 621.4:681.5

DEVELOPMENT OF NEURAL SYSTEMS FOR MONITORING AND CONTROLLING EMISSION OF GAS-TRANSMISSION AND POWER GAS TURBINE UNITS

Valeriy G. Avgustinovich¹,

august@avid.ru

Tatiana A. Kuznetsova¹,

tatianaakuznetsova@gmail.com

Alexey D. Nugumanov¹,

nugumanov@avid.ru

¹ Perm National Research Polytechnic University,
29, Komsomolskiy Avenue, Perm, 614990, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to solve the problem of real-time monitoring and automatic control of nitrogen and carbon oxides emissions during operation of gas turbine units in gas compressor units and next-generation power plants characterized by a low level of harmful substances generation.

The main aim of the research is compliance with emission standards while ensuring the stability of combustion under the influence of external and internal factors based on the creation of robust control algorithms for low-emission combustion chambers of gas turbine gas-compressor units of compressor stations of main gas pipelines and power plants, including prediction of their environmental effects, based on artificial intelligence technologies.

Object of the research is low-emission combustion chamber of gas turbine gas-compressor units of compressor stations of main gas pipelines and power plants.

Methods: design procedure for multilayered artificial neural networks based on the Arnold–Kolmogorov–Hecht–Nielsen theorem; back propagation algorithm; methods of full-scale experiment for low-emission combustion chambers; simulation methods and model experiment in the MATLAB environment.

Results. The main features of low-emission combustion chamber of gasturbine units are considered. Low-emission combustion chamber tendency to unstable operation on the one hand is caused by the proximity of the operating mode to the boundary of the «poor» blowout and on the other hand – by the proximity of the combustion vibration mode, noted as the main automatic control problem. The problem of emission automatic control as a minimization of the share of fuel consumption through the diffusion contour is formulated, taking into account the limitations on the stability of combustion when the external and internal factors are changed in a wide range. The solution of automatic control problem based on artificial intelligence technologies including a built-in mathematical model for harmful substances emission is substantiated. The authors have developed the algorithm for low-emission combustion chamber mathematical model design based on artificial neural networks, taking into account the significance of the influence factors. As an example of solving the problem, the neural network developed and the process of its learning based on the experimental data of the real low-emission combustion chamber are presented. The data array of a full-scale experiment was obtained for studying the characteristics of emissions of the nitrogen and carbon oxides (NO_x and CO) during operation of the low-emission combustion chamber of industrial power plant (16 MW). The neural circuit simulating NO_x emission and CO emission at the low-emission combustion chamber output was designed and trained on the basis of the obtained data. The simulation results in the MATLAB environment showed high accuracy of the developed model. The importance for the model accuracy of different factors is studied. It turned out that temperature and pressure parameters are the most important. The obtained results can be used in the fault-tolerant system design for automatic control of gas turbine units to improve their reliability and environmental attractiveness.

Key words:

Gas-turbine unit, low-emission combustion, automatic control and monitoring system, artificial intelligence, neural network.

REFERENCES

1. *Nauchno-tehnicheskaya politika PAO «Gazprom» v oblasti gazoperekachivayushchey tekhniki* [The scientific and technical policy of Public corporation «Gazprom» in the field of gas pumping technology]. Available at: <http://www.turbunist.ru/12878-nauchno-tehnicheskaya-politika-oao-gazprom-v-oblasti-gazoperekachivayushchey-tehniki.html> (accessed 20 April 2018).
2. Zabelin N.A., Lykov A.V., Rassokhin V.A. Emission of contaminant from GAZPROM'S gas-transport system. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal*, 2013, no. 3 (178), pp. 294–305. In Rus.
3. *STO Gazprom 2–3.5–138–2007. Tipovye tekhnicheskie trebovaniya k gazoturbinnym GPA i ikh sistemam* [Standard of organization Gazprom 2–3.5–138–2007. Typical technical requirements for gas turbine gas-pumping unit (GPU) and their systems]. Available at: <http://elima.ru/docs/index.php?id=6267> (accessed 20 April 2018).
4. Kibarin A.A., Khodanova T.V. Povyshenie ekologicheskoy bezopasnosti gazoperekachivayushchikh kompressornykh stantsiy za schet modernizatsii GPA [Increase of ecological safety of gas pumping compressor stations due to modernization of GPU]. *Modern high technology*, 2009, no. 11, pp. 35–37. In Rus.
5. Reddy D.R., Lee C.M. An Overview of Low-Emission Combustion Research at NASA Glenn. *Proceedings of ASME Conference Turbo-Expo*. Seoul, South Korea, June 13–17, 2016. pp. V04AT04A003. DOI: 10.1115/GT2016-56100.
6. Lauer M., Färber J., Reiß F., Masalme J.E. Model Based Prediction of off-Design Operation Condition NO_x Emission from DLE Gas Turbine Combustors. *Proceedings of ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*. Vol. 4A: Combustion, Fuels and Emissions. Charlotte, North Carolina, June 26–30, 2017. Vol. 4A, pp. V04AT04A003. DOI: 10.1115/GT2017-63063.
7. Avgustinovich V.G., Kutsenko Y.G. Creation and Application of Combined Calculation Methodology for Low Emission Combustion.

- stion Chamber. *Russian Aeronautics*, 2011, vol. 54, no. 2, pp. 170–178.
8. Campa G., Juniper M.P. Obtaining Bifurcation Diagrams with a Thermoacoustic Network Model. *Proceedings of ASME Conference Turbo Expo 2012*. GT2012–62241. Copenhagen, 2012. 11 p.
9. Berger F., Hummel T., Hertwech M., Kaufmann J., Schuermans B., Sattelmayer T. High Frequency Thermoacoustic Modulation Mechanisms in Swirl-Stabilized Gas Turbine Combustors. Part One: Experimental Investigation of Local Flame Response. *Proceedings of ASME Conference Turbo Expo 2016*. GT2016–57583. Seoul, 2016. 13 p.
10. Blumner R., Pascheret C.O., Oberleithner K., Cosic B. Experimental Analysis of High-Amplitude Temporal Equivalence Ratio Oscillations in the Mixing Section of a Swirl-Stabilized Burner. *Proceedings of ASME Conference Turbo Expo 2016*. GT2016–56585. Seoul, 2016. 10 p.
11. Hong Z., Herbon J.T., Haynes J.M., McManus K.R. Dynamic Suppression in Liquid-Fuelled Combustors Using Fuel Modulation. *Proceedings of ASME Conference Turbo Expo 2012*. GT2012–69703. Copenhagen, 2012. 10 p.
12. *Katalog: Gazoturbinnye ustanovki i promyshlennoe oborudovanie na ikh osnove* [Catalog: Gas-turbine units and industrial equipment based on them]. Moscow, VEYA Investments Ltd., 2018, 52 p. Available at: <http://docplayer.ru/28095044-Katalog-gazoturbinnye-ustanovki-i-promyshlennoe-oborudovanie-na-ih-osnove.html> (accessed 2 April 2018).
13. *Katalog gazoturbinnogo oborudovaniya 2017* [Gas Turbine Equipment Catalog 2017]. Rybinsk, Gas Turbine Technologies Publ. House, 2017. 384 p.
14. Vasiliev V.I. *Neyrokomp'yutery v aviatsii (samolety)* [Neurocomputers in Aviation (Airplanes)]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2003. 496 p.
15. Kuznetsova T.A., Avgustinovich V.G. The application of artificial intelligence technologies for adaptive control of low-emission combustion chamber of aircraft engine. *Information-measuring and Control Systems*, 2017, vo. 15, no. 9, pp. 18–28. In Rus.
16. Shalamov A.V., Mazine P.G. Neural networks as a new approach to the management of technological equipment. *News of Chelyabinsk Scientific Center. Problems of mechanical engineering*, 2003, no. 1 (18), pp. 60–64. In Rus.
17. Kutsenko Yu.G. *Metodologiya proektirovaniya maloemissionnykh kamer sgoraniya GTD na osnove matematicheskikh modeley fiziko-khimicheskikh protsessov*. Dis. Dokt. nauk [Methodology for design of low-emission GTE combustion chambers based on mathematical models of physical and chemical processes. Dr. Diss.]. Perm, 2010, 193 p.
18. Lamont W.G., Roa M., Lucht R. Application of Artificial Neural Networks for the Prediction of Pollutant Emissions and Outlet Temperature in Fuel Staged Gas Turbine. Combustion Rig. *Proceedings of ASME Conf. Turbo Expo (Dusseldorf)*, 2014. GT2014–25030. 10 p.
19. Vanderhaegen E., Deneve M. Predictive Emissions Monitoring Using a Continuously Updating Neural Network. *Proceedings of ASME Conf. Turbo Expo (Glasgow)*, 2010. GT2010–22899.
20. Galushkin A.I. *Neyromatematika: metody resheniya zadach na neyrokomp'yuterakh* [Neuromathematics: methods of solving problems on neurocomputers]. Moscow, NII KVANT Publ., 1991. 44 p.
21. Kruglov V.V., Borisov V.V. *Iskusstvennye neyronnye seti. Teoriya i praktika* [Artificial neural networks. Theory and Practice]. Moscow, Goryachaya Liniya-Telekom Publ., 2002. 382 p.
22. Yasnitsky L.N. *Intellektualnye sistemy* [Intellectual systems]. Moscow, Laboratoriya znaniy Publ., 2016. 221 p. In Rus.
23. Galushkin A.I. *Neyronnye seti. Osnovy teorii* [Neural networks. Fundamentals of the theory]. Moscow, Goryachaya Liniya-Telekom Publ., 2017. 496 p.
24. Tagliarini G.A., Page E.W. Solving constraint satisfaction problems with neural networks. *Proceedings of IEEE 1st Invol. Conf. Neural Networks*. San Diego, California, June 21–24, 1987. Vol. 3, pp. 741–747.

Received: 9 May 2018.

Information about the authors

Valeriy G. Avgustinovich, Dr. Sc., professor, Perm National Research Polytechnic University.

Tatiana A. Kuznetsova, Cand. Sc., associate professor, Perm National Research Polytechnic University.

Alexey D. Nugumanov, postgraduate student, Perm National Research Polytechnic University.

УДК 631.4 (571.621)

ИЗМЕНЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИЙ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ПОЧВ ЮГА СРЕДНЕАМУРСКОЙ НИЗМЕННОСТИ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ

Зубарев Виталий Александрович¹,

Zubarev_1986@mail.ru

Мищук Светлана Николаевна¹,

svetamic79@mail.ru

¹ Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН,
Россия, 679016, г. Биробиджан, ул. Шолом-Алейхема, 4.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью оценки экологического состояния мелиорируемых почв приграничных районов Среднеамурской низменности, арендуемых азиатскими рабочими, которые для получения высоких урожаев используют в больших объемах минеральные удобрения, стимуляторы роста и химикаты для защиты растений, что приводит к деградации сельскохозяйственных почв.

Цель: анализ изменений концентраций тяжелых металлов почв Среднеамурской низменности при длительном сельскохозяйственном использовании.

Объект: лугово-глеевые немелиорированные и мелиорированные почвы, используемые в сельскохозяйственном обороте.

Методы: метод атомно-абсорбционной спектрометрии на спектрометре «Solaar 6M» и расчет суммарных коэффициентов загрязнения почв.

Результаты. Проведенное исследование показало, что на изменение концентраций тяжелых металлов почв Среднеамурской низменности при длительном сельскохозяйственном использовании могло оказывать влияние атмосферное увлажнение летне-осеннего периода. Показано, что в мелиорированных почвах к окончанию сельскохозяйственного сезона наблюдается снижение содержания тяжелых металлов и уменьшение суммарного коэффициента загрязнения, в то время как в неосушенных почвах – противоположный процесс – увеличение загрязнения. Исследовано влияние степени затопления пойм на содержание гумуса и кислотность почв, которые определяют миграцию и формирование концентрационных рядов тяжелых металлов. В засушливые годы концентрации металлов практически не изменялись, в период наводнения (2013–2014 гг.), при обильном выпадении осадков преобладали процессы, ведущие к увеличению концентраций цинка, свинца и меди. Затопление почв изменяло содержание тяжелых металлов вследствие механического стока, уменьшения содержания гумуса и изменения кислотности почв.

Ключевые слова:

Среднеамурская низменность, лугово-глеевые почвы, тяжелые металлы, приграничный район, осушительная мелиорация.

Введение

Повышение урожайности сельскохозяйственных культур на современном этапе развития земледелия связано с систематическим внесением минеральных удобрений. Вместе с тем удобрения не только обеспечивают высокую продуктивность земледелия, но могут оказывать и негативное воздействие на почву из-за содержащихся в них примесей, в том числе тяжелых металлов TM. Их источником являются минеральные удобрения, пестициды, известковые материалы, орошение сточными водами. Накапливаясь в почве в опасных концентрациях, они негативно влияют на жизнедеятельность почвенной биоты, загрязняют сельскохозяйственную продукцию [1–4].

Интерес к подобным исследованиям вызван территориальной близостью Китая к южной части Среднеамурской низменности, что предопределяет сходство почвенно-климатических, генетических, и в какой-то мере экономических условий сельскохозяйственного производства. К тому же в последние годы увеличиваются масштабы использования пахотных почв юга Среднеамурской низменности китайскими арендаторами, применяющими технологии, для которых характерно интенсивное использование минеральных удобрений и пестицидов. Контроль состояния арендуемых земель по ряду

причин практически отсутствует. Использованные после аренды участки часто забрасывают, пытаясь получить взамен другие участки с менее деградированными почвами. Подобная ситуация складывается не только на Дальнем Востоке, но и в других регионах России, граничащих с Китаем (Забайкалье, Восточной Сибири) [5].

Для прогноза деградации почвенного покрова важно наблюдать за изменением физических и химических свойств почвы в условиях интенсивного применения высоких доз удобрений, ядохимикатов и пестицидов, как это практикуется в современной земледельческой практике Китая [6]. Агрохимическая практика китайских производителей, сложившаяся за последние десятилетия, свидетельствует о том, что при выращивании сельскохозяйственных культур используется большое количество минеральных удобрений, пестицидов и других средств химизации. Например, в начале 2000-х гг. в провинции Хэйлунцзян среднее количество внесенных минеральных удобрений составляло 130 кг/га, в Приморском крае – 6,0 кг/га, в Амурской области – 6,4 кг/га, в ЕАО – 1,5 кг/га [7].

Целью работы является анализ изменений концентраций тяжелых металлов в лугово-глеевых почвах Среднеамурской низменности при длительном сельскохозяйственном использовании.

Материалы и методики исследования

Среднеамурская низменность – обширная аккумулятивная равнина в системе нижнеамурских низменностей, является частью трансграничной Сунгари-Среднеамурской физико-географической провинции, на российскую часть которой приходится 59,7 % ее площади, китайскую – 40,3 % [8].

Среднеамурская низменность (рис. 1) расположена в зоне хвойно-широко-лиственных лесов, представляет собой озерно-аллювиальную равнину, сложенную рыхлыми отложениями среднего и верхнего плейстоцена. Она относится к Тихоокеанской климатической области умеренного пояса и характеризуется континентальным климатом с муссонными чертами. Среднегодовая сумма атмосферных осадков составляет 500–600 мм, в отдельные годы до 1000 мм. Сумма температур выше 10 °С – 2200–2400 °С [9].

Складывающиеся природно-климатические условия – избыточное поверхностное увлажнение, тяжелый гранулометрический состав почв и почвообразующих пород, неустойчивая верховодка, фиксируемая сезонной мерзлотой, и пульсирующий окислительно-восстановительный режим – определяют процессы формирования почв и их специфические черты: отбеливание подгумусовых горизонтов, конкреции и глееобразование, дифференциацию профиля по элювиально-иллювиальному типу.

По механическому составу большинство почв относится к тяжелым и средним суглинкам. Гранулометрический состав почв средне- и тяжелосуглинистый. Плотность сложения пахотного горизонта колеблется в пределах 0,9–1,18 г/см³, подпахотного 1,4–1,5 г/см³. Для профиля этих почв характерна четко выраженная структура. Водостойчивость почвенных агрегатов в пахотном слое

высокая и составляет 80–90 %, в иллювиальном горизонте она неустойчива и варьирует в пределах 10–75 %. Тяжелый гранулометрический состав почв является основной причиной их переувлажнения при обильном выпадении летних осадков. Это ухудшает условия питания растений и затрудняет проведение агротехнических работ [10].

Для изучения влияния осушительной мелиорации на состояние почв на территории Среднеамурской низменности полевые исследования проводились с 2009 по 2014 гг. Для сравнительного анализа выбраны немелиорированные и мелиорированные используемые в сельскохозяйственном обороте (рис. 2) лугово-глеевые почвы первой надпойменной террасы речной долины р. Амур. В каждом исследуемом полигоне производился отбор проб из поверхностного почвенного горизонта (0–20 см) методом квадрата по ГОСТ 28168–89 [11]. Общее число всех проб за исследуемый период – 340 (170 образцов почв немелиорированных и 170 – мелиорированных).

В лабораторных условиях все образцы почв были высушены до воздушно-сухого состояния и подвержены измельчению в планетарной мельнице «Pulverisette 6» фирмы «FRITCH» до пылевидной фракции <0,25 мкм.

В подготовленных образцах почв проводили определение подвижных форм ТМ. экстрагировали 1 н. HNO₃ (осч), поскольку с помощью этого экстрагента выявляется фонд ТМ, способный стать подвижным в системе почва – сельскохозяйственная культура [12]. Из группы ТМ определялись: железо (Fe), марганец (Mn) – типичные природные элементы Буреинской ландшафтно-геохимической провинции; медь (Cu), свинец (Pb), цинк (Zn) – характерные природно-антропогенные загрязнители данной территории.



Рис. 1. Среднеамурская низменность

Fig. 1. Middle Amur Lowland

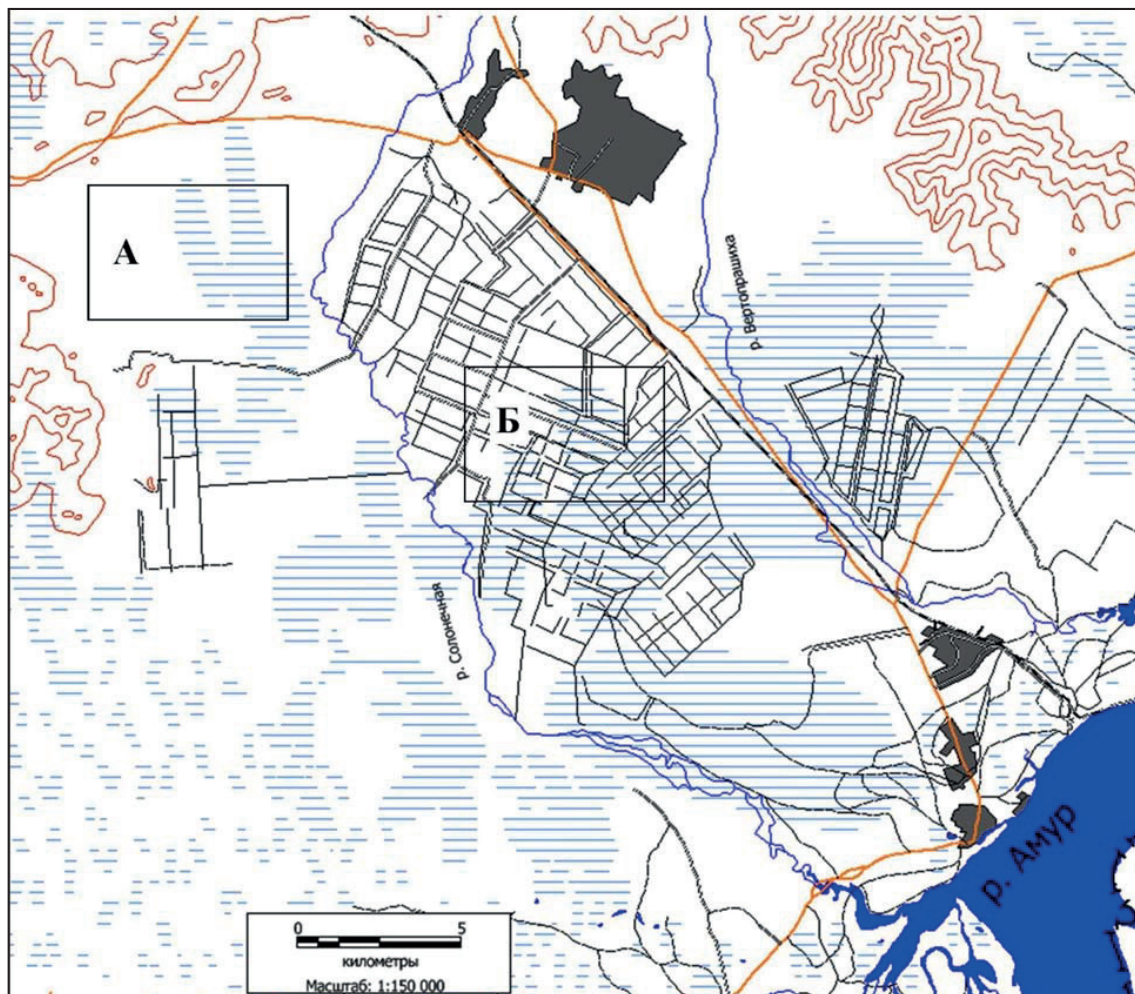


Рис. 2. Полигоны отбора проб почв: А – немелиорированные, Б – мелиорированные почвы

Fig. 2. Land sampling ranges: A – not reclaimed soil, B – reclaimed soils

Содержание ТМ анализировали методом атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) на приборе «ThermoElectron SOLAAR 6M» – это двухлучевой, полностью автоматический спектрометр с двумя фиксированными атомизаторами – пламя (ацетилен воздух) и графитовая печь (аргон воздух), основанный на оптической схеме Эшелле с оптикой Стокдейла, полной термокомпенсацией и высокой светосилой, с дейтериевым корректором фона «Quadline» и «Зееман». Диапазон абсорбции от 0,150 до 3,000 Å. Оптический диапазон 180–900 нм, автоматическая установка длины волны, напряжения на фотоумножителе и полосы пропускания 0,2, 0,5, 1,0 нм с дополнительной 0,1 нм для длин волн меньше 400 нм. Спектрометр измеряет концентрацию каждого металла на характерной для него спектральной линии. Управление процессом измерения и обработка полученной информации производится в трехкратной повторяемости с помощью компьютера методом градуировочного графика с автоматическим расчетом доверительного интервала [13].

Содержание гумуса определяли методом И.В. Тюрина [14], актуальную кислотность потенциометрией [15].

Все анализы проводили в 3-кратной повторяемости. Статистическую обработку – в программе «Microsoft Office Excel 2007». В работе приведены средние значения.

Все лабораторные исследования проводили на аппаратной базе ИКАРП ДВО РАН, аналитик В.А. Зубарев.

Для комплексного анализа содержания ТМ в почвах были рассчитаны суммарные коэффициенты загрязнения ($Z_{\text{ср}}$) с учетом индексов опасности загрязнителей:

$$Z_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^n (K_c \cdot K_t) - (n - 1),$$

где K_c – коэффициент загрязнения почв, равный $K_c = C_i / C_{\text{ф}}$, где C_i – фактическая концентрация элемента; $C_{\text{ф}}$ – фоновое значение элемента; K_t – индекс класса опасности загрязнителей, равный 1,5 для элементов первого (Zn и Pb), 1 – для второ-

го (Cu, Fe,) и 0,5 – для третьего (Mn) класса опасности, n – количество ТМ [16]. В качестве C_{ϕ} применялись значения предельно допустимых концентраций (ПДК) подвижных форм ТМ в почвах.

Результаты и их обсуждение

По мнению ряда ученых, огромная роль в процессах формирования количественного содержания тяжелых металлов в почвах принадлежит генезису, распределению тяжелых металлов в горных породах и породообразующих минералах и различием состава и сложения материнской породы [17]. Вследствие изменения микрорельефа при проведении осушительной мелиорации в пределах водосборной территории изменяется вынос тяжелых металлов из поверхности почвенного горизонта по дренажным каналам в поверхностные водотоки. При этом значительную роль имеет атмосферное увлажнение, определяющее объем воды для поверхностного и подземного транзита загрязняющих веществ [18].

Как видно из данных, приведенных в таблице, во всех почвах содержание ТМ различно, оно определяется, вероятно, особенностью рельефа, интенсивностью поверхностного и подземного стоков в различные временные периоды, а также свойствами самого элемента.

Железо. Железо относится к числу сидерофильных элементов (типичных металлов для ЕАО), имеющих химическое родство с углеродом (карбонаты), фосфором (фосфаты), серой (сульфаты, сульфиды) и кремнием (силикаты). В почвах железо не считается элементом-загрязнителем, и поэтому нормативов, лимитирующих его содержание в данной среде, не существует. Кларк железа в почве составляет 38000 мг/кг [19]. Железо является одним из основных элементов, входящих в состав почвы, колебание содержания железа в мелиорируемых почвах весьма существенно. В исследуемых образцах, не подверженных влиянию осушения, железо общее примерно на 80 % находится в виде двухвалентного (закислого) железа и 20 % приходится на трехвалентное (окислое) железо.

Повышенное количество Fe^{2+} связано с глеевыми процессами, зависящих от многообразных факторов, к которым можно отнести условия влажности исследуемой территории, гранулометрический состав почв, химические и биологические процессы, а также содержание и формы органического вещества и др. [20]. В противоположность этому при дренировании осушительными каналами создаются условия улучшенной аэрации, снижения влажности и изменения рН в сторону нейтральной среды, что приводит к увеличению трехвалентного железа до 40 %.

Марганец. Одним из наиболее необходимых для растений микроэлементов является марганец. Значительная аккумуляция марганца (Mn) в верхних горизонтах почв связана с фиксацией этого элемента гумусовыми веществами [21]. На осушительных системах концентрации марганца снижаются, возможно, это связано с изменением рН среды, при известковании, которое создавало условия для мощного развития корневой системы растений, снижения кислотности почв и развития более благоприятных для растений агрофизических свойств. Некоторые исследователи предполагают, что накопление марганца в сельскохозяйственной почве можно рассматривать как фактор, способствующий закреплению опасных тяжелых элементов. Количество марганца в почве зависит от ряда условий (уровня увлажнения, типа растительности, типов и доз вносимых удобрений, реакции почвенной среды). Наиболее существенное влияние на подвижность элемента оказывает известкование [22].

Цинк. Цинк в тяжелых по гранулометрическому составу глинистых почвах становится практически недоступным, в значительной степени Zn закрепляется гидроксидами железа. Максимальное содержание цинка наблюдалось в 2013–2014 гг. – 95,5 мг/кг, на осушительных системах. Именно в это время отмечалось максимальное количество выпавших атмосферных осадков – более 900 мм, то есть примерно в 3,5 раза выше месячной нормы. Одной из возможных причин увеличения содержания цинка в почвах является его высвобождение из фосфатных и калийных

Таблица. Концентрации тяжелых металлов в лугово-глеевых почвах Среднеамурской низменности в 2009–2014 гг.

Table. Concentrations of heavy metals in the soils of the Middle Amur Lowland in 2009–2014

Название элемента/Item name	Полигоны отбора проб почв/Land sampling polygons	2009	2010	2011	2012	2013	2014
$Fe_{общ}$, мг/кг (mg/kg)	мелиорированные/reclaimed soil	3273,98	3276,07	3275,27	3263,25	3234,3	3278,71
	немелиорированные/not reclaimed soil	3484,11	3514,67	3544,52	3525,03	3536,97	3478,89
Mn^{2+} , мг/кг (mg/kg)	мелиорированные/reclaimed soil	90,61	88,67	90,65	91,36	88,44	85,46
	немелиорированные/not reclaimed soil	107,5	108,15	107,83	108,12	108,81	109,01
Zn^{2+} , мг/кг (mg/kg)	мелиорированные/reclaimed soil	6,7	6,61	6,53	6,48	10,12	9,21
	немелиорированные/not reclaimed soil	8,15	8,03	8,57	8,27	8,39	8,4
Pb^{2+} , мг/кг (mg/kg)	мелиорированные/reclaimed soil	2,01	2,07	2,08	2,01	5,71	5,85
	немелиорированные/not reclaimed soil	6,67	6,8	6,81	6,91	6,7	6,85
Cu^{2+} , мг/кг (mg/kg)	мелиорированные/reclaimed soil	1,9	1,89	1,91	1,92	3,78	3,76
	немелиорированные/not reclaimed soil	2,06	2,08	2,07	2,06	2,07	2,05
рН _{KCl} , ед. (units)	мелиорированные/reclaimed soil	5,40	5,14	5,21	5,40	6,40	6,50
	немелиорированные/not reclaimed soil	4,60	4,52	4,54	4,60	5,40	5,50
Гумус/Humus, %	мелиорированные/reclaimed soil	4,87	4,04	4,48	4,63	3,25	3,16
	немелиорированные/not reclaimed soil	3,64	3,52	3,37	3,26	3,46	3,38

удобрений вследствие изменения рН среды в период катастрофического наводнения. С гумусом этот элемент образует устойчивые соединения. Адсорбция цинка почвой зависит от рН. В щелочной среде цинк адсорбируется по механизму хемосорбции, а в кислой среде происходит катионо-обменное поглощение. При повышенной кислотности возрастает доля подвижного цинка [23]. Наиболее полно цинк адсорбируется оксидами железа. В наших исследованиях была установлена корреляционная зависимость ($r=0,7$) между содержанием подвижных форм цинка в пахотном горизонте и изменением величины рН среды для почв. Цинк достаточно надежно закрепляется в почвах тяжелого гранулометрического состава.

Свинец. Свинец в ландшафте преимущественно мигрирует в бикарбонатной форме, а также в органических комплексах. Естественное содержание свинца в почве наследуется от материнских пород. Однако из-за загрязнения свинцом большинство почв, по-видимому, обогащено этим элементом, особенно их поверхностные почвенные горизонты – 0–20 см. В литературе имеется большое число данных о содержании свинца в почве, однако иногда трудно отделить данные, характеризующие немелиорированные уровни свинца в почвах, от данных, связанных с загрязнением поверхностного слоя почв. По данным наших исследований концентрация свинца в неосушенных почвах находится в пределах 2–3 мг/кг. Свинец легко адсорбируется глинистыми почвами, поэтому наибольшие значения в неосушенных почвах 6–9 мг/кг. В почвах, отобранных в районах осушительной мелиорации, прослеживается снижение концентраций свинца во всех точках, однако в период промывного типа водного режима 2013–2014 гг. наблюдалась некоторая подвижность свинца вследствие выпадения большого количества атмосферных осадков, была установлена корреляционная зависимость ($r=0,62$) между содержанием свинца в пахотном горизонте и изменением величины рН среды, а также ($r=0,7$) объемом выпавших атмосферных осадков для почв, подверженных влиянию мелиорирования.

Медь. Медь представляет собой один из наименее подвижных в почве микроэлементов. Ее подвижность в почве и доступность растениям во многом зависят от процессов адсорбции и комплексообразования. Основными источниками поступления соединений меди в почвы является использование фунгицидов (хлорокись меди, медный купорос, бордоская жидкость и др.) в сельскохозяйственном производстве [24]. На осушительных системах концентрации меди по сравнению с неосушенными снижаются. Наибольшие концентрации меди обнаружены в период катастрофического наводнения 2013 г. В почвах, подверженных влиянию мелиорирования, была установлена прямая корреляционная зависимость ($r=0,73$) между содержанием меди в пахотном горизонте и изменением величины рН среды.

Поскольку сельскохозяйственные осушительные мелиорации предназначены для улучшения водного режима на заболоченных и переувлажненных землях, нами также рассмотрено влияние мелиорации на одни из основных характеристик почвенного плодородия – это гумус и кислотность почв [25]. Содержание гумуса является одним из основных показателей плодородия почв. Нами показано, что поверхностные плодородные горизонты немелиорированных почв (0–20 см) содержали больше гумуса, чем мелиорированные. Осушительная мелиорация создает условия для достаточного, а в некоторые годы и избыточного увлажнения, что влияет на относительно высокую скорость гумификации и трансформации почвенного органического вещества. Всё это стало причиной формирования почв с относительно мощным гумусово-аккумулятивным горизонтом, а также повышенного содержания органического вещества почве. Повышение содержания гумуса в почве приводит к ускорению миграции железа, так как оно находилось в почвах в виде аморфных окисных и закисных, а также железо-гумусовых соединений. Аналогичные процессы происходили с подвижными соединениями марганца, потому что его миграция в верхних горизонтах почв также была связана с абсорбцией с гумусовыми веществами. Для меди и свинца существует обратная зависимость: их количество снижается при увеличении гумуса, поэтому прослеживается небольшое уменьшение концентраций данных ТМ. Таким образом, гумус может препятствовать миграции некоторых ТМ вследствие высоких сорбционных свойств, поскольку образует с ними сложные и комплексные соединения, менее доступные растениям [26].

Еще одним из факторов, обуславливающих подвижность ТМ, является кислотность почв [27]. В неосушенных почвах кислотность относится к категории кислые и слабокислые, при мелиорировании и прокладке дренажа изменяются кислородные условия почв, а также при сельскохозяйственном использовании этих земель вносятся различные удобрения и раскислители, приводящие к изменению кислотности почв в более нейтральную сторону. При этом при наводнении, приводящем к полному затоплению, происходит смыв с мелиорированных почв внесенных удобрений и, как следствие, снижение значений рН. Во всех исследуемых образцах этот показатель в немелиорированных почвах меняется в интервале 4,1–4,9 ед. рН, на осушительных системах – от 4,5 до 6,4 ед. рН. Известно, что по отношению к кислотности цинк и медь являются подвижными элементами. Эти элементы быстро теряют подвижность в почве в результате химических реакций, сопровождающихся образованием труднорастворимых фосфатов, сульфатов, карбонатов, хроматов, молибдатов, гидрооксидов, а также за счет поглощения органическими и минеральными коллоидами [28].

Суммарные коэффициенты загрязнения почв также зависели от объема атмосферных осадков (рис. 3).

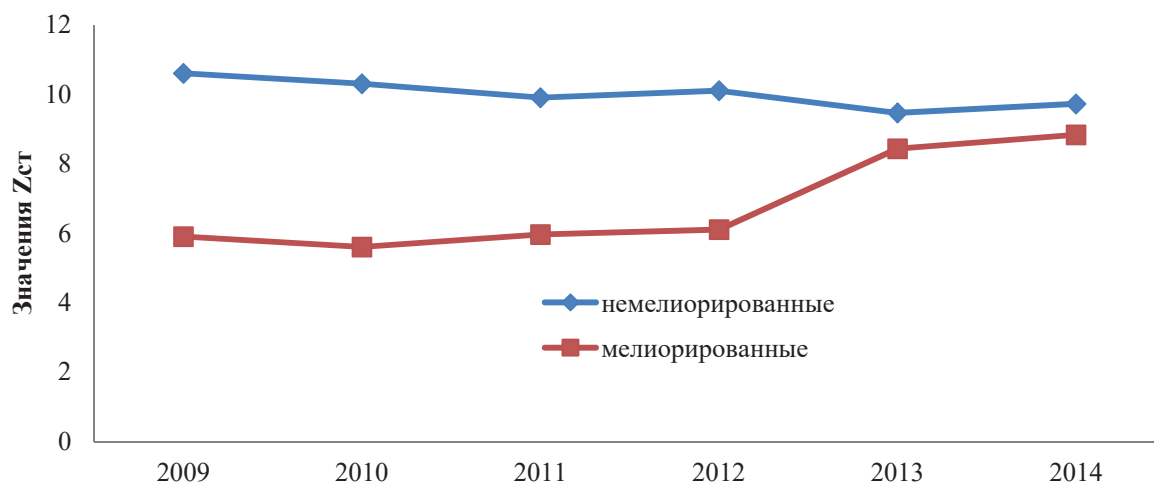


Рис. 3. Суммарные коэффициенты загрязнения неосушенных и осушенных лугово-глинистых почв

Fig. 3. Total contamination factors for not reclaimed and drained meadow-clay soils

Как видно из данных, приведенных на рис. 3, осушительная мелиорация положительно влияет на состояние почв, приводит к снижению концентраций ТМ. По величине $Z_{ст}$ немелиорированные почвы имеют наибольшие коэффициенты, при мелиорировании (осушительная система) эти значения снижаются, при этом по шкале $Z_{ст}$ все исследуемые образцы почв относятся ко второй категории качества – «среднее». Катастрофическое выпадение осадков в 2013–2014 гг. и последующее за ним затопление должно было привести к увеличению смыва ТМ из почв. Однако прослеживается накопление ТМ в почвах, которое может быть связано с разнообразными вторичными процессами в них, например, с изменением подвижности комплексов металлов, вертикальным переносом из нижних горизонтов и т. д. В итоге значения $Z_{ст}$ в мелиорированных почвах увеличились примерно в 1,5 раза (рис. 3) – однако категория качества почв осталась на прежнем уровне.

Заключение

В ходе работы был установлено, что осушительная сельскохозяйственная мелиорация положительно влияет на состояние почв, приводит к снижению концентраций ТМ. По величине суммарного коэффициента загрязнения почв ($Z_{ст}$) не-

мелиорированные почвы имеют наибольшие коэффициенты, при мелиорировании (осушительная система) эти значения снижаются, при этом по шкале $Z_{ст}$ все исследуемые образцы почв относятся ко второй категории качества – «среднее». Под влиянием осушения происходит изменение кислотности почв в нейтральную сторону и увеличение гумуса почв, что может привести к переходу некоторых ТМ из легкорастворимых в труднорастворимые формы. В период наводнения (2013–2014 гг.) в мелиорированных почвах прослеживается увеличение концентраций цинка, свинца и меди, данные элементы входят в состав некоторых ядохимикатов и пестицидов. Затопление привело к изменению содержания тяжелых металлов вследствие механического стока, уменьшению содержания гумуса и изменения кислотности почв.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что осушенные почвы содержат меньшие концентрации тяжелых металлов, которые могут мигрировать с системе почва–растение–человек, и с этой точки зрения их лучше использовать в сельскохозяйственном севообороте, чем не мелиорированные почвы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-32-01100-ОГН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конарбаева Г.А., Якименко В.Н. Эколого-агрохимическая оценка содержания тяжелых металлов в почве и растениях агроэкозонах // Проблемы агрохимии и экологии. – 2017. – № 1. – С. 16–21.
2. Zubarev V. A., Kogan R. M. Ecological Conditions of Watercourses in the Middle Amur Lowland in the Areas of Drainage Reclamation. Water Resources. – 2017. – V. 44. – № 7. – P. 940–951. URL: <http://doi.org/10.1134/S0097807817070144> (дата обращения 25.01.2019).
3. Зубарев В.А. Территориальное изменение содержания биогенных элементов в почвах Среднеамурской низменности (1976–1991 гг.) // Региональные проблемы. – 2014. – Т. 17. – № 1. – С. 54–57.
4. Зубарев В.А. Агрохимическая оценка пахотных земель Еврейской автономной области за период 1963–1992 гг. // Региональные проблемы. – 2017. – Т. 20. – № 3. – С. 68–73.
5. Мищук С.Н. Российско-китайское сотрудничество в сельском хозяйстве Дальнего Востока России // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2016. – № 1. – С. 38–48. URL: <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2016-1-38-48> (дата обращения 25.01.2019).
6. Мищук С.Н., Комарова Т.М., Мошков А.В. Трансформация территориальной структуры хозяйства Еврейской автономной

- области в пореформенный период // Региональные проблемы. – 2017. – Т. 20. – № 2. – С. 57–64.
7. Бурдуковский М.Л., Голов В.И., Ковшик И.Г. Изменение агрохимических свойств основных пахотных почв юга Дальнего Востока при длительном сельскохозяйственном использовании // Почвоведение. – 2016. – № 10. – С. 1244–1250. DOI: 10.7868/S0032180X16100051
8. Фетисов Д.М., Климина Е.М. Антропогенная трансформация геосистем Среднеамурской низменности: ретроспективный анализ // Региональные проблемы. – 2015. – Т. 18. – № 4. – С. 60–65.
9. Аношкин А.В. Развитие пойменно-русловых комплексов рек территории Еврейской автономной области в условиях экстремальных паводков и повышенной водности // Региональные проблемы. – 2015. – Т. 18. – № 1. – С. 35–42.
10. Росликова В.И. Почвы Средне-Амурской низменности и их особенности агрогенных трансформаций // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2009. – № 2 (13). – С. 95–102.
11. ГОСТ 28168–89. Почвы. Отбор проб. – М.: Стандартинформ. 2008. – 7 с.
12. Матюшкина Л.А. Проблемы и принципы эколого-агрохимической оценки состояния почв равнинного Приамурья // Современные проблемы регионального развития: Материалы IV Междунар. конф. – Биробиджан, 9–12 октября 2012 г. – Биробиджан: ИКАРП ДВО РАН, ДВГСА, 2012. – С. 29–30.
13. Определение химических форм микроэлементов в биологических объектах / Н.В. Иваненко, Н.Д. Соловьев, А.А. Иваненко, Л.Н. Москвин // Аналитика и контроль. – 2012. – Т. 6. – № 2. – С. 108–133.
14. Захарченко А.В., Алексеев В.И., Ипатова Д.В. Иерархическая концепция неоднородности почв и планирование масштаба исследования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 4. – С. 149–163.
15. Evaluating Soil Quality Indices in an Agricultural Region of Jiangsu Province / Y. Qi, J.L. Darilek, B. Huang, Y. Zhao, W. Sun, Z. Gu // Geoderma. – 2009. – V. 149. – Iss. 3–4. – P. 325–334. URL: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.12.015> (дата обращения: 25.01.2019).
16. ГОСТ 26423–85. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости. pH и плотного остатка водной вытяжки. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 7 с.
17. Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (A Guest Editorial) / D.L. Karlen, M.J. Mausbach, J.W. Doran, R.G. Cline, R.F. Harris, G.E. Schuman // Soil Science Society of America Journal, 1997. – V. 61. – P. 4–10.
18. Manceau A., Marcus M., Tamura N. Quantitative speciation of heavy metals in soils and sediments by synchrotron X-ray techniques // Applications of Synchrotron Radiation in Low-Temperature Geochemistry and Environmental Science. Reviews in Mineralogy and Geochemistry. Washington, DC. – 2002. – V. 49. – P. 341–428.
19. Влияние аэротехногенных на содержание тяжелых металлов в травянистых растениях Нижнего Дона / Т.М. Минкина, С.С. Манджиева, В.А. Чаплыгин, Г.В. Мотузова, М.В. Бурачевская, Т.В. Бауэр, С.Н. Сушкова, Д.Г. Невидомская // Почвоведение. – 2017. – № 6. – С. 759–768. DOI: 10.7868/80032180X17060077.
20. Brown G.E., Foster A.L., Ostergren J.D. Mineral surface and bio-availability of heavy metals: A molecular-scale perspective // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. – 1999. – V. 96. – P. 3388–3395.
21. Оценка потенциальной пожароопасности осушенных болот Томской области / А.А. Синюткина, Е.Н. Бурнашова, А.А. Беленко, Л.П. Гашкова, А.А. Малолетко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 12. – С. 45–53.
22. Soil Quality in a Mediterranean Area of Southern Italy as Related to Different Land Use Types / R. Marzaioli, R. D'Ascoli, R.A. De Pascale, F.A. Rutigliano // Applied Soil Ecology. – 2010. – V. 44. – P. 205–212. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2009.12.007> (дата обращения: 25.01.2019).
23. Cao X.D. Effects of redox potential and pH value on the release or rare elements from soil // Chemosphere. – 2001. – V. 44. – P. 655–661.
24. Soil Quality Characteristics of Kikuyu-Ryegrass Pastures in South Africa / P.A. Swanepoel, C.C. du Preez, P.R. Botha, H.A. Snyman, J. Habig // Geoderma. – 2014. – V. 232. – P. 589–599. URL: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.06.018> (дата обращения: 25.01.2019).
25. A Practical Approach for Deriving All-Weather Soil Moisture Content Using Combined Satellite and Meteorological Data / P. Leng, Z.L. Li, S.B. Duan, M.F. Gao, H.Y. Huo // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2017. – V. 131. – P. 40–51. URL: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.07.013> (дата обращения: 25.01.2019).
26. Mondal M.K., Bhuiyan S.I., Franco D.T. Soil Salinity Reduction and Prediction of Salt Dynamics in the Coastal Ridelands of Bangladesh // Agricultural Water Management. – 2001. – V. 47. – P. 9–23.
27. Adewuyi G.O., Osobamiro M.T. Chemical speciation and potential mobility of some toxic metals in tropical agricultural soil // Research Journal of Environmental Toxicology. – 2016. – V. 10. – P. 159–165. DOI: 10.3923/rjet.2016.159.165
28. Shaheen S.M., Rinklebe J., Tsadilas C.D. Fractionation and mobilization of toxic elements in floodplain soils from Egypt, Germany, and Greece: a comparison study // Eurasian Soil Science. – 2015. – V. 48. – № 12. – P. 1317–1328. DOI: 10.1134/S1064229315120121.

Поступила 30.01.2019 г.

Информация об авторах

Зубарев В.А., научный сотрудник Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Института комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН.

Мищук С.Н., кандидат экономических наук, ведущий научный сотрудник Института комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН.

UDK 631.4 (571.621)

CHANGES IN CONCENTRATION OF HEAVY METALS IN SOILS OF MIDDLE AMUR LOWLAND UNDER CONDITIONS OF LONG PERIOD OF AGRICULTURAL USE

Vitaliy A. Zubarev¹,
Zubarev_1986@mail.ru

Svetlana N. Mishchuk¹,
svetamic79@mail.ru

¹ Institute for Complex Analysis of Regional Problems, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, 4, Sholom-Aleikhem street, Birobidzhan, 679016, Russia.

Relevance of the research is caused by the need to assess the ecological state of the restored arable soils located in the border areas of the Middle Amur Lowland. The study was conducted on the example of the Leninsky district of the Jewish Autonomous Region. Mostly in this region, Chinese farmers grow soybeans. Large number of mineral fertilizers, plant growth promoters and plant protection chemicals are used for cultivation of soybeans, which leads to degradation of agricultural soils.

The aim of the research is to analyze the changes in concentrations of heavy metals in the soils of the Middle Amur Lowland during long-term agricultural use.

Object: non-ameliorated and ameliorated meadow-gley arable soils used in agricultural land turnover.

Methods: atomic absorption spectrometry method on the «Solaar 6M» spectrometer and calculation of total soil contamination coefficients.

Results. The study showed that the change in concentrations of heavy metals of soils of the Middle Amur Lowland during prolonged agricultural use could be influenced by atmospheric moisture of the summer-autumn period. It is shown that in reclaimed soils by the end of the agricultural season there is a decrease in the content of heavy metals and in the total pollution coefficient, while in untreated soils – the opposite process – the increase in pollution. The authors have studied the influence of the extent of flooding of the floodplains on humus content and soil acidity, which determine the migration, and the formation of concentration series of heavy metals. In dry years, metal concentrations remained virtually unchanged, during the flood period (2013–2014), with heavy precipitation the processes leading to increase in concentrations of zinc, lead and copper prevailed. Flooding of soils changed the content of heavy metals due to mechanical runoff, decrease of humus content and change of soil acidity.

Key words:

Middle Amur Lowland, meadow-gley soils, heavy metals, border area, drainage melioration.

The reported study was funded by RFBR, project number 17–32–01100-PHS.

REFERENCES

- Konarbaeva G.A., Yakimenko V.N. Ecological and agrochemical assessment of the content of heavy metals in soil and plants of agrocenosis. *Problemy agrokhimii i ekologii*, 2017, vol. 1. P. 16–21. In Rus.
- Zubarev V.A., Kogan R.M. Ecological Conditions of Watercourses in the Middle Amur Lowland in the Areas of Drainage Reclamation. *Water Resources*, 2017, vol. 44, no. 7, pp. 940–951. Available at: <http://doi.org/10.1134/S0097807817070144> (accessed 25 January 2019).
- Zubarev V.A. Spatial change of nutrient content in the soils of Middle Amur Lowland (1976–1991). *Regional problems*, 2014, vol. 17, no. 1, pp. 54–57. In Rus.
- Zubarev V.A. Agrochemical estimation of arable lands in Jewish autonomous region for the period of 1963–1992. *Regional problems*, 2017, vol. 20, no. 3, pp. 68–73. In Rus.
- Mishchuk S.N. Russian-Chinese agricultural cooperation in the Russian Far East. *Regional Research of Russia*, 2016, vol. 6, no. 1, pp. 59–69. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.1134/S2079970516010093> (accessed 25 January 2019).
- Mishchuk S.N., Komarova T.M., Moshkov A.V. Transformation of the territorial structure of economy of Jewish Autonomous Region in the post-reform period. *Regional problems*, 2017, vol. 20, no. 2, pp. 57–64. In Rus.
- Burdukovskii M.L., Golov V.I., Kovshik I.G. Changes in the agrochemical properties of major arable soils in the south of the Far East of Russia under the impact of their long-term agricultural use. *Eurasian Soil Science*, 2016, vol. 49, no. 10, pp. 1174–1179. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.1134/S1064229316100057> (accessed 25 January 2019).
- Fetisov D.M., Klimina E.M. Anthropogenic changes of geosystems on the Middle Amur Lowland: retrospective analysis. *Regional problems*, 2015, vol. 18, no. 4, pp. 60–65. In Rus.
- Anoshkin A.V. Development of floodplain-channel river complexes in Jewish autonomous region during extreme floods and high water. *Regional problems*, 2015, vol. 18, no. 1, pp. 35–42. In Rus.
- Roslikova V.I. Soils of the Middle-Amur Lowland and features of their agrogenic transformations. *Bulletin of Pacific national university*, 2009, vol. 2, no. 13, pp. 95–102. In Rus.
- GOST 28168–89. *Pochvy. Otbor prob* [State standard 28168–89. Soil. Sample selection]. Moscow, Standartinform Publ., 2008. 7 p.
- Matyushkina L.A. Problemy i printsipy ekologo-agrokhimicheskoy otsenki sostoyaniya pochv ravninnogo Priamurya [Problems and principles of ecological and agrochemical soil assessment of the plain Priamurye]. *Materialy IV mezhdunarodnoy konferentsii. Sovremennye problemy regionalnogo razvitiya* [Modern problems of regional development. Proc. of IV International Conference]. Birobidzhan, 9–12 October 2012. Birobidzhan, IKARP DVO RAN, DVGSGA Publ., 2012. pp. 29–30.
- Ivanenko N.V., Solovov N.D., Ivanenko A.A., Moskvina L.N. Trace element speciation analysis of biological media. *Analytics and Control*, 2012, vol. 6, no. 2, pp. 108–133. In Rus.
- Zakharchenko A.V., Alekseev V.I., Ipatova D.V. Hierarchical concept of soil heterogeneity and planning the scale of investiga-

- tions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 4, pp. 149–163. In Rus.
15. Qi Y., Darilek J.L., Huang B., Zhao Y., Sun W., Gu Z. Evaluating Soil Quality Indices in an Agricultural Region of Jiangsu Province. *Geoderma*, 2009, vol. 149, no. 3–4, pp. 325–334. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.12.015> (accessed 25 January 2019).
16. GOST 26423–85. *Pochvy. Metody opredeleniya udelnoy elektricheskoy provodimosti, pH i plotnogo ostatka vodnoy vytyazhki* [Soils. Methods for determining the electrical conductivity, pH and the solid residue of the aqueous extract]. Moscow, Izdatelstvo Standartov Publ., 1985. 7 p.
17. Karlen D.L., Mausbach M.J., Doran J.W., Cline R.G., Harris R.F., Schuman G.E. Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (A Guest Editorial). *Soil Science Society of America Journal*, 1997, vol. 61, pp. 4–10.
18. Manceau A., Marcus M., Tamura N. Quantitative speciation of heavy metals in soils and sediments by synchrotron X-ray techniques. *Applications of Synchrotron Radiation in Low-Temperature Geochemistry and Environmental Science. Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. Washington, DC, 2002, vol. 49, pp. 341–428. Available at: <https://doi.org/10.2138/gsrmg.49.1.341> (accessed 25 January 2019).
19. Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Chaplygin V.A., Motuzova G.V., Burachevskaya M.V., Bauehr T.V., Sushkova S.N., Nevidomskaya D.G. Effect of aerotechnogenic emissions on the content of heavy metals in herbaceous plants of the Lower Don region. *Pochvovedenie. Eurasian Soil Science*, 2017, vol. 50, no. 6, pp. 746–755. DOI: 10.1134/S1064229317060072. In Rus.
20. Brown G.E., Foster A.L., Ostergren J.D. Mineral surface and bioavailability of heavy metals: A molecular-scale perspective. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1999, vol. 96, pp. 3388–3395. DOI: 10.1073/pnas.96.7.3388
21. Sinyutkina A.A., Burnashova E.N., Belenko A.A., Gashkova L.P., Maloletko A.A. Assessment of potential fire risk of Tomsk region mires. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 12, pp. 45–53. In Rus.
22. Marzaioli R., D'Ascoli R., De Pascale R.A., Rutigliano F.A. Soil Quality in a Mediterranean Area of Southern Italy as Related to Different Land Use Types. *Applied Soil Ecology*, 2010, vol. 44, pp. 205–212. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2009.12.007> (accessed 25 January 2019).
23. Cao X.D. Effects of redox potential and pH value on the release or rare elements from soil. *Chemosphere*, 2001, vol. 44, pp. 655–661.
24. Swanepoel P.A., Du Preez C.C., Botha P.R., Snyman H.A., Habig J. Soil Quality Characteristics of Kikuyu-Ryegrass Pastures in South Africa. *Geoderma*, 2014, vol. 232, pp. 589–599. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.06.018> (accessed 25 January 2019).
25. Leng P., Li Z.L., Duan S.B., Gao M.F., Huo H.Y. A Practical Approach for Deriving All-Weather Soil Moisture Content Using Combined Satellite and Meteorological Data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, vol. 131, pp. 40–51. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.07.013> (accessed 25 January 2019).
26. Mondal M.K., Bhuiyan S.I., Franco D.T. Soil Salinity Reduction and Prediction of Salt Dynamics in the Coastal Rangelands of Bangladesh. *Agricultural Water Management*, 2001, vol. 47, no. 1, pp. 9–23. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(00\)00098-6](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(00)00098-6) (accessed 25 January 2019).
27. Adewuyi G.O., Osobamiro M.T. Chemical speciation and potential mobility of some toxic metals in tropical agricultural soil. *Research Journal of Environmental Toxicology*, 2016, vol. 10, pp. 159–165. DOI: 10.3923/rjet.2016.159.165
28. Shaheen S.M., Rinklebe J., Tsadilas C.D. Fractionation and mobilization of toxic elements in floodplain soils from Egypt, Germany, and Greece: a comparison study. *Eurasian Soil Science*, 2015, vol. 48, no. 12, pp. 1317–1328. DOI: 10.1134/S1064229315120121.

Received: 30 January 2019.

Information about the authors

Vitaliy A. Zubarev, researcher, Institute for Complex Analysis of Regional Problems, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences.

Svetlana N. Mishchuk, Cand. Sc., leading researcher, Institute for Complex Analysis of Regional Problems, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences.

УДК 550.3:536.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В СЛОИСТОМ ПЛАСТЕ

Исламов Денис Фавилович¹,

islamovden@rambler.ru

Садретдинов Александр Александрович¹,

aleex.aa@gmail.com.

¹ Башкирский государственный университет,
Россия, 450074, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32.

Актуальность. В последнее время усиливается интерес к количественной интерпретации температурных измерений в скважине. Целями количественной интерпретации становятся индивидуальные дебиты жидкости из отдельных пластов, пластовое давление в отдельных пластах, дебит заколонного перетока, гидродинамические параметры пластов, характер изменения проницаемости пласта в прискважинной зоне. В качестве исходных данных для переходных процессов используются нестационарные поля давления и температуры в скважине, а для квазистационарных условий – распределение температуры по глубине. Особый интерес представляет определение дебитов притока из отдельных пластов и параметров прилегающей зоны пластов.

Цель: оценить, насколько допущение об однородности пласта влияет на наблюдаемую температуру для некоторых сценариев работы скважины.

Методы. Разработана и исследована численная модель, дискретизация осуществлена методом контрольных объемов, используется метод переменных направлений. Корректность численного решения проверена путем сравнения с известными аналитическими решениями.

Результаты. Исследована задача о нестационарном температурном поле в слоистом пласте. Среднее отклонение решения для случая закачки может достигать 20 % и более, величина зависит от толщины (общего количества) пропластков. Среднее отклонение решения для случая закачки достигает максимум через 6–10 часов и далее медленно уменьшается со временем. Для случая добычи величина отклонения может достигать 100 %, максимум достигается в начале восстановления. Далее отклонение снижается, достигая через 24 часа величины порядка 40 % от первоначального отклонения. Задаваясь допустимой погрешностью решения в 10 % при моделировании восстановления в слоистых коллекторах, необходимо учитывать слоистость при ее величинах выше 15–25 % в зависимости от сценария работы скважины.

Ключевые слова:

Геофизика, термометрия, скважина, пласт, проницаемость, численное решение.

Введение

Как показывает практика геофизических исследований скважин (ГИС) и исследований керна, не бывает совершенно однородных пластов-коллекторов [1–3]. Существует прямая зависимость влияния геологической неоднородности на продуктивность и конечную величину отдачи залежи. Поэтому развитие методов изучения геологической неоднородности горных пород относительно их фильтрационно-емкостных свойств и ее учет при подсчете запасов и разработке залежей остаются весьма актуальными направлениями.

Одним из перспективных и не до конца изученных методов изучения пластов является термометрия [4–10]. Потенциальным преимуществом использования температурных данных является значительно меньшая скорость и глубина распространения температурных возмущений, что позволяет получить информацию о свойствах внутрипластового пространства.

В задачах количественной интерпретации результатов ГИС обычно считают пласт однородным, хотя на самом деле он может быть существенно слоистым [11–19]. Цель данной работы – оценить, насколько допущение об однородности пласта влияет на наблюдаемую температуру для некоторых сценариев работы скважины.

Данная работа построена на изучении закономерностей пространственно-временного распределения температурного поля в слоистом пласте на основе численного моделирования однофазной фильтрации жидкости в пористой среде с учетом конвективного и кондуктивного теплопереноса, баротермического эффекта и теплообмена с окружающими пласт непроницаемыми горными породами.

Разработанная модель позволяет моделировать случаи закачки, отбора и восстановления температуры в остановленных скважинах. Изменение температуры после остановки происходит только за счет одномерного вертикального теплопереноса за счет теплопроводности среды. Температурные исследования в остановленных скважинах активно используются на практике с целью определения интервалов поглощения и заколонных движений жидкости.

Математическая модель

Изменение температуры в пласте описывается уравнением (1) [4, 14]:

$$C_{res}(z) \frac{\partial T}{\partial t} + C_f(z) v(r, z) \frac{\partial T}{\partial r} = \\ = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda(r, z) r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(r, z) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \Phi(r, z), \quad (1)$$

где $\Phi(r, z)$ – источниковое слагаемое (2).

$$\Phi(r, z) = -C_f(z)v(r, z)\varepsilon \frac{\partial p}{\partial r} + \varphi C_f(z)\eta \frac{\partial p}{\partial t}. \quad (2)$$

Здесь C_{res} , C_f – объемные теплоемкости пласта и флюида, Дж/(м³·К); T – температура, К; r – радиальная координата, расстояние от оси скважины, м; z – вертикальная координата, м; t – время, с; v – скорость фильтрации флюида (по линейному закону Дарси), м/с; λ – теплопроводность, Вт/(м·К); ε , η – коэффициент Джоуля–Томсона и адиабатический коэффициент для флюида, К/Па; φ – пористость, д. ед.; p – давление в пласте, Па.

Граничное условие на стенке скважины (т. е. при $r=r_w$) описывается системой (3).

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_w} = 0, & v|_{r=r_w} \leq 0; \\ T|_{r=r_w} = T_{inj}, & v|_{r=r_w} > 0. \end{cases} \quad (3)$$

Поле давления по сравнению с полем температуры устанавливается мгновенно, как в жестком пласте с бесконечной пьезопроводностью, и описывается формулой (4) [20]:

$$p(r, z) = p_w(t) + \frac{Q(z)}{2\pi\sigma(z)} \ln\left(\frac{r}{r_w}\right), \quad (4)$$

где p_w – давление в скважине, Па; Q – дебит пропластка, м³/сут; σ – гидропроводность, м³/(Па·с).

Задача (1)–(3) решалась численно, методом прогонки. Дискретизация уравнений осуществлена методом контрольного объема. Корректность численного решения проверена путем сравнения с известными аналитическими решениями [14]. Для проверки корректности численного расчета радиальной теплопроводности рассматривается задача об остывании нагретого цилиндра в бесконечной среде с постоянной температуропроводностью [21]. Для проверки корректности численного расчета вертикальной теплопроводности использовано известное решение задачи об остывании бесконечной нагретой плиты [21]. Корректность расчета изменения температуры за счет баротермического эффекта проверена на известном аналитическом решении Э.Б. Чекалюка задачи о температуре пласта при фильтрации жидкости в стационарном поле давления [4]. Результаты численного моделирования и расчета по аналитической модели Э.Б. Чекалюка отличаются не более чем на 0,1 %.

Разработанная математическая модель позволяет моделировать температурное поле в пласте с любой неоднородностью. Но для исследования и для того, чтобы доказать, что учет неоднородности важен, рассматривается частный случай неоднородности, представленной чередованием проницаемых и непроницаемых пропластков.

В рамках исследования расчеты осуществлялись для двух конфигураций пласта. Пласт толщиной 10 м разделен на пропластки по следующему принципу (рис. 1, 2):

- 1) соотношение проницаемых и непроницаемых пропластков 5:5 (10 пропластков: 5 проницаемых и 5 непроницаемых);



Рис. 1. Моделируемый пласт 5:5 (Белым – проницаемые пропластки, Серым – непроницаемые пропластки)

Fig. 1. Simulated reservoir 5:5 (White – permeable layers, Gray – impermeable layers)

- 2) соотношение проницаемых и непроницаемых пропластков 10:10 (20 пропластков: 10 проницаемых и 10 непроницаемых).

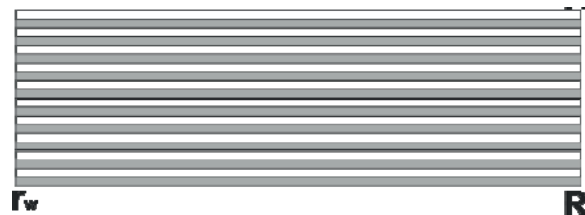


Рис. 2. Моделируемый пласт 10:10 (Белым – проницаемые пропластки, Серым – непроницаемые пропластки)

Fig. 2. Simulated reservoir 10:10 (White – permeable layers, Gray – impermeable layers)

Проницаемые и непроницаемые пропластки чередуются. Они считаются гидродинамически изолированными (т. е. перетоков между пропластками нет), но термически контактирующими.

Результаты моделирования

Для каждой конфигурации пласта смоделировано два случая восстановления профиля температуры после кратковременной работы скважины:

- 1) закачка (начальная температура пласта 20 °С, температура закачиваемой жидкости 10 °С);
- 2) добыча (отбор жидкости из пласта).

1. Закачка

Смоделирован случай восстановления профиля температуры после кратковременной закачки с постоянным расходом 100 м³/сут. Закачка длилась 5 часов. Сравнивались профили температуры через 20 часов после прекращения закачки.

Суммарная толщина непроницаемых пропластков варьируется от 1 до 40 % в общей толщине пласта. Проницаемости проницаемых пропластков 100 мД.

На рис. 3 представлен пример профилей температур для однородного пласта и для пласта 5:5 с долей непроницаемых пропластков 40 %. Как видно из рис. 3, температура напротив непроницаемых пропластков восстанавливается значительно быстрее, нежели напротив проницаемых. Данный факт подтверждается наличием положительных пиков температуры напротив непроницаемых пропластков.

На рис. 4 представлен пример профилей температур для однородного пласта и для пласта 10:10 с долей непроницаемых пропластков 40 %.

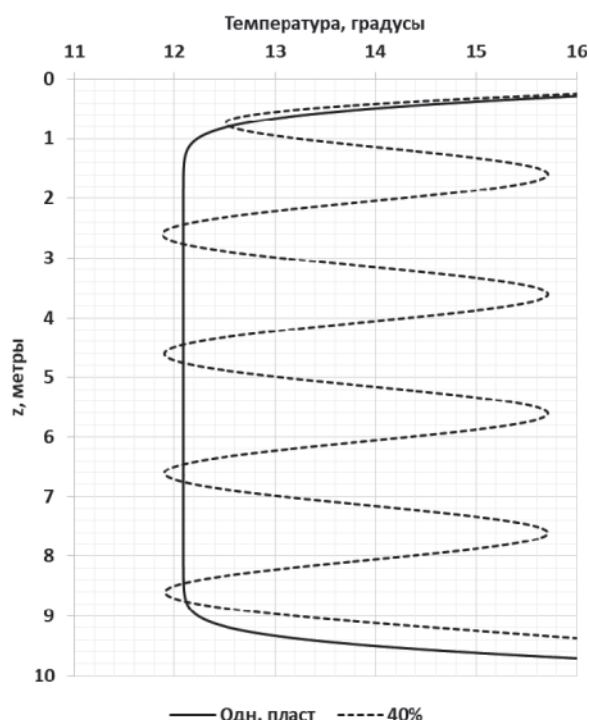


Рис. 3. Профили температур через 20 часов после прекращения закачки

Fig. 3. Temperature profiles in 20 hours after the injection stop

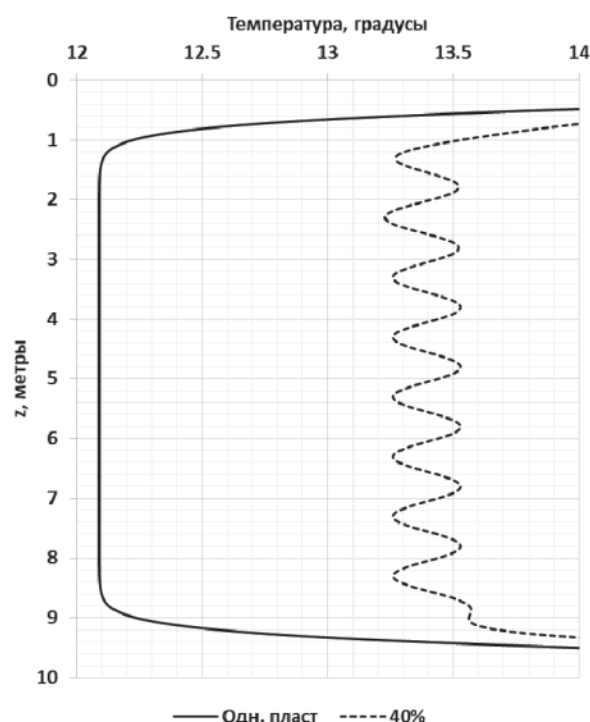


Рис. 4. Профили температур через 20 часов после прекращения закачки

Fig. 4. Temperature profiles in 20 hours after the injection stop

На рис. 5 представлена зависимость отклонения решения для неоднородного пласта от доли непроницаемых пропластков. Отклонение – это среднее значение отклонений результатов для однородного и неоднородного пласта. Формула для расчета (5).

$$\Delta = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{T_{\text{одн},i} - T_{\text{неодн},i}}{T_{\text{пл}} - T_{\text{зак}}} \cdot 100\% \right|}{n}, \quad (5)$$

где $T_{\text{одн},i}$ – температура на стенке однородного пласта; $T_{\text{неодн},i}$ – температура на стенке неоднородного

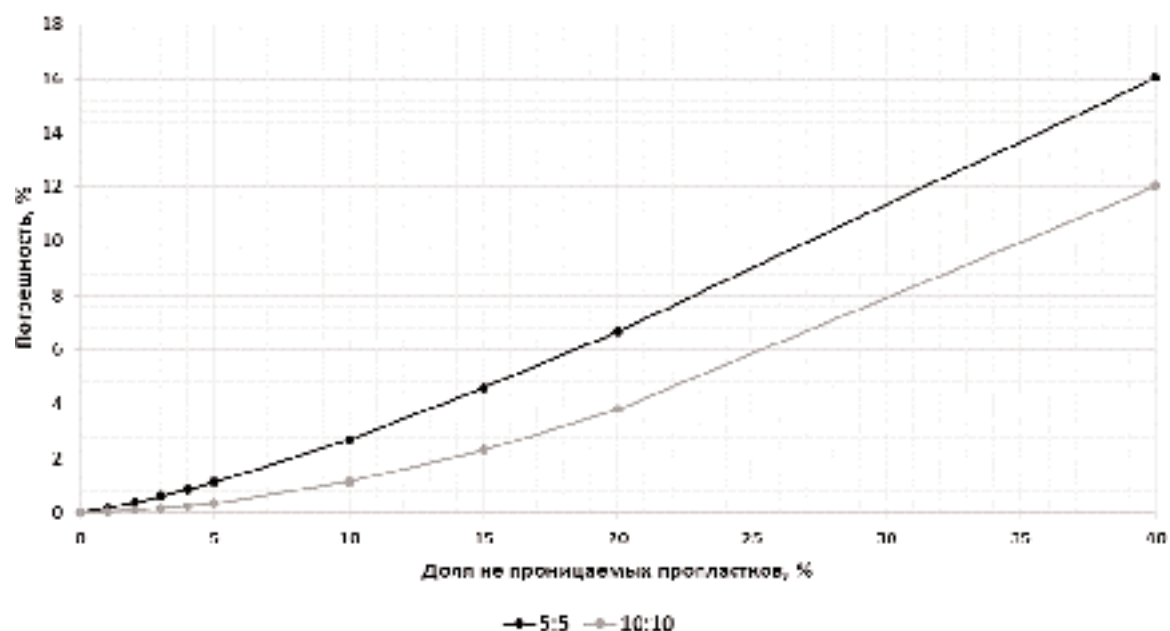


Рис. 5. Графики средних значений отклонений профилей температуры через 20 часов после прекращения закачки

Fig. 5. Graphs of the average deviations in the temperature profiles in 20 hours after the injection stop

пласта; $T_{пл}$ – начальная пластовая температура; $T_{зак}$ – температура закачиваемой в пласт жидкости; n – количество точек в температурном профиле; i – индекс точки в профиле.

Доля непроницаемых пропластков – процент содержания непроницаемых пропластков в общей толще пласта.

Из рис. 5 видно, что чем больше толщина непроницаемых пропластков, тем больше отклонение. Но оно уменьшается при увеличении общего количества пропластков. При доле непроницаемых пропластков до 5 % значения погрешностей для пластов 5:5 и 10:10 незначительно отличаются друг друга.

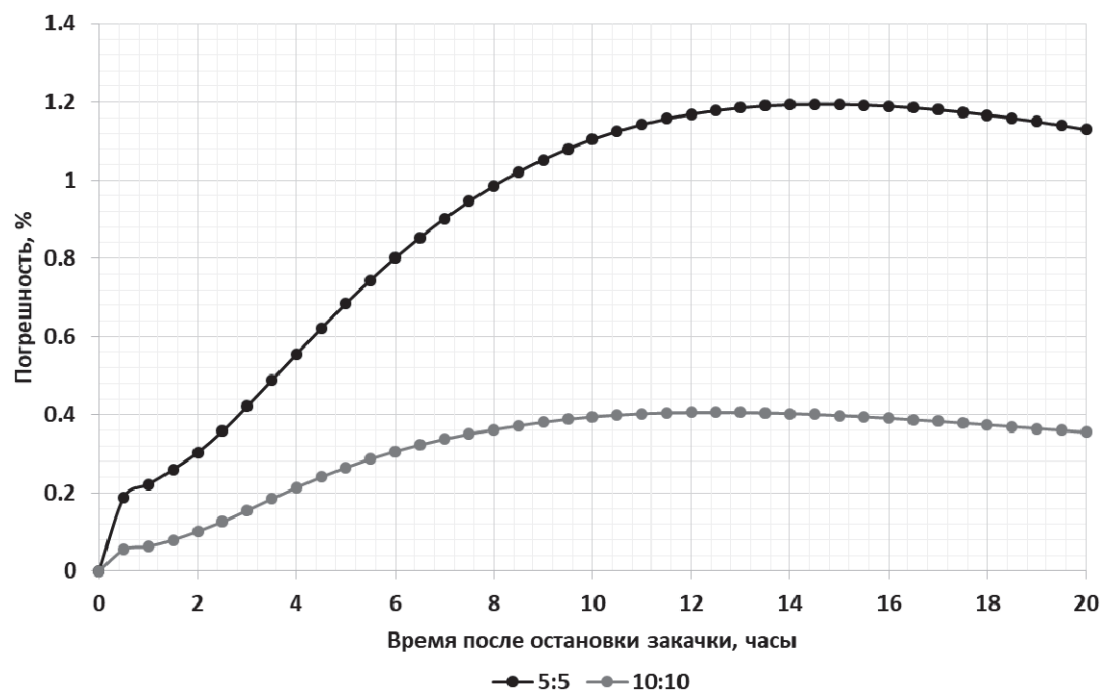


Рис. 6. Изменение отклонения в зависимости от времени для доли непроницаемых пропластков 5 %

Fig. 6. Change of deviation depending on the time for the proportion of impervious layers of 5 %

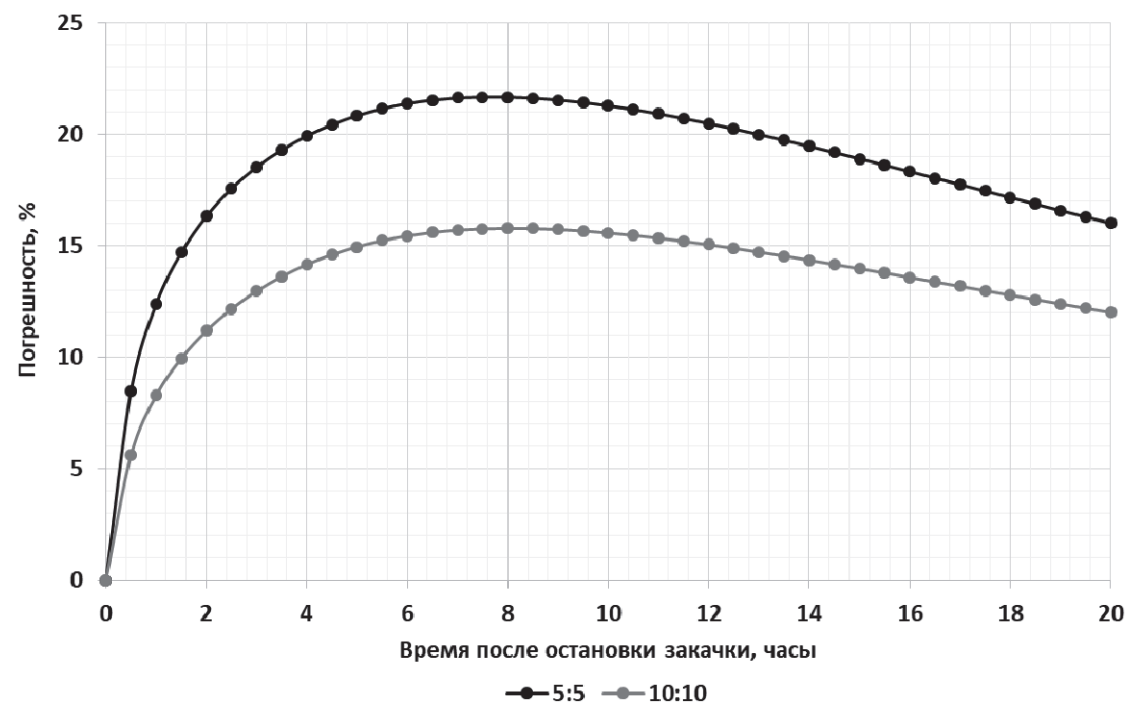


Рис. 7. Изменение отклонения в зависимости от времени для доли непроницаемых пропластков 40 %

Fig. 7. Change of deviation depending on the time for the proportion of impervious layers of 40 %

Еще можно заметить, что вставки непроницаемых пропластков с долей до 15 % приводят к отклонениям до 5 %.

Если построить графики изменения отклонений после прекращения закачки в зависимости от времени (рис. 6, 7), то видно, что отклонение растет до определенного момента времени, а после идет на спад.

2. Добыча

Смоделирован случай восстановления профиля температуры после кратковременного отбора жидкости из пласта при постоянной депрессии 50 атм. Время добычи 24 часа. Сравнивались профили температуры через 24 часа после прекращения отбора жидкости.

Проницаемости проницаемых пропластков 10 мД.

На рис. 8 представлен пример профилей температур для однородного пласта и для пласта 5:5 с долями непроницаемых пропластков 50 и 90 %. В данном случае температура напротив непроницаемых пропластков так же, как в случае закачки, восстанавливается быстрее, чем температура напротив проницаемых пропластков. Данный факт проявляется отрицательной аномалией температуры напротив непроницаемых участков. Также из рис. 8 видно, что чем больше доля непроницаемых пропластков, тем медленнее восстанавливается температура пласта.

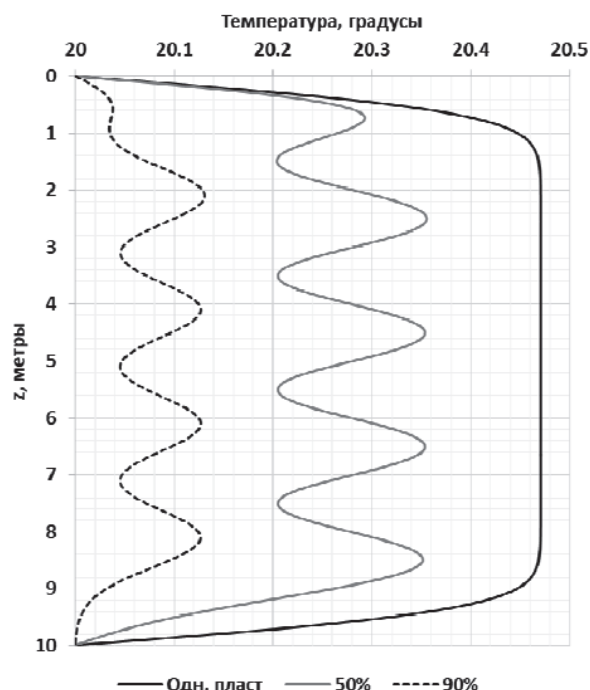


Рис. 8. Профили температур через 24 часа после прекращения отбора

Fig. 8. Temperature profiles in 24 hours after the production stop

На рис. 9 представлен пример профилей температур для однородного пласта и для пласта 10:10 с долями непроницаемых пропластков 50 и 90 %.

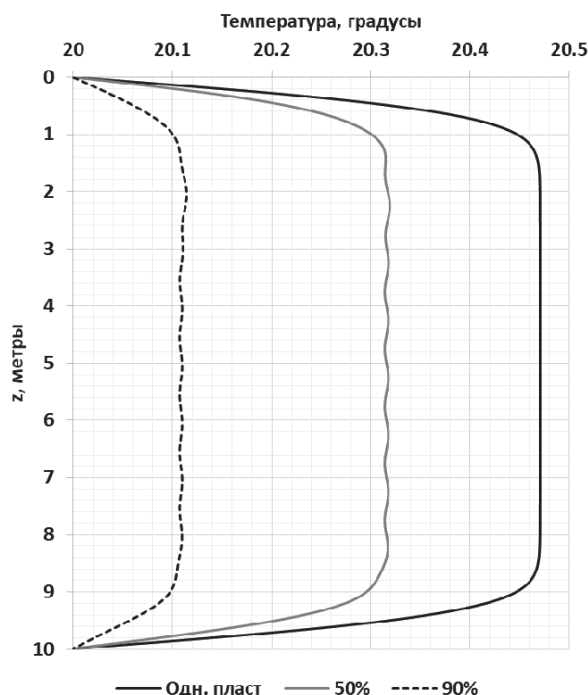


Рис. 9. Профили температур через 24 часа после прекращения отбора

Fig. 9. Temperature profiles in 24 hours after the production stop

На рис. 10 представлена зависимость отклонения от доли непроницаемых пропластков. Отклонения рассчитывались по формуле (6):

$$\Delta = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{T_{\text{одн},i} - T_{\text{неодн},i}}{(\varepsilon \Delta P)_{\text{одн}}} \cdot 100 \% \right|}{n}, \quad (6)$$

где $T_{\text{одн},i}$ – температура на стенке однородного пласта; $T_{\text{неодн},i}$ – температура на стенке неоднородного пласта; $(\varepsilon \Delta P)_{\text{одн}}$ – разогрев в момент остановки отбора для однородного пласта; n – количество точек в температурном профиле; i – индекс точки в профиле.

Из рис. 10 видно, что чем больше толщина непроницаемых пропластков, тем больше отклонение. Оно незначительно уменьшается при увеличении общего количества пропластков.

Если, аналогично случаю закачки, построить графики изменения погрешностей после прекращения отбора в зависимости от времени (рис. 11, 12), то видно, что погрешность падает со временем.

Выводы

1. Среднее отклонение решения для случая закачки может достигать 20 % и более, величина зависит от толщины (общего количества) пропластков.
2. Среднее отклонение решения для случая закачки достигает максимум через 6–10 часов и далее медленно уменьшается со временем.
3. Для случая добычи величина отклонения может достигать 100 %, максимум достигается в начале восстановления. Далее отклонение сни-

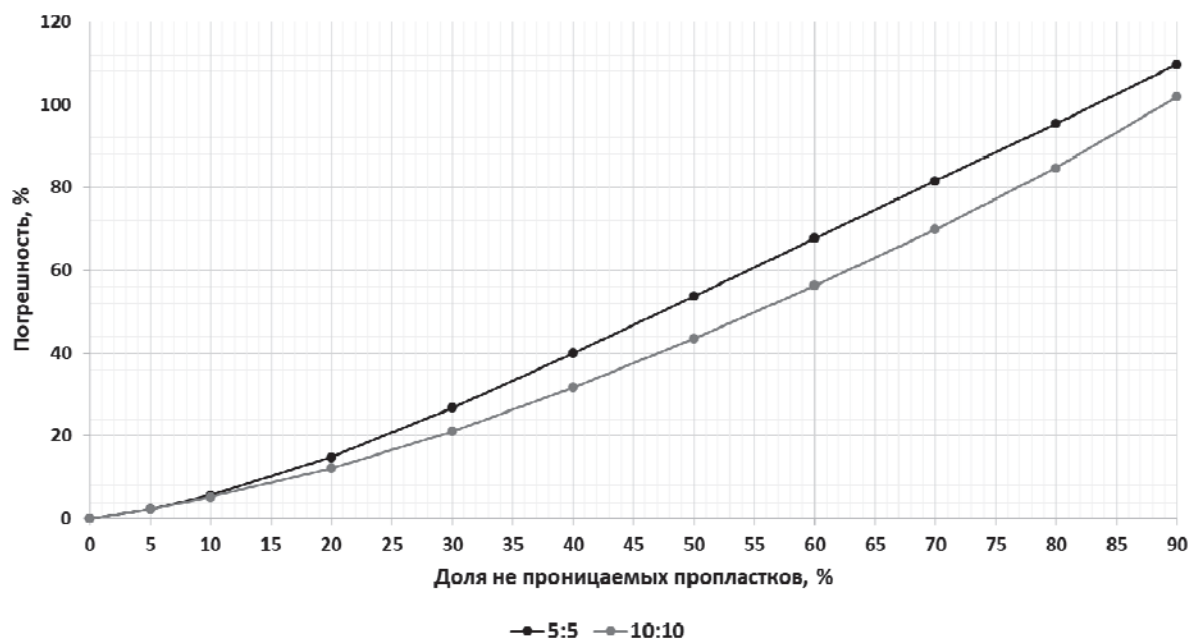


Рис. 10. Графики средних значений отклонений профилей температуры через 24 часов после прекращения отбора жидкости
Fig. 10. Graphs of the average deviations in the temperature profiles in 24 hours after the production stop

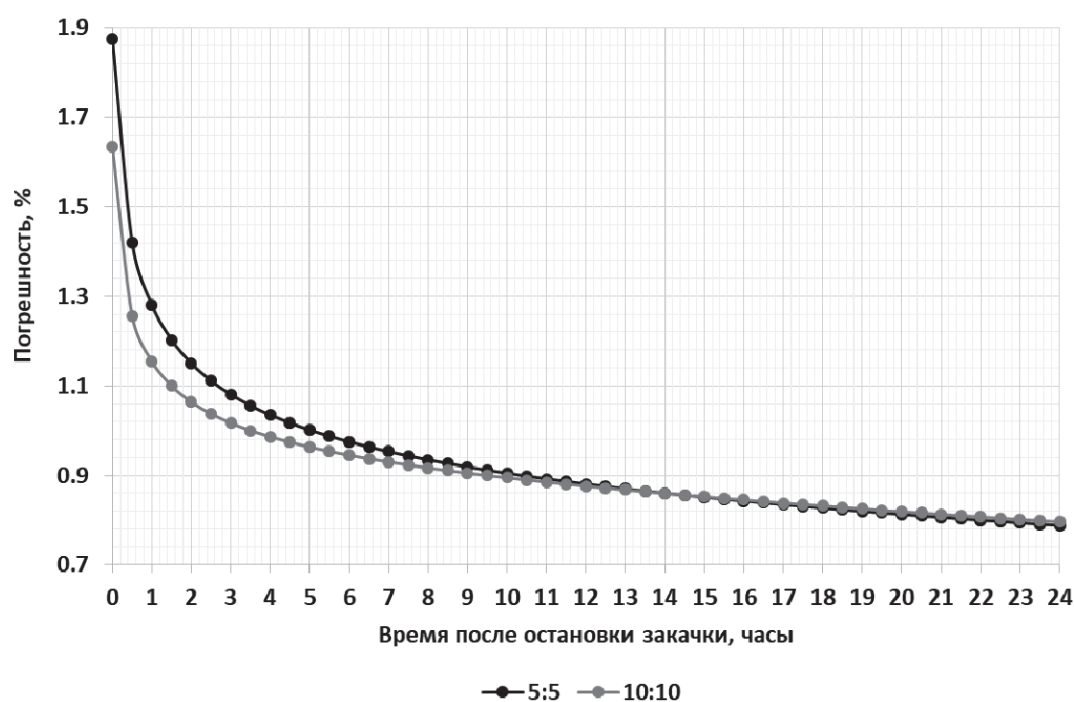


Рис. 11. Изменение погрешности в зависимости от времени для доли непроницаемых пропластков 5 %
Fig. 11. Change of deviation depending on the time for the proportion of impervious layers of 5 %

- жается, достигая через 24 часа величины порядка 40 % от первоначального отклонения.
4. Задаваясь допустимой погрешностью решения в 10 % при моделировании восстановления в слоистых коллекторах, необходимо учиты-

вать слоистость при ее величинах выше 15–25 % в зависимости от сценария работы скважины.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16–35–00275 мол_а, проект № 16–29–15130 офи_м).

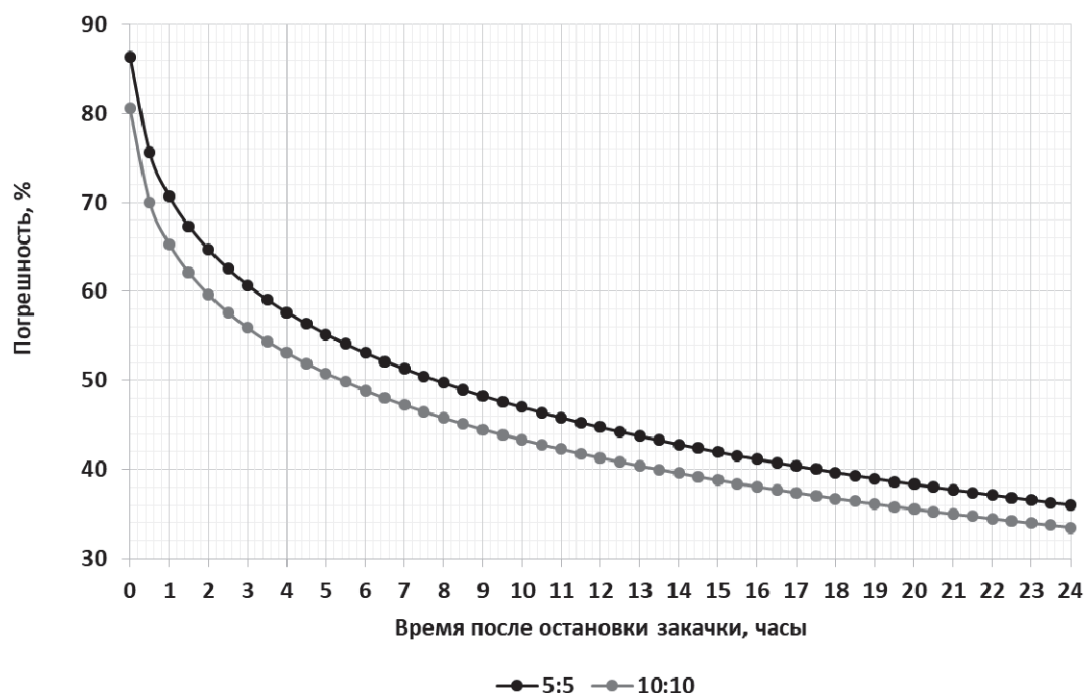


Рис. 12. Изменение погрешности в зависимости от времени для доли непроницаемых пропластков 90 %

Fig. 12. Change of deviation depending on the time for the proportion of impervious layers of 90 %

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Determining Multilayer Formation Properties from Transient Temperature and Pressure Measurements / W. Sui, D. Zhu, A.D. Hill, C.A. Ehlig-Economides // Paper SPE 116270. – Denver, Colorado, USA, 21–24 September 2008. – P. 387–404.
- Mao Y., Zeidouni M. Temperature Transient Analysis for Characterization of Multilayer Reservoirs with Crossflow // Paper SPE 185654. SPE Western Regional Meeting held in Bakersfield. – California, USA, 23 April 2017. – P. 114–134.
- Park H. Well Test Analysis of a multilayered reservoir with formation crossflow. PhD. – Stanford, 1989. 164 p.
- Чекалюк Э.Б. Термодинамика нефтяного пласта. – М.: Недра, 1965. – 238 с.
- Thermal Modeling for Characterization of Near Wellbore Zone and Zonal Allocation / A.Sh. Ramazanov, R.A. Valiullin, A.A. Sadretdinov, V.V. Shako, V.P. Pimenov, V.N. Fedorov, K.V. Belov // Paper SPE 136256. Russia Oil & Gas Technical Conference and Exhibition. – Moscow, Russia, 26–28 October 2010. – P. 739–760.
- Onur M., Cinar M. Temperature Transient Analysis of Slightly Compressible, Single-Phase Reservoirs // Paper SPE 180074. SPE ATCE. – Vienna, Austria, 30 May – 2 June 2016. – P. 1309–1356.
- Onur M., Cinar M. Interpretation and Analysis of Transient Sandface and Wellbore Temperature Data // Paper SPE 181710. SPE ATCE. – Dubai, UAE, 26–28 September 2016. – P. 121–167.
- The Use of Simulators for Designing and Interpretation of Well Thermal Survey / A. Ramazanov, R. Valiullin, R. Sharafutdinov, T. Khabirov, A. Sadretdinov, M. Zakirov, D. Islamov // Understanding the Harmony of the Earth's Resources through Integration of Geosciences: Abstract Book of 7th Saint Petersburg International Conferences & Exhibition. – Saint Petersburg, Russia, 11–14 April, 2016. – 4 p.
- Duru O., Horne R.N. Combined Temperature and Pressure Data Interpretation: Applications to Characterization of Near-Wellbore Reservoir Structures // Paper SPE 146614. SPE ATCE. – Denver, Colorado, USA, 30 October – 2 November 2011. – P. 98–116.
- Gajdukov L.A., Posvyanskij D.V., Novikov A.V. Investigation of Thermodynamic Processes during Multiphase Fluid Filtration to the Well with Perforation Channels in Damage Reservoir for Determination of Near Wellbore Zone Properties // Paper SPE 181964. Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition SPE. – Moscow, Russia, 26 October 2016. – P. 35–51.
- Похотников С.П., Елисеенков В.В. Гидродинамические расчеты слоистых пластов на основе модифицированных относительных проницаемостей // Прикладная механика и техническая физика. – 2001. – № 5. – С. 115–121.
- Ахмедов А.С., Ахмедова З.Х., Ахмедова Х.Г. Влияние слоистой неоднородности пласта на показатели разработки при неизотермическом вытеснении парафинистой нефти водой // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2016. – № 1. – С. 14–21.
- Исследование восстановления температуры в скважине после прекращения закачки воды в пласт с трещиной ГРП / А.М. Шарипов, Р.Ф. Шарафутдинов, А.Ш. Рамазанов, Р.А. Валиуллин // Вестник Башкирского университета. – 2017. – № 2. – С. 315–319.
- Исламов Д.Ф., Рамазанов А.Ш. Моделирование переходных температурных процессов в пласте при отборе и закачке жидкости // Вестник академии наук республики Башкортостан. – 2017. – Т. 24. – № 3. – С. 84–91.
- Исламов Д.Ф., Садретдинов А.А. Определение параметров околоскважинной зоны по нестационарным температурным измерениям в скважине // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2017. – № 5. – С. 15–19.
- Исламов Д.Ф., Рамазанов А.Ш. Нестационарное температурное поле при фильтрации жидкости в неоднородном пласте // Вестник Башкирского университета. – 2016. – № 1. – С. 4–8.
- Рамазанов А.Ш., Нагимов В.М. Аналитическая модель для расчета температурного поля в нефтяном пласте при нестационарной фильтрации // Вестник Башкирского университета. – 2016. – № 1. – С. 4–8.

- нарном притоке жидкости // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2007. – № 1. URL: http://ogbus.ru/authors/Ramazanov/Ramazanov_2.pdf (дата обращения: 19.03.2017).
18. Рамазанов А.Ш., Нагимов В.М., Ахметов Р.К. Температурное поле в пласте с учетом термодинамических эффектов при работе скважины с переменным дебитом // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2013. – № 1. URL: http://ogbus.ru/authors/Ramazanov/Ramazanov_4.pdf (дата обращения: 19.03.2017).
19. Рамазанов А.Ш., Филиппов А.И. Температурные поля при нестационарной фильтрации жидкости // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. – 1983. – № 4. – С. 175–178.
20. Басниев К.С., Кочина И.Н., Максимов В.М. Подземная гидромеханика. – М.: Недра, 1993. – 416 с.
21. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964. – 488 с.
- Поступила 02.10.2018 г.*

Информация об авторах

Исламов Д.Ф., ассистент кафедры геофизики Башкирского государственного университета.

Садретдинов А.А., кандидат физико-математических наук, ассистент кафедры геофизики Башкирского государственного университета.

UDC 550.3:536.2

ANALYSIS OF TEMPERATURE FIELD IN LAYERED RESERVOIR

Denis F. Islamov¹,
islamovden@rambler.ru

Alexander A. Sadretdinov¹,
islamovden@rambler.ru

¹ Bashkir State University,
32, Zaki Validi street, Ufa, 450074, Russia.

The relevance of the research. At present time the interest in quantitative interpretation of temperature surveys is growing. Individual flow rate and reservoir pressure of each layer, behind-casing flow rate, hydrodynamic layer parameters, characterization of permeability changing at near-wellbore zone become the purposes of quantitative interpretation. Non-stationary temperature and pressure in the well are used as input data for transient processes analysis, and temperature logs are used for quasi-stationary analysis. Determination of individual layer flow rates and near-wellbore zone parameters are of particular interest.

The main aim of the research is to assess the degree of affect of reservoir uniformity assumption on the observed temperature for some scenarios of well operation.

The methods. A numerical model is developed and investigated, discretization is carried out by the method of control volumes, the method of variable directions is used. The correctness of the numerical solution is verified by comparison with the known analytical solutions.

The results. The authors have studied the problem of a nonstationary temperature field in a layered reservoir. The average deviation of the solution for the case of injection can reach 20 % or more, the value depends on the thickness (total) of the reservoir. The average deviation of the solution for the case of injection reaches a maximum of 6–10 hours and then slowly decreases over time. In the case of production, the deviation value can reach 100 %, the maximum is reached at the beginning of recovery. Further, the deviation decreases, reaching after 24 hours the value of the order of 40 % of the initial deviation. Setting the permissible error of the solution in 10 % at modeling recovery in layered reservoirs it is necessary to take into account the stratification at its values above 15–25 %, depending on the scenario of work the well.

Key words:

Geophysics, thermal logging, well, reservoir, permeability, numerical solution.

The research was financially supported by the RFBR (project no. 16–35–00275 мол_а, project no. 16–29–15130 офу_м).

REFERENCES

1. Sui W., Zhu D., Hill A.D., Ehlig-Economides C.A. Determining Multilayer Formation Properties from Transient Temperature and Pressure Measurements. *Paper SPE 116270 presented at the SPE ATCE*. Denver, Colorado, USA, 21–24 September 2008. pp. 387–404.
2. Mao Y., Zeidouni M. Temperature Transient Analysis for Characterization of Multilayer Reservoirs with Crossflow. *Paper SPE 185654. SPE Western Regional Meeting held in Bakersfield*. California, USA, 23 April 2017. pp. 114–134.
3. Park H. *Well Test Analysis of a multilayered reservoir with formation crossflow*. PhD. Stanford, 1989. 164 p.
4. Chekalyuk E.B. *Termodinamika neftyanogo plasta* [Thermodynamics of oil reservoir]. Moscow, Nedra Publ., 1965. 238 p.
5. Ramazanov A.Sh., Valiullin R.A., Sadretdinov A.A., Shako V.V., Pimenov V.P., Fedorov V.N., Belov K.V. Thermal Modeling for Characterization of Near Wellbore Zone and Zonal Allocation. *Paper SPE 136256 presented at the SPE Russia Oil & Gas Technical Conference and Exhibition*. Moscow, Russia, 26–28 October 2010. pp. 739–760.
6. Onur M., Cinar M. Temperature Transient Analysis of Slightly Compressible, Single-Phase Reservoirs. *Paper SPE 180074 presented at the SPE ATCE*. Vienna, Austria, 30 May – 2 June 2016. pp. 1309–1356.
7. Onur M., Cinar M. Interpretation and Analysis of Transient Sandface and Wellbore Temperature Data. *Paper SPE 181710 presented at the SPE ATCE*. Dubai, UAE, 26–28 September 2016. pp. 121–167.
8. Ramazanov A., Valiullin R., Sharafutdinov R., Khabirov T., Sadretdinov A., Zakirov M., Islamov D. The Use of Simulators for Designing and Interpretation of Well Thermal Survey. *Abstract Book of 7th Saint Petersburg International Conferences & Exhibition. Understanding the Harmony of the Earth's Resources through Integration of Geosciences*. Saint Petersburg, Russia, 11–14 April, 2016. 4 p.
9. Duru O., Horne R.N. Combined Temperature and Pressure Data Interpretation: Applications to Characterization of Near-Wellbore Reservoir Structures. *Paper SPE 146614 presented at the SPE ATCE*. Denver, Colorado, USA, 30 October – 2 November 2011. pp. 98–116.
10. Gajdukov L.A., Posvyanskij D.V., Novikov A.V. Investigation of Thermodynamic Processes During Multiphase Fluid Filtration to the Well with Perforation Channels in Damage Reservoir for Determination of Near Wellbore Zone Properties. *Paper SPE 181964 presented at the Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition SPE*. Moscow, Russia, 26 October 2016. pp. 35–51.
11. Pokhotnikov S.P., Eliseenkov V.V. Hydrodynamic calculations of layered seams based on modified relative permeabilities. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*, 2001, no. 5, pp. 115–121. In Rus.
12. Akhmedov A.S., Akhmedova Z.Kh., Akhmedova Kh.G. Influence of layered heterogeneity of the formation on the development indices when the paraffinic oil is not isothermally displaced by water. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2016, no. 1, pp. 14–21. In Rus.
13. Sharipov A.M., Sharafutdinov R.F., Ramazanov A.Sh., Valiullin R.A. Study of the temperature recovery process in a well after stop of water injection in a reservoir with hydraulic fracturing. *Vestnik Bashkirskogo universiteta*, 2017, no. 2, pp. 315–319. In Rus.

14. Islamov D.F., Ramazanov A.Sh. Simulation of transient temperature processes in oil reservoirs at fluid withdrawal and injection. *Vestnik akademii nauk respubliki Bashkortostan*, 2017, no. 3, pp. 84–91. In Rus.
15. Islamov D.F., Sadretdinov A.A. Determination of near wellbore zone properties from non-stationary temperature measurements. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Neft i gaz*, 2017, no. 5, pp. 15–19. In Rus.
16. Islamov D.F., Ramazanov A.Sh. Non-stationary temperature field for fluid flow in heterogeneous reservoir. *Bullet of Bashkir University*, 2016, no. 1, pp. 4–8. In Rus.
17. Ramazanov A.Sh., Nagimov V.M. Analytical Model for Calculating Temperature Distribution in Oil Reservoir during Unsteady Fluid Inflow. *Elektronny nauchny zhurnal «Neftegazovoe delo»*, 2007, no. 1. Available at: http://ogbus.ru/authors/Ramazanov/Ramazanov_2.pdf (accessed 19 March 2017).
18. Ramazanov A.Sh., Nagimov V.M., Akhmetov R.K. Temperature field in the reservoir considering thermodynamic effects of the well at its variable production operation. *Elektronny nauchny zhurnal «Neftegazovoe delo»*, 2013, no. 1. Available at: http://ogbus.ru/authors/Ramazanov/Ramazanov_2.pdf (accessed 19 March 2017).
19. Ramazanov A.Sh., Filippov A.I. Temperature field in non-stationary filtration. *Izvestiya AN SSSR. Mekhanika Zhidkosti i Gaza*, 1983, no. 4, pp. 175–178. In Rus.
20. Basniev K.S., Kochina I.N., Maksimov V.M. *Podzemnaya gidromekhanika* [Underground Fluid Mechanics]. Moscow, Nedra Publ., 1993. 416 p.
21. Carslaw H., Jaeger D. *Teploprovodnost tverdykh tel* [Thermal conductivity of solids]. Moscow, Nauka Publ., 1964. 488 p.

Received: 2 October 2018.

Information about the authors

Denis F. Islamov, assistant, Bashkir State University.

Alexander A. Sadretdinov, Cand. Sc., assistant, Bashkir State University.

УДК 661.1:541.18

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСПЕРГИРУЮЩЕГО ЭФФЕКТА ПОЛИМЕРНЫХ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ В АКРИЛОВЫХ ДИСПЕРСИЯХ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ОКРАСКИ УСТЬЕВОЙ АРМАТУРЫ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН

Дюрягина Антонина Николаевна¹,
adyuryagina@inbox.ru

Луценко Аида Александровна¹,
l-a.13@mail.ru

Тюканько Виталий Юрьевич²,
vetal3333@mail.ru

¹ Северо-Казахстанский Университет им. М. Козыбаева,
Республика Казахстан, 150000, г. Петропавловск, ул. Абая, 18.

² АО «Казнефтегазмаш» по лакокрасочным покрытиям,
Республика Казахстан, 150000, г. Петропавловск, ул. Новая, 122.

Актуальность работы обусловлена необходимостью создания новых воднодисперсных лакокрасочных материалов с повышенным эксплуатационным ресурсом, согласно жёстким требованиям ПАО «НК «Роснефть» для защиты от атмосферной коррозии устьевой арматуры нефтяных скважин. В связи с ужесточением экологических требований во многих странах мира возросло использование воднодисперсных лакокрасочных материалов. Так, один из крупнейших производителей устьевой арматуры нефтяных скважин в Республике Казахстан – АО «Казнефтегазмаш» – принципиально использует для окраски своих изделий только воднодисперсные акриловые лакокрасочные материалы: грунтовку «Уникор-М» ТУ 2316–002–0–31953544–96 и краску «Акрэм-Металл» ТУ 2316–003–0–31953544–96. Однако основные российские нефте- и газодобывающие компании, в частности ПАО «НК «Роснефть», ПАО «Газпром» и др., в последнее время резко ужесточили требования к сроку защитного ресурса лакокрасочных покрытий. Так, согласно технологической инструкции ПАО «НК «Роснефть» № П2–05 ТИ–0002 «Антикоррозионная защита металлических конструкций на объектах нефтегазодобычи, нефтегазопереработки и нефтепродуктообеспечения компании», минимальный защитный ресурс лакокрасочных покрытий в зависимости от условий эксплуатации, составляет не менее 10 лет. А применяемые АО «Казнефтегазмаш» акриловые лакокрасочные материалы обеспечивают защитный ресурс покрытий не более 5 лет. Поэтому с учетом всего вышеперечисленного нами предпринята попытка увеличения защитного ресурса лакокрасочного покрытия путем получения более однородного распределения пигмента в полимерной матрице, за счет применения поверхностно-активных веществ.

Целью работы являлось изучение влияния полимерных поверхностно-активных веществ на диспергирование пигмента (диоксида титана) в водной дисперсии акрилового полимера.

Методы: компьютерно-оптическая микроскопия и математическое моделирование.

Результаты и выводы. Представлены результаты исследования влияния полимерных поверхностно-активных веществ марки TEGO: Glide 100 (полиэфирсилоксановый сополимер) и Dispers715w (полиакрилат натрия), на диспергирование диоксида титана (марка R-02) в водной акриловой композиции. Показано, что Glide 100 и Dispers 715w при содержании в композиции от 0,25 до 0,5 г/дм³ улучшают диспергирование пигмента. Наиболее эффективной добавкой является Dispers 715w, при этом диаметр частиц пигмента уменьшается в два раза (с 8 до 4 мкм). Выведены уравнения, описывающие влияние содержания и вида поверхностно-активных веществ на диаметр частиц пигмента, и на их основе построены номограммы. Разработанные лакокрасочные материалы могут использоваться для окраски устьевой арматуры нефтяных скважин.

Ключевые слова:

Защитные покрытия, лакокрасочные покрытия, защита от коррозии устьевой арматуры нефтяных скважин, поверхностно-активные вещества, диспергирование, водно-акриловая дисперсия, диоксид титана, суспензия.

Введение

В промышленности для защиты устьевой арматуры нефтяных скважин от атмосферной коррозии применяются лакокрасочные материалы (ЛКМ) [1–4]. В последнее время, в связи с вредностью и токсичностью применяемых растворителей, постоянно снижается использование органорастворимых ЛКМ. Одним из их заменителей являются воднодисперсные ЛКМ. Так АО «Казнефтегазмаш» использует для окраски устьевой арматуры только воднодисперсные акриловые ЛКМ: грунтовку «Уникор-М» ТУ 2316–002–0–31953544–96 и краску «Акрэм-Металл» ТУ 2316–003–0–31953544–96.

Поэтому с учетом всего вышеперечисленного нами предпринята попытка увеличения времени защитного ресурса лакокрасочного покрытия за счет применения поверхностно-активных веществ (ПАВ). Введение ПАВ в ЛКМ является перспективным направлением для интенсификации процессов дезагрегации (расклинивающий эффект Ребиндера) и стабилизации тонкодисперсных состояний во времени [5]. Это было установлено работами академика П.А. Ребиндера [6–8] и в дальнейшем развито сотрудниками его школы – А.Б. Таубманом и С.Н. Толстой [9, 10], исследовавших взаимодействие пигментов с полимерами на границе раз-

дела фаз. Оказалось, что дисперсность частиц пигмента при совмещении с полимером может как улучшаться, так и ухудшаться, кроме того, она зависит от химической природы обоих компонентов [11, 12]. Взаимодействуя друг с другом через прослойки поверхностно-активного вещества, твердые частицы образуют развитую структуру, на которой, как на каркасе, образуется вторичная структура ориентированного полимера [13, 14]. Несмотря на большое количество работ [15–17], посвященных исследованию влияния ПАВ на свойства композиционных материалов, влияние полимерных поверхностно-активных веществ на процессы диспергирования пигментов еще недостаточно изучено, в этой связи представлялось целесообразным исследовать влияние ионогенных полимерных ПАВ марки TEGO: Glide 100 (полиэфирсилоксановый сополимер), Dispers715w (полиакрилат натрия), на развитие процессов дезагрегации диоксида титана (марка R-02) в композициях на основе акрилового пленкообразующего (ТУ 2316–014–88753220–2006) и полярного растворителя (вода).

Экспериментальная часть. Методика и проведение экспериментов

Для количественной оценки диспергирующего эффекта ПАВ предпочтителен метод оптической микроскопии [18], позволяющий непосредственно зафиксировать линейные размеры и конфигурацию отдельных дисперсий, а также определить фракционный состав и качественно-количественные закономерности изменения их характеристик в лакокрасочных суспензиях. Решение этих задач, в рамках традиционного микрооптического анализа, ограничивают существенные затраты времени, трудоемкость и недостаточная точность, что связано с преобладанием визуальных оценок, рутинных операций как на стадии зондирования, так и на стадии обработки изображений. Вышеизложенное определило целесообразность сопряжения возможностей микрооптических анализаторов и компьютерных систем на техническом и методологическом уровне [19]. Для адекватного переноса изображения, наблюдаемого в окуляре микроскопа, использовали электронную преобразователь-насадку с кратностью увеличения $\times 35$, которая снабжена стандартным USB портом и программным пакетом. Принцип работы электронного видеоокуляра аналогичен принципу работы фотоэлемента и заключается в преобразовании световой энергии в электрическую. Системный блок насадки с малоформатными ПЗС-камерами трансформирует фиксируемые в окуляре микроскопа изображения в сигналы, приемлемые для восприятия системой WindowsXP в персональных компьютерах.

Электронные насадки по конфигурации совместимы с традиционными микроскопами. В разработанной нами системе использовали микроскоп CARLZEISS 451422. На первом этапе в рамках используемого программного пакета «Спектр диффе-

ренциального распределения» методом непрерывного сканирования осуществляли распознавание отдельных твердофазных частиц пигментана микроизображениях исследуемых композиций, с последующим переносом их в системный блок компьютера и сохранением (документирование). На втором этапе в автоматическом режиме осуществляли обработку микроизображений с получением количественной информации об удельном количестве частиц (на единицу площади), их геометрических параметрах (линейные размеры, конфигурация, площадь) и, наконец, в целом о фракционном составе. Алгоритм обработки данных включал следующие основные операции:

- 1) бинаризацию сохраненного ранее изображения – преобразование изображения в черно-белое;
- 2) распознавание при непрерывном сканировании и сортировку отдельных дисперсий по количеству (N , ед), крупности и фракционному составу (P , %) путем считывания их площади в пикселях (S , пкс). Трансформация расчетного показателя размера частиц, выраженного в пикселях в метрические единицы (мкм);
- 3) расчет интегральных и дифференциальных характеристик распределения частиц (по их количеству, линейным параметрам и площади) и их отражение в виде диаграмм, функций распределения или же в табличной форме в зависимости от заданных (в исследованиях) параметров оптимизации;
- 4) вывод функциональных зависимостей (в форме уравнений или графиков) разностных интегральных и дифференциальных характеристик распределения частиц (по количеству, линейным размерам или площади) в зависимости от количественного содержания пленкообразующего и ПАВ в композициях.

При этом составы суспензий оптимизировали по количественному содержанию в них твердой фазы в зависимости от степени дисперсности частиц и распределения их по классам крупности. Одновременно, для формирования однородных и стабилизированных во времени пленок (по толщине и плотности распределения дисперсий на поверхности предметного стекла), определили требуемые характеристики статической нагрузки (масса, продолжительность выдержки) на покровное стекло. Это позволило нивелировать влияние деформационных эффектов, вызываемых вариациями состава суспензий (по содержанию твердого) и трехосным сжатием (по высоте и плоскости) из-за развития во времени сопутствующих процессов (испарение дисперсионной среды).

Испытание комплекса на стандартизированных объектах в статическом и динамическом (во времени) режимах показало, что погрешность измерений не превышает 1,3 % (отн.). Общая продолжительность микрооптического анализа (от съемки образцов до выдачи результатов) ограничивалась 3–4 минутами.

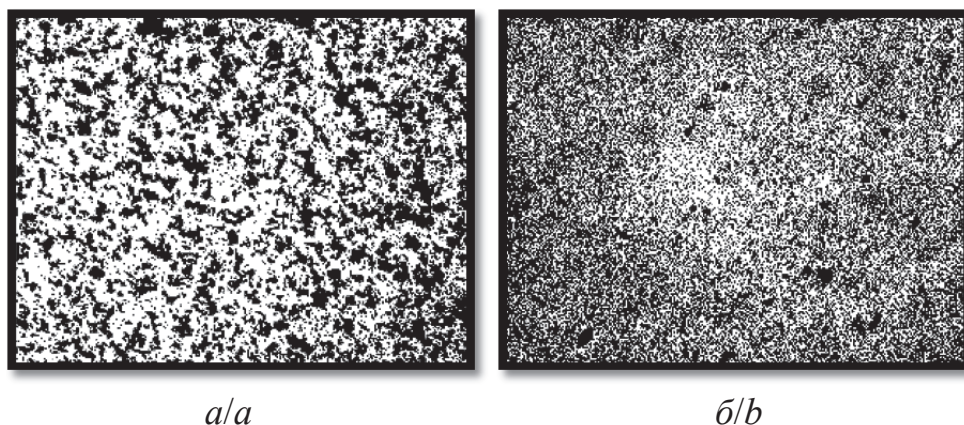


Рис. 1. Микроизображения дисперсий диоксида титана в воде (а) и в 10 %-ном растворе пленкообразующего (б) при кратности увеличения $\times 350$

Fig. 1. Microimages of dispersion of titanium dioxide in water (a) and in 10 % solution of film-forming (b) at magnification of $\times 350$

По результатам предварительных испытаний на пигментном диоксиде титана было установлено, что при заданной кратности увеличения компьютерно-оптической системы $\times 350$ наилучший эффект с точки зрения воспроизводимости и точности результатов обеспечивается при его содержании в водных суспензиях на уровне 1 %.

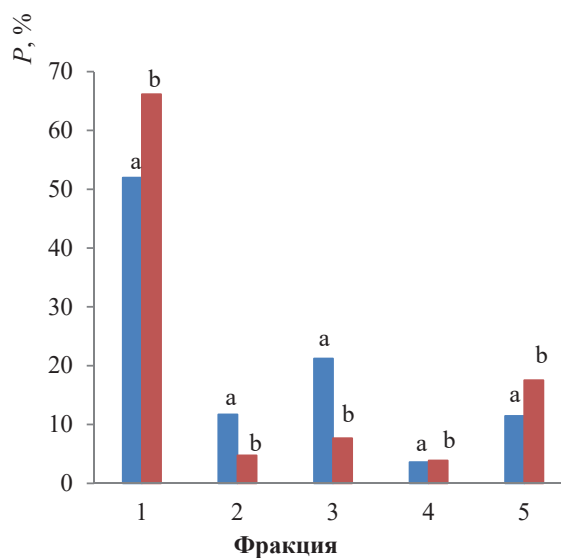
Развитие процессов дезагрегации (агрегации) контролировали по изменению среднестатистического размера твердофазных дисперсий (d , мкм) и фракционного состава (P , %) на фиксированной площади (S обрабатываемого изображения). Вышеуказанные режимы пробоподготовки учитывали при проведении исследований. Диспергирующий эффект поверхностно-активных полимеров устанавливали в водных суспензиях с 1 %-м содержанием твердой фазы. В суспензиях варьировали количественные содержания водной дисперсии акрилового полимера от 0 до 30 % и полимерных ПАВ от 0 до 4 г/дм³.

Результаты и их обсуждение

Микроизображения дисперсий диоксида титана в воде (рис. 1, а) и в водном растворе пленкообразующего (рис. 1, б), а также соответствующие им диаграммы, отражающие распределение частиц пигмента по фракциям, представлены на рис. 1, 2.

В растворителе содержание мелких фракций (размером частиц ≤ 44 мкм) не превышает 52 %. При введении акрилового полимера в воду происходит частичное разрушение крупных агрегатов (в интервалах 45–63; 64–99 мкм), сопровождающееся увеличением содержания до 67 % мелких фракций. Этот процесс обусловлен генерацией расклинивающего давления за счет диффузии пленкообразующего по границам отдельных частиц; на этой стадии в первую очередь дезагрегируют частицы, связанные в основном по точечным и лишь затем по более прочным линейным и плоскостным контактам [20].

Введение в композиции Glide 100 и Dispers715w улучшает диспергирование пигмента, рис. 3.



Фракции, мкм: 1 – 44; 2 – 63; 3 – 99; 4 – 140; 5 – 198

Рис. 2. Дифференциальные кривые распределения по крупности фракций твердофазных частиц пигмента в воде (а) и в 10 %-м растворе пленкообразующего (б)

Fig. 2. Differential distribution curves for fineness of fractions of solid-phase pigment particles in water (a) and in 10 % solution of film-forming (b)

В системе «вода–ПАВ» максимум дезагрегирующего эффекта обоих модификаторов фиксировали при их содержании на уровне 1,0 г/дм³ (рис. 3, а, б, кривая 1). При этом наибольшим диспергирующим эффектом характеризовался Dispers715w. При увеличении его содержания от 0 до 1,0 г/дм³ диаметр частиц уменьшился в 3,7 раза и составил 3,5 мкм. За пределами указанного концентрационного участка ($C_{\text{ПАВ}} > 1$ г/дм³) наблюдаются процессы агрегации, сопровождающиеся увеличением диаметра частиц пигмента от 4,5 до 11,7 мкм (Glide 100) и от 3,5 до 6,2 мкм (Dispers 715w) при $C_{\text{ПАВ}} = 4$ г/дм³. Сопоставительный анализ диспергирующего эффекта исследуемых добавок в бинарных и тройных системах показал более глубокое диспергирование в воде,

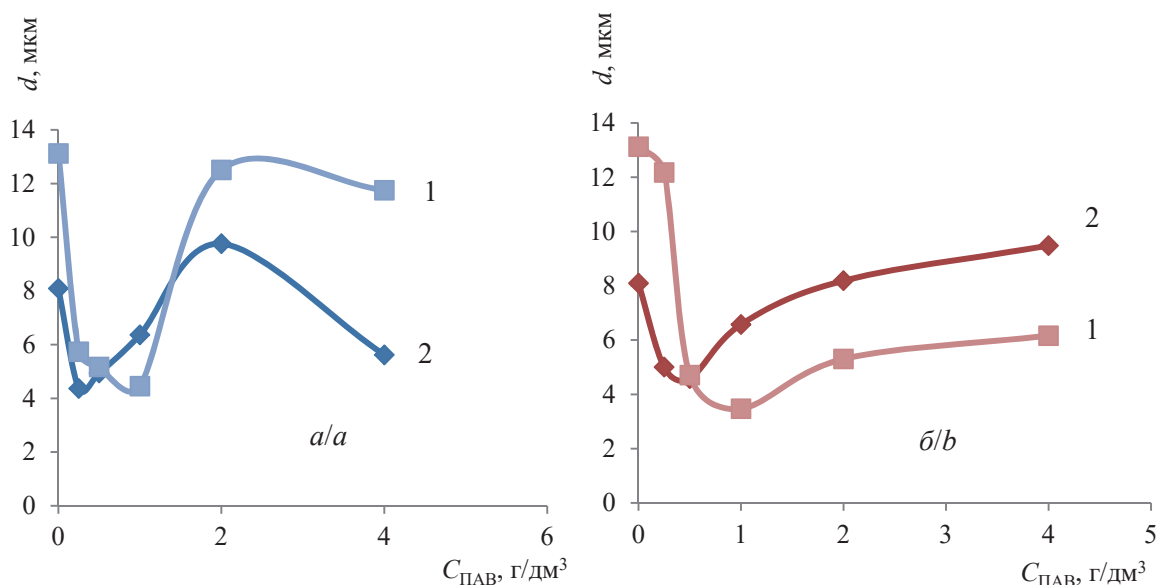


Рис. 3. Влияние содержания добавок Glide 100 (а) и Dispers 715w (б) в воде (1) и в акриловом пленкообразующем (2) на среднестатистический диаметр частиц диоксида титана

Fig. 3. Effect of the additives Glide 100 (a) and Dispers 715w (b) in water (1) and in acrylic film-forming (2) on the average diameter of titanium dioxide particle

что, очевидно, обусловлено отсутствием конкуренции со стороны макромолекул пленкообразующего. Этот факт демонстрируют зависимости $\Delta d = f(C_{\text{пл}})$, Δd – разность среднестатистического диаметра в суспензиях без ПАВ и его минимальным значением в присутствии добавок (рис. 4).

Судя по убыли значений Δd , с увеличением содержания пленкообразующего (от 0 до 20 %) число макромолекул акрила, связанных с твердой поверхностью, значительно повышается, что затрудняет миграцию вводимых ПАВ в устья микрощелей и, таким образом, уменьшает нарастание деформаций и механическое разделение агрегатов под воздействием модификаторов. По мере даль-

нейшего концентрирования пленкообразующего (от 20 до 30 %) фиксировали стабилизацию диспергирующего эффекта вводимых ПАВ (на уровне 1,5–2 $\mu\text{м}$). Последнее может быть обусловлено процессами ассоциации макромолекул акрила.

Таким образом, диспергирование пигмента определяется содержанием пленкообразующего в системе и может целенаправленно регулироваться содержанием ПАВ.

По экспериментальным данным выведены обобщенные уравнения (1) и (2), описывающие влияние концентрации ПАВ и содержания пленкообразующего в суспензиях на диаметр частиц пигмента (d , $\mu\text{м}$):

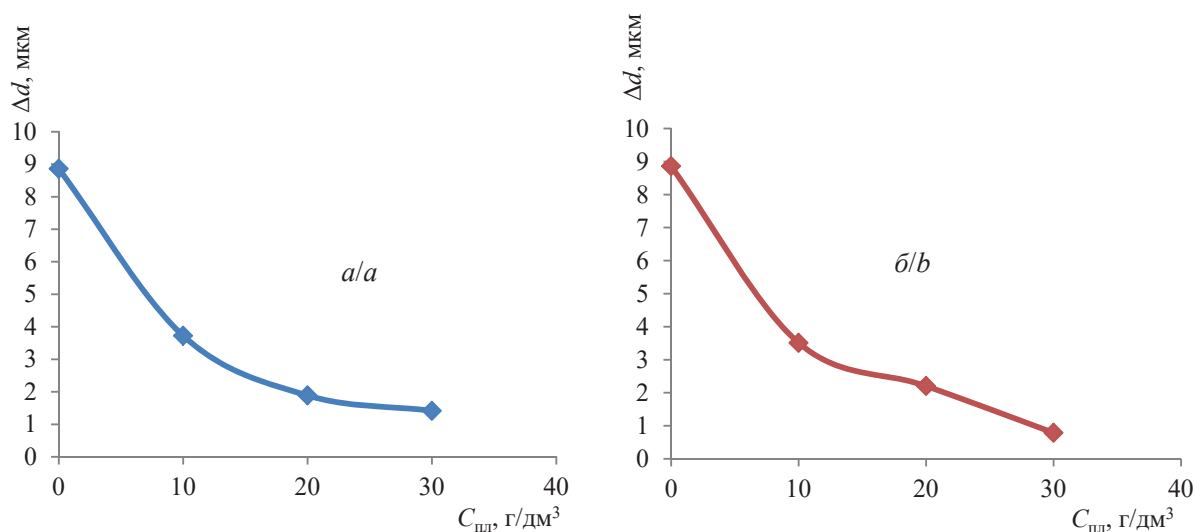


Рис. 4. Влияние содержания акрилового полимера на изменение среднестатистического диаметра частиц пигмента: а) Glide 100; б) Dispers715w

Fig. 4. Influence of the film-forming agent on the change in the average statistical diameter: а) Glide 100; б) Dispers715w

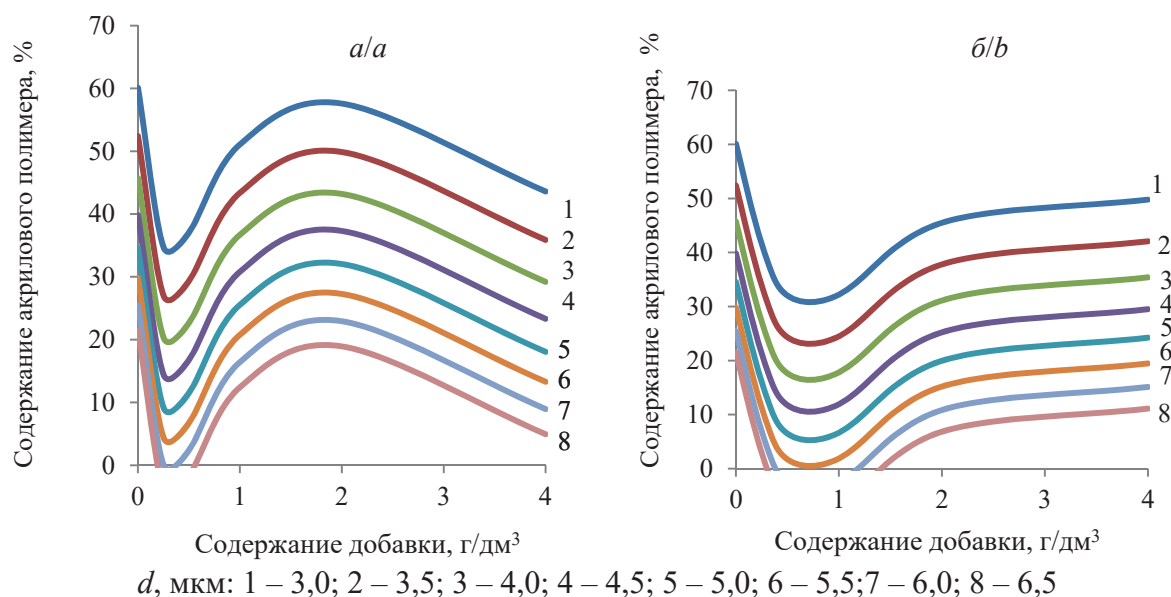


Рис. 5. Влияние содержания акрилового полимера и добавок: Glide 100 (а) и Dispers 715w (б) на среднестатистический диаметр частиц пигмента

Fig. 5. Effect of the content of acrylic polymer and additives: Glide 100 (a) and Dispers 715w (b) on the average diameter of pigment particle

- система «Акриловое пленкообразующее Glide 100–TiO₂»

$$d = \frac{\left[(7,84 - 27(e^{C_{\text{ПАВ}}^{-1}})(e^{-3,6C_{\text{ПАВ}}}) - 0,03C_{\text{ПАВ}}^{3,1}) \times \right.}{5,97} \times (7,66 e^{-0,019C_{\text{пл}}}) \left. \right]; \quad (1)$$

- система «Акриловое пленкообразующее Dispers 715w–TiO₂»

$$d = \frac{\left[(7,84 - 14(e^{C_{\text{ПАВ}}^{-1}})(e^{-2C_{\text{ПАВ}}}) - 0,1C_{\text{ПАВ}}^{1,8}) \times \right.}{5,89} \times (7,5e^{-0,02C_{\text{пл}}}) \left. \right], \quad (2)$$

где $C_{\text{ПАВ}}$ – содержание ПАВ в композиции, г/дм³; $C_{\text{пл}}$ – содержание акрилового полимера в композиции, %.

На основе обобщенных уравнений (1) и (2) получены номограммы (рис. 5), позволяющие определять значения вышеуказанных параметров для достижения фиксированных значений диаметра частиц пигмента. Так, значения $d=4$ мкм при содер-

жании акрилового полимера в системе 25 % может быть достигнуто при концентрации ПАВ 0,19–0,30 г/дм³ соответственно для Dispers 715w и Glide 100. С увеличением содержания пленкообразующего (30 %) тот же размер частиц может быть достигнут при меньшей концентрации ПАВ Dispers 715w ($C_{\text{ПАВ}}=0,17$ г/дм³) и Glide 100 ($C_{\text{ПАВ}}=0,2$ г/дм³).

Выводы

1. Изучено влияние двух добавок на диспергирование пигмента в водной акриловой эмали. Показано, что Glide100 и Dispers715w при содержании в композиции от 0,25 до 0,5 г/дм³ улучшают диспергирование пигмента. Наиболее эффективной добавкой является Dispers715w, при этом диаметр частиц пигмента уменьшается в два раза (с 8 до 4 мкм).
2. Выведены уравнения, описывающие влияние содержания и вида добавки на диаметр частиц пигмента, и на их основе построены номограммы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bahadori A. Essentials of Coating, Painting, and Lining for the Oil, Gas and Petrochemical Industries. – Lismore, NSW, Australia: Gulf Professional Publishing, 2015. – 830 p.
2. Offshore Pipelines / G. Boyun, S. Shanhong, A. Ghalambor, R.L. Tian. – Oxford, UK: Gulf Professional Publishing, 2014. – 277 p.
3. Papavinasam S. Corrosion Control in the Oil and Gas Industry. – Ottawa, Ontario, Canada: Gulf Professional Publishing, 2014. – 1020 p.
4. Fairhurst D. Coatings for Structures in Contact with the Ground, Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. – Dublin, Ireland: Elsevier Inc., 2016. – 306 p.
5. New generation decorative paint technology / A. Overbeek, F. Buckmann, E. Martin, P. Steenwinkel, T. Annable // Progress in Organic Coatings. – December 2003. – V. 48. – Iss. 2–4. – P. 125–139.
6. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах: Сб. Научных трудов. – М.: Наука, 1979. – Т. 1. – 450 с.
7. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика дисперсных структур. – М.: Знание, 1958. – Сер. 1V. – № 34. – 64 с.
8. Яковлев А.Д. Химия и технология лакокрасочных покрытий. – Л.: Химия, 1989. – 382 с.
9. Таубман А.Б., Толстая С.Н., Бородин В.Н. Адсорбционное модифицирование наполнителей и пигментов и структурообразования в растворах полимеров // ДАН СССР. – 1962. – Т. 142. – № 2. – С. 407–410.

10. Таубман А.Б., Никитина С.Н., Толстая С.Н. Поверхностно-активные вещества в физико-химии и технологии полимеров // Журнал всеоюзного химического общества им. Д.И. Менделеева. – 1966. – Т. XI. – № 4. – 387 с.
11. Role of surfactants on stability of iron oxide yellow pigment dispersions / Chandrashekar R. Haramagatti, Priya Dhande, Ritesh Bhavsar, Ajinkya Umbarkar, Amit Joshi // Progress in Organic Coatings. – 2018. – V. 120. – P. 260–265.
12. Faouzi Nsib, Naceur Ayed, Yves Chevalier. Selection of dispersants for the dispersion of C.I. Pigment Violet 23 in organic medium // Dyes and Pigments. – 2007. – V. 74. – Iss. 1. – P. 133–140.
13. Dongjie Liu, Qinghui Wang, Jinjia Wei. Experimental study on drag reduction performance of mixed polymer and surfactant solutions // Chemical Engineering Research and Design. – April 2018. – V. 132. – P. 460–469.
14. Influence of surfactant and electrolyte concentrations on surfactant adsorption and foaming characteristics / Nurudeen Yekeen, Muhammad A. Manan, Ahmad Kamal Idris, Ali Mohamed Samin // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 20 January 2017. – V. 149. – P. 612–622.
15. Sanatkaran N., Masalova I., Malkin A. Ya. Effect of surfactant on interfacial film and stability of highly concentrated emulsions stabilized by various binary surfactant mixtures // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 5 November 2014. – V. 461. – P. 85–91.
16. Surface activity of cationic surfactants, influence of molecular structure / P. Grażyna, A. Hamerska-Dudra, A. Kazimiera, K.A. Wilk, P. Warszyński // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 5 August 2010. – V. 365. – Iss. 1–3. – P. 215–221.
17. Aguirreurreta Z., De la Cal J.C., Leiza J.R. Preparation of high solids content waterborne acrylic coatings using polymerizable surfactants to improve water sensitivity // Progress in Organic Coatings. – November 2017. – V. 112. – P. 200–209.
18. Kumar V., Coluccelli N., Polli D. Molecular and Laser Spectroscopy. – India: Elsevier, 2018. – 362 p.
19. Болатбаев К.Н., Дюрягина А.Н., Островной К.А. Модифицирование композитов поверхностно-активными веществами. – Петропавловск: Изд-во СКГУ, 2005. – 184 с.
20. Firat Karakaş, Mehmet S. Çelik. Stabilization mechanism of main paint pigments // Progress in Organic Coatings. – 2018. – V. 123. – P. 292–298.

Поступила 10.11.2018 г.

Информация об авторах

Дюрягина А.Н., кандидат химических наук, доцент, заведующая кафедрой химии и химических технологий Северо-Казахстанского Университета им. М. Козыбаева.

Луценко А.А., магистрант кафедры химии и химических технологий Северо-Казахстанского Университета им. М. Козыбаева.

Тюканько В.Ю., кандидат технических наук, PhD химии, инженер-технолог АО «Казнефтегазмаш» по лакокрасочным покрытиям.

UDC 661.1:541.18

STUDY OF THE DISPERSE EFFECT OF POLYMERIC SURFACE-ACTIVE SUBSTANCES IN ACRYLIC DISPERSIONS USED FOR PAINTING OIL WELL ARMATURE

Antonina N. Dyuryagina¹,
adyuryagina@inbox.ru

Aida A. Lutsenko¹,
l-a.13@mail.ru

Vitaliy Yu. Tyukanko²,
vetal3333@mail.ru

¹ North Kazakhstan University named after M. Kozybaev,
18, Abay Street, Petropavlovsk, 150000, Kazakhstan.

² JSC «Kazneftegazmash»,
122, Novaya street, Petropavlovsk, 150000, Kazakhstan.

The relevance of the work is caused by the need to develop new environmentally friendly water-dispersed paints with increased operating life, according to the strict requirements of PJSC «Rosneft» to protect wellhead valves of oil wells against atmospheric corrosion. In modern practice of corrosion protection of wellhead valves in oil and gas wells and pipelines protection from damaging effects of atmospheric environments the paint and varnish based insulating coatings are widespread. Due to the tightening of environmental requirements in many countries, the use of water-based coatings has increased. So one of the largest manufacturer of wellhead valves of oil wells in the Republic of Kazakhstan – JSC «Kazneftegazmash» – uses acrylic coatings: primer «Unikor-M» TU 2316-002-0-31953544-96 and paint «Akrem-Metal» TU 2316-003-0-31953544-96, for painting their products waterborne. However, the main Russian oil and gas companies, in particular Rosneft, Gazprom and others, recently sharply tightened the requirements for the term of protective resource of paint coatings. Thus, according to the technological instruction of PJSC «Rosneft» № P2-05 TI-0002 «Anticorrosion protection of metal structures at oil and gas production facilities, oil and gas processing and oil products supply of the company» the minimum protective resource of paint coatings, depending on the operating conditions, is not less than 10 years. And the acrylic water-soluble coatings used by JSC «Kazneftegazmash» provide a protective resource of coatings, depending on the operating conditions, not more than 5 years. Therefore, we have attempted to increase the time of protective resource of the paint coating by obtaining a more uniform/dispersed distribution of the pigment in the polymer matrix, through the use of surfactants.

The main aim of the study was to increase the protective resource of acrylic paint, based on the study of the influence of polymer surfactants (surfactants) on dispersion of pigment (titanium dioxide) in the aqueous dispersion of acrylic polymer.

Methods: computer-optical microscopy and mathematical modeling.

Results. The paper introduces the results of the study of the effect of TEGO polymer surfactants: Glide 100 (polyether-siloxane copolymer) and Dispers715w (sodium polyacrylate), on titanium dioxide (grade R-02) dispersion in aqueous acrylic composition. It was shown that Glide 100 and Dispers 715w with a content of 0,25 to 0,5 g/dm³ in the composition improve pigment dispersion. The most effective additive is Dispers 715w, while the diameter of the pigment particles is reduced almost twice (from 8 to 4 microns). The authors have derived the equations describing the influence of content and type of surfactant on the particle diameter of the pigment, and based on the equations built the nomograms. The obtained coatings are characterized by more dispersed distribution of the filler in the polymer matrix, which significantly increases the protective resource of the paint material. The developed coatings can be used for painting wellhead valves of oil wells.

Key words:

Protective coatings, coatings, protection of oil well armature from corrosion, surface-active substances, dispersion, water-acrylic dispersion, titanium dioxide, suspension.

REFERENCES

1. Bahadori A. *Essentials of Coating, Painting, and Lining for the Oil, Gas and Petrochemical Industries*. Lismore, NSW, Australia, Gulf Professional Publishing, 2015. 830 p.
2. Boyun G., Shanhong S., Ghalambor A., Tian R.L. *Offshore Pipelines*. Oxford, UK, Gulf Professional Publishing, 2014. 277 p.
3. Papavinasam S. *Corrosion Control in the Oil and Gas Industry*. Ottawa, Ontario, Canada, Gulf Professional Publ., 2014. 1020 p.
4. Fairhurst D. *Coatings for Structures in Contact with the Ground, Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. Dublin, Ireland, Elsevier Inc., 2016. 306 p.
5. Overbeek A., Buckmann F., Martin E., Steenwinkel P., Annable T. New generation decorative paint technology. *Progress in Organic Coatings*, December 2003, vol. 48, Iss. 2–4, pp. 125–139.
6. Rebinder P.A. *Poverkhnostnye yavleniya v dispersnykh sistemakh. Sbornik nauchnykh trudov* [Surface phenomena in disperse systems. Collection of scientific papers]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 450 p.
7. Rebinder P.A. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika dispersnykh struktur* [Physico-chemical mechanics of disperse structures]. Moscow, Znanie Publ., 1958. 64 p.
8. Yakovlev A.D. *Khimiya i tekhnologiya lakokrasochnykh pokrytiy* [Chemistry and technology of paint and varnish coatings]. Leningrad, Khimiya Publ., 1989. 382 p.
9. Taubman A.B., Tolstaya S.N., Borodina V.N. Adsorbtsionnoe modifitsirovanie napolniteley i pigmentov i strukturoobrazovaniya v rastvorakh polimerov [Adsorption modification of fillers and pigments and structure formation in polymer solutions]. *DAN SSSR*, 1962, vol. 142, no. 2, pp. 407–410.
10. Taubman A.B., Nikitina S.N., Tolstaya S.N. *Poverkhnostno-aktivnye veshchestva v fiziko-khimii i tekhnologii polimerov* [Surface-active substances in physics and chemistry and technology of

- polymers]. *Zhurnal vsesoyuznogo khimicheskogo obshchestva im. D.I. Mendeleeva*, 1966, vol. XI, no. 4, pp. 387.
11. Chandrashekara R. Haramagatti, Priya Dhande, Ritesh Bhavsar, Ajinkya Umbarkar, Amit Joshi. Role of surfactants on stability of iron oxide yellow pigment dispersions. *Progress in Organic Coatings*, 2018, vol. 120, pp. 260–265.
 12. Faouzi Nsib, Naceur Ayed, Yves Chevalier. Selection of dispersants for the dispersion of C.I. Pigment Violet 23 in organic medium. *Dyes and Pigments*, 2007, vol. 74, Iss. 1, pp. 133–140.
 13. Dongjie Liu, Qinghui Wang, Jinjia Wei. Experimental study on drag reduction performance of mixed polymer and surfactant solutions. *Chemical Engineering Research and Design*, April 2018, vol. 132, pp. 460–469.
 14. Nurudeen Yekeen, Muhammad A. Manan, Ahmad Kamal Idris, Ali Mohamed Samin. Influence of surfactant and electrolyte concentrations on surfactant adsorption and foaming characteristics. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 20 January 2017, vol. 149, pp. 612–622.
 15. Sanatkaran N., Masalova I., Malkin A. Ya. Effect of surfactant on interfacial film and stability of highly concentrated emulsions stabilized by various binary surfactant mixtures. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 5 November 2014, vol. 461, pp. 85–91.
 16. Para G., Hamerska-Dudra A., Wilk K.A., Warszyński P. Surface activity of cationic surfactants, influence of molecular structure. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 5 August 2010, vol. 365, Iss. 1–3, pp. 215–221.
 17. Aguirreurreta Z., De la Cal J.C., Leiza J.R. Preparation of high solids content waterborne acrylic coatings using polymerizable surfactants to improve water sensitivity. *Progress in Organic Coatings*, November 2017, vol. 112, pp. 200–209.
 18. Kumar V., Coluccelli N., Polli D. *Molecular and Laser Spectroscopy*. India, Elsevier, 2018. 340 p.
 19. Bolatbaev K.N., Dyuryagina A.N., Ostrovnoy K.A. *Modifitsirovanie kompozitov poverkhnostno-aktivnymi veshchestvami* [Modification of composites by surfactants]. Petropavlovsk, NKSU ltd., 2005. 184 p.
 20. Firat Karakaş, Mehmet S. Çelik. Stabilization mechanism of main paint pigments. *Progress in Organic Coatings*, 2018, vol. 123, pp. 292–298.

Received: 10 November 2018.

Information about the authors

Antonina N. Dyuryagina, Cand. Sc., associate professor, head of the department, North Kazakhstan University named after M. Kozybaev.

Aida A. Lutsenko, graduate student, Kazakhstan University named after M. Kozybaev.

Vitaliy Yu. Tyukanko, PhD, Cand. Sc., engineer-technologist, JSC «Kazneftegazmash».

УДК 622.276.53

ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ НАТЯЖЕНИЯ РЕМНЕЙ ПРИВОДА СТАНКА-КАЧАЛКИ

Уразаков Камил Рахматуллович¹,
Urazakk@mail.ru

Тимашев Эдуард Олегович¹,
timashev@mail.ru

Шайжанов Нурсултан Серикболатович¹,
shaizhanov007@yandex.ru

Тугунов Павел Михайлович¹,
Paveltugunov@gmail.com

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

Актуальность. Работоспособность балансирных станков-качалок – наиболее распространенного типа привода скважинных штанговых насосов – в значительной степени определяется надежностью работы клиноременных передач. Отсутствие механизма, обеспечивающего оптимальное натяжение приводных ремней, обуславливает потери энергии в клиноременной передаче за счет проскальзывания ремней и снижение эксплуатационных характеристик насосных установок. В настоящее время контроль и регулировка натяжения приводных ремней станка-качалки производятся вручную. Вышесказанное обуславливает актуальность разработки механизмов автоматического натяжения ремней.

Объект: автоматический натяжитель приводных ремней станка-качалки, использующий принцип регулирования межосевого расстояния шкивов путем изменения угла наклона платформы, на которой установлен электродвигатель. Регулирование угла наклона достигается совместной работой пружин сжатия разной жесткости. Пружина большей жесткости за счет силы упругой деформации сжатия обеспечивает натяжение ремней, пружина меньшей жесткости предназначена для компенсации колебаний в системе.

Цель: исследование автоматизированной системы натяжения ремней привода станка-качалки, разработка методики расчета автоматического натяжителя ремней, включающая определение оптимальной величины угла наклона платформы к горизонтальной, положения электродвигателя на платформе, упругих характеристик пружин.

Методы: применение принципов аналитической механики, дифференциального исчисления для расчета оптимальных величин параметров автоматического натяжителя.

Результаты. Разработана методика расчета автоматического натяжителя приводных ремней станка-качалки, позволяющая поддерживать оптимальную величину натяжения ремней в процессе работы штанговой насосной установки. Рассчитаны оптимальные величины начального угла наклона платформы, положения электродвигателя на платформе, пределы изменения угла наклона платформы в процессе растяжения ремней. Показано, что с точки зрения минимизации нагруженности пружины наиболее оптимальными являются: минимальное значение угла наклона платформы и максимальное расстояние вдоль нее до электродвигателя. Произведен расчет пружин сжатия, входящих в компоновку автоматического натяжителя, определены оптимальные значения коэффициентов жесткости пружин.

Ключевые слова:

Станок-качалка, приводной ремень, натяжение ремней, автоматический натяжитель, пружина сжатия, коэффициент упругости пружины.

Введение

В последнее время в связи с сокращением объемов добычи нефти и ростом числа мало- и низкодебитных скважин, обуславливающим увеличение доли добывающего фонда, эксплуатируемого установками скважинных штанговых насосов (УСШН), значительное внимание уделяется разработке методов и технологий, направленных на повышение эффективности насосной эксплуатации. Наиболее актуальными задачами рентабельной разработки механизированного фонда являются: обеспечение достижения технологического потенциала скважин за счет обоснованного выбора оптимального режима эксплуатации и увеличение периода безотказной работы насосного оборудования [1–6].

Эффективность работы штанговых насосных установок в значительной степени определяется надежностью наземного привода. Одним из путей обеспечения стабильной работы балансирных станков-качалок (СК) – наиболее распространенного типа привода скважинных штанговых насосов – является повышение надежности клиноременных передач. В процессе эксплуатации станков-качалок натяжение приводных ремней изменяется вследствие воздействия различных факторов. В частности, изменение температуры окружающей среды обуславливает изменение длины ремней и величины натяжения за счет изменения физических свойств материала ремней. Существенное влияние на состояние ремней оказывает временной фактор, который приводит к растяжению

и ослаблению натяжения ремней с течением времени [7–12].

Отсутствие в кинематике станка-качалки элемента, компенсирующего недостаточное или избыточное натяжение ремней, способствует снижению дебита скважины, необоснованным потерям энергии в клиноременной передаче и снижению КПД насосных установок. В настоящее время регулировка натяжения ремней производится вручную и требует полной остановки работы насосной установки. Вышеперечисленное обуславливает актуальность разработки механизмов, позволяющих поддерживать натяжение ремней СК на оптимальном уровне на протяжении всего периода работы УСНН.

Для предотвращения ослабления натяжения предложен механизм автоматического натяжителя приводных ремней СК, использующий принцип регулирования межосевого расстояния шкивов путем изменения угла наклона платформы, на которой установлен электродвигатель. Компонировка натяжителя включает в себя наклонную платформу из швеллеров с установленным на ней асинхронным электродвигателем (рис. 1). С одной стороны платформа закреплена на упруго-деформируемой опоре, которая может растягиваться или сжиматься за счет применения двух пружин, расположенных с противоположных сторон относительно плоскости платформы. С другой стороны платформа шарнирно закреплена на раме.

Регулирование угла наклона достигается совместной работой пружин сжатия разной жесткости, у каждой из которых один конец закреплён, а второй взаимодействует с платформой. Натяжение ремней обеспечивается силой упругой деформации верхней пружины большей жесткости (индекс 1) совместно с весом электродвигателя и платформы. Результирующий момент данных сил относительно неподвижной оси вращения платформы направлен противоположно моменту, обусловленному силой натяжения ремней. В случае возможного ослабления натяжения ремней происходит их дополнительное растяжение, что позволяет обеспечить постоянную величину натяжения.

Нижняя пружина меньшей жесткости (индекс 2) имеет противоположное направление усилия по отношению к пружине большей жесткости и служит для повышения устойчивости и надежности работы автоматического натяжителя. Известно, что вращение вала электродвигателя вызывает возникновение центробежных сил за счет неуравновешенных масс на шкиве. Уменьшение угла наклона платформы в результате действия сил инерции обуславливает дополнительное сжатие нижней пружины и возникновение возвращающей силы, стремящейся вернуть платформу в первоначальное положение.

Механизм автоматического натяжения, в котором передней опорой стола электродвигателя служит шток с установленной на нем парой пружин для обеспечения постоянного натяжения ремней

клиноременной передачи, причем ресурс пружин расходуется на натяжение ремней и преодоление веса платформы и электродвигателя, разработан в [1]. За счет использования собственной массы электродвигателя и платформы для поддержания натяжения ремней предложенный вариант требует меньшую нагруженность пружин и является более эффективным, поскольку позволяет значительно меньше использовать ресурс пружин, а значит способствует увеличению эксплуатационной надежности механизма натяжения.

Расчет оптимальных величин угла наклона платформы и положения электродвигателя на платформе

Методика расчета автоматического натяжителя ремней СК включает расчет оптимальных значений угла наклона платформы к горизонтали α , положения электродвигателя на платформе (в качестве независимой переменной примем расстояние от неподвижной оси вращения платформы до линии, перпендикулярной плоскости платформы и проходящей через центр масс электродвигателя $L_{эд}$, которое в дальнейшем обозначается термином «расстояние вдоль платформы до электродвигателя») и упругих характеристик пружин (коэффициентов упругости, силы упругой деформации), удовлетворяющих следующим основным критериям:

- 1) Постоянство величины натяжения ремней СК в процессе изменения межосевого расстояния шкивов и угла наклона платформы
- 2) Обеспечение устойчивой работы автоматического натяжителя при минимальной нагруженности его узлов.

Уравнение моментов относительно точки О (рис. 1):

$$\sum M = F_{\text{пр}} L_{\text{пр}} - S_{\Sigma} h_2 \sin \beta - S_{\Sigma} h_1 \cos \beta + m_{\text{эд}} g h_2 + m_{\text{ст}} g h_3 = 0, \quad (1)$$

где $F_{\text{пр}}$ – результирующая сила упругости системы пружин; $m_{\text{эд}}$ – масса асинхронного электродвигателя; $m_{\text{ст}}$ – масса платформы; g – ускорение свободного падения; S_{Σ} – окружная сила, создаваемая силой натяжения ремней; $L_{\text{пр}}$ – плечо момента результирующей силы упругости пружин; β – угол между горизонталью и линией, проходящей через центры осей вращения шкивов редуктора и электродвигателя; h_1 – плечо момента горизонтальной составляющей силы натяжения ремней; h_2 – плечо момента силы тяжести электродвигателя; h_3 – плечо момента силы тяжести платформы. Результирующая сила упругости системы пружин – вектор-

ная сумма сил упругой деформации $\sum_{i=1}^2 \vec{F}_{\text{пр}}^i$, создаваемых каждой из пружин [13].

Для нахождения наиболее оптимальных значений варьируемых параметров выразим переменные в (1) через независимые переменные α и $L_{\text{эд}}$. Учтем следующие геометрические связи между исходными и независимыми переменными:

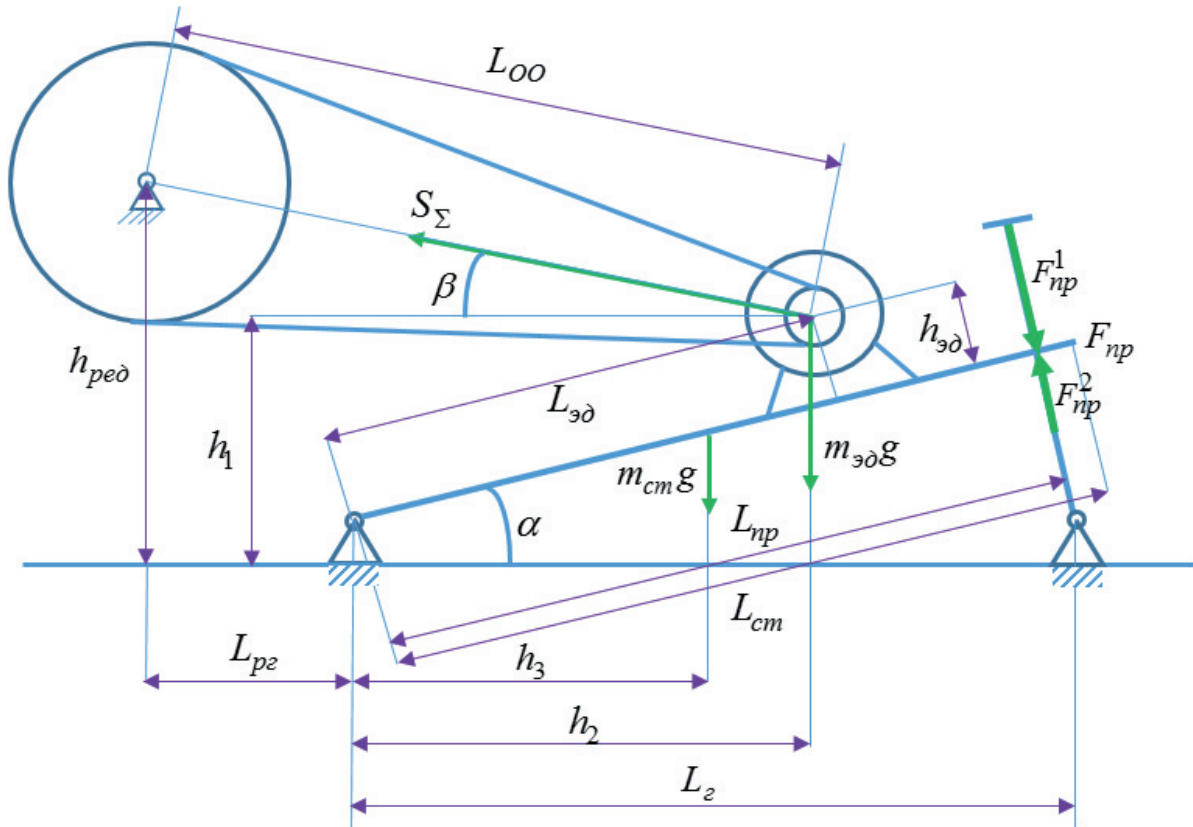


Рис. 1. Схема сил и моментов для автоматического натяжителя ремней

Fig. 1. Scheme of forces and moments of forces for the automatic belt tensioner

$$h_1 = L_{эд} \sin \alpha + h_{эд} \cos \alpha; \quad (2)$$

$$h_2 = L_{эд} \cos \alpha - h_{эд} \sin \alpha; \quad (3)$$

$$h_3 = \frac{L_{ст}}{2} \cos \alpha; \quad (4)$$

$$L_{np} = L_r \cos \alpha; \quad (5)$$

$$\sin \beta = \frac{h_{ред} - (L_{эд} \sin \alpha + h_{эд} \cos \alpha)}{L_{oo}}, \quad (6)$$

где $h_{эд}$ – кратчайшее расстояние от платформы до оси вращения шкива электродвигателя («высота» электродвигателя); L_r – расстояние по горизонтали между осями вращения платформы и упруго-деформируемой опоры; $L_{ст}$ – длина платформы; $h_{ред}$ – высота оси вращения шкива редуктора; L_{oo} – расстояние между осями вращения шкивов редуктора и электродвигателя. Подставляя выражения (2)–(6) в (1), получим:

$$\begin{aligned} & F_{np} L_r \cos \alpha - S_z (L_{эд} \cos \alpha - h_{эд} \sin \alpha) \sin \beta - \\ & - S_z (L_{эд} \sin \alpha + h_{эд} \cos \alpha) \cos \beta + \\ & + m_{эд} g (L_{эд} \cos \alpha - h_{эд} \sin \alpha) + \frac{m_{ст} g L_{ст} \cos \alpha}{2} = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

или в более общем виде:

$$F(S_z, L_{ст}, L_r, m_{эд}, m_{ст}, h_{эд}, h_{ред}, L_{oo}, \alpha, L_{эд}, F_{np}) = 0. \quad (8)$$

Уравнения (7) и (8) связывают между собой основные переменные системы: 1) заданные величины, такие как окружная сила, создаваемая силой натяжения ремней, массы электродвигателя и платформы, длина платформы, расстояния между неподвижными осями вращения платформы и упруго-деформируемой опоры и между осями вращения шкивов редуктора и электродвигателя; 2) варьируемые величины, такие как угол наклона платформы к горизонтали, положение электродвигателя на платформе, результирующая сила упругости системы пружин, действующая со стороны пружин на платформу и обеспечивающая необходимое натяжения ремней СК. На рис. 2 показано, как изменяется результирующая сила упругости системы пружин при различных значениях переменных α и $L_{эд}$.

Как видно из графика, в зависимости от угла наклона платформы перемещение электродвигателя вдоль платформы приводит к различному изменению результирующей силы упругости системы пружин, необходимой для поддержания постоянного натяжения ремней СК. При малых углах наклона платформы момент силы тяжести, связанный с собственной массой ЭД и платформы, преобладает над моментом силы, действующей на электродвигатель со стороны ремней, поэтому увеличение расстояния вдоль платформы до электродвигателя приводит к возрастанию суммарного момента

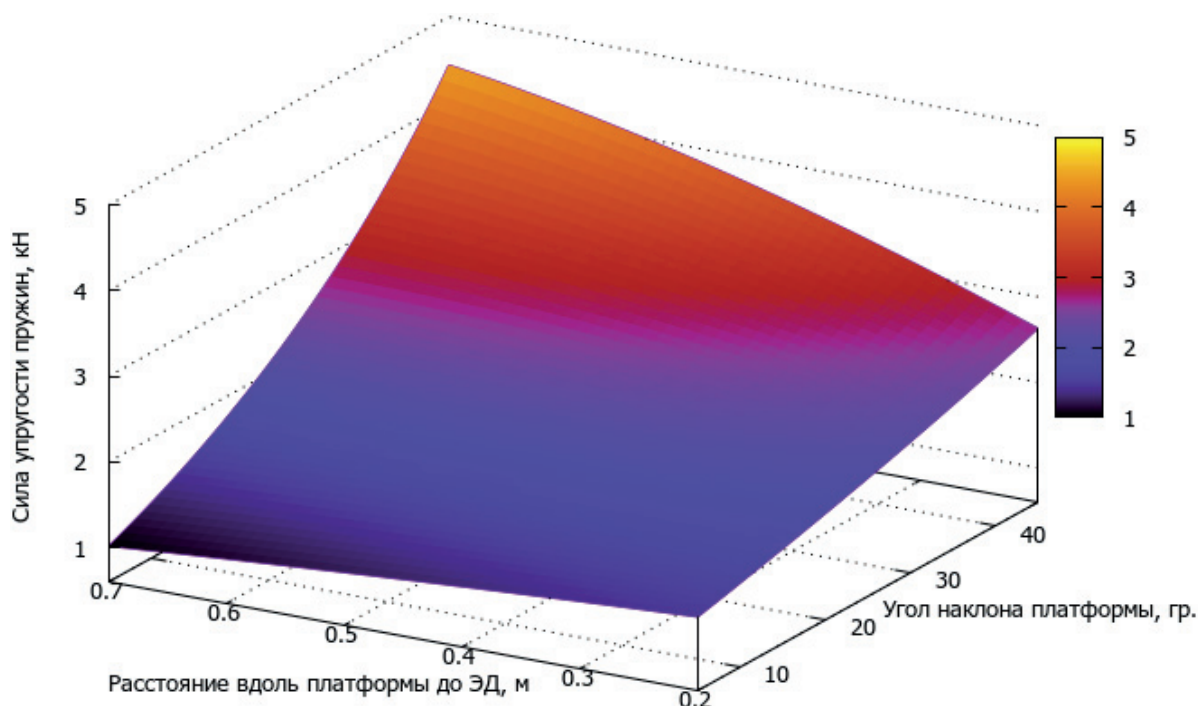


Рис. 2. Зависимость необходимой результирующей силы упругости пружины от начального значения варьируемых параметров (угла наклона платформы и положения электродвигателя на платформе)

Fig. 2. Dependence of the necessary resultant spring elasticity on the initial value of the variable parameters (the angle of inclination of the platform and the position of the motor on the platform)

этих сил. Напротив, при больших значениях угла наклона платформы момент сил тяжести оказывается недостаточным для компенсации силы, действующей на электродвигатель со стороны ремней, и с увеличением расстояния ЭД вдоль платформы необходимая результирующая сила упругости системы пружин увеличивается (рис. 3). Для угла наклона платформы 20° изменения моментов сил при увеличении расстояния от оси вращения платформы до ЭД компенсируют друг друга, и результирующая сила упругости системы пружин практически не зависит от положения ЭД на платформе.

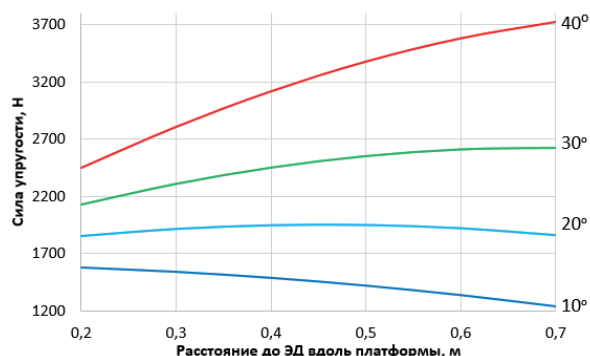


Рис. 3. Зависимость результирующей силы упругости системы пружин от положения электродвигателя на платформе при различных значениях угла наклона платформы

Fig. 3. Dependence of the resulting elastic force of the spring system on the position of the electric motor on the platform for different values of the platform inclination angle

Если задаться некоторым выбранным значением расположения электродвигателя на платформе, то изменение результирующей силы упругости системы пружин будет полностью определяться изменением угла наклона платформы (рис. 4).

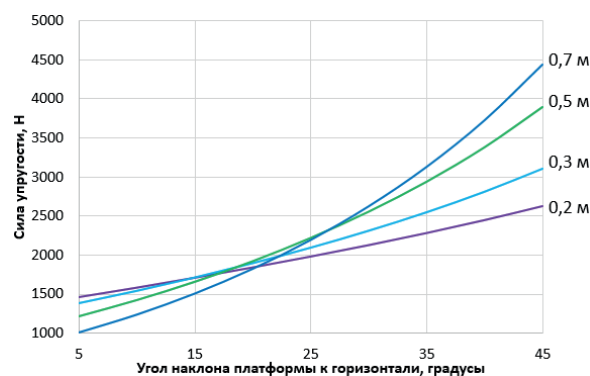


Рис. 4. Зависимость результирующей силы упругости системы пружин от угла наклона платформы при различных положениях электродвигателя на платформе

Fig. 4. Dependence of the resultant elasticity of the spring system on the platform inclination angle at different positions of the motor on the platform

Из графиков на рисунке видно, что чем дальше расположен электродвигатель на платформе, тем сильнее изменяется с углом результирующая сила упругости пружин, необходимая для поддержания постоянной величины натяжения ремней СК. В области небольших значений угла наклона плат-

формы к горизонтали (меньше 20°) более рациональным является увеличение расстояния вдоль платформы до ЭД, а для больших углов наклона (более 20°) это расстояние следует уменьшать. Таким образом, с точки зрения минимизации нагрузки пружины наиболее оптимальными являются: минимальное значения угла наклона платформы и максимальное расстояние вдоль нее до электродвигателя.

Определение области варьирования угла наклона платформы

В процессе работы привода СК происходит удлинение ремней, и начальный угол наклона платформы изменяется. Область, в которой варьируется значение угла наклона платформы, определяется исходя из величины изменения длины ремней в процессе их растяжения. В системе координат, связанной с неподвижной осью вращения шкива редуктора, координаты оси вращения шкива электродвигателя определяются как

$$\begin{cases} x(\alpha) = L_{\text{пр}} + L_{\text{эд}} \cos \alpha - h_{\text{эд}} \sin \alpha; \\ y(\alpha) = h_{\text{ред}} - L_{\text{эд}} \sin \alpha - h_{\text{эд}} \cos \alpha, \end{cases} \quad (9)$$

где $L_{\text{пр}}$ – расстояние по горизонтали от оси вращения платформы до линии, проходящей через ось вращения шкива редуктора перпендикулярно плоскости опоры.

Если принять начальное значение угла наклона платформы, при котором ремень не растянут, за α_0 и конечное значение угла наклона, при котором ремень приобрел максимальное допустимое удлинение, как α_1 , то разница расстояний между осями вращения шкивов электродвигателя в начальном и конечном положении рассчитывается с учетом (9) согласно формуле

$$\Delta L_{\text{оо}} = \sqrt{x^2(\alpha_1) + y^2(\alpha_1)} - \sqrt{x^2(\alpha_0) + y^2(\alpha_0)}. \quad (10)$$

С другой стороны, изменение положения шкива электродвигателя относительно шкива редуктора, связанное с удлинением приводного ремня, можно выразить, зная диаметры шкивов, длину ремня в нерастянутом состоянии и максимальное допустимое удлинение ремня:

$$\Delta L_{\text{оо}} = \sqrt{0,25 \left(L_{\text{р}} + \Delta l_{\text{р}} - \pi(R_{\text{эд}} + R_{\text{ред}})^2 - (R_{\text{ред}} - R_{\text{эд}})^2 \right)} - \sqrt{0,25(L - \pi(R_{\text{эд}} + R_{\text{ред}})^2 - (R_{\text{ред}} - R_{\text{эд}})^2)}, \quad (11)$$

где $R_{\text{эд}}$, $R_{\text{ред}}$ – радиусы шкивов электродвигателя и редуктора соответственно; $L_{\text{р}}$ – длина ремня в нерастянутом состоянии; $\Delta l_{\text{р}}$ – максимальное допустимое удлинение ремня [14–16].

Совместным решением (10) и (11) относительно α_1 определяется область изменения угла наклона платформы $\alpha = (\alpha_0, \alpha_1(\alpha_0))$.

На рис. 5 показано, как изменяется угол наклона платформы в зависимости от положения ЭД на платформе. Конечный угол наклона платфор-

мы, соответствующий максимальному допустимому растяжению ремней, принимается равным 5° .

Из графика видно, что минимальный начальный угол наклона платформы к горизонтали соответствует наиболее удаленному расположению ЭД на платформе, составляя $11,5^\circ$. С уменьшением расстояния до ЭД вдоль платформы начальный угол наклона платформы возрастает и равен $16,2^\circ$ для наиболее близкого расположения ЭД вдоль платформы до оси ее вращения.

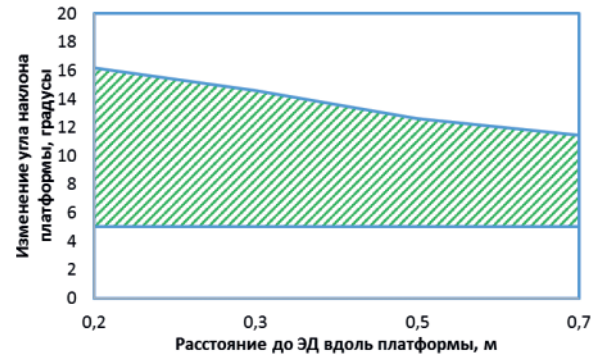


Рис. 5. Изменение угла наклона платформы в процессе растяжения ремней

Fig. 5. Changing the platform inclination angle during stretching of the belts

Расчет геометрических параметров и упругих характеристик пружин

Для нахождения результирующего коэффициента упругости системы пружин запишем в дифференциальной форме закон Гука, связывающий между собой результирующую силу упругости пружин, удлинение и жесткость [17]:

$$dF_{\text{пр}} = K_{\Sigma} dl = K_{\Sigma} L_{\text{р}} \cos \alpha \cdot d\alpha, \quad (12)$$

где K_{Σ} – коэффициент упругости системы пружин; dl – дифференциальное приращение длины пружин при изменении угла наклона платформы на $d\alpha$.

Изменение силы упругости пружин, обеспечивающее постоянное натяжение ремней СК при изменении угла наклона платформы, определяется нахождением дифференциала уравнения (7). Приравняв в нем слагаемое $dF_{\text{пр}}$ к (12), получаем уравнение для определения результирующей жесткости системы пружин. На рис. 6 показан графический расчет результирующего коэффициента упругости системы пружин. Из графиков на рисунке видно, что с увеличением расстояния, на котором расположен вдоль платформы ЭД, величина результирующей жесткости пружины, необходимая для поддержания постоянного натяжения ремней СК, увеличивается. Также следует отметить, что фактическое изменение результирующей силы упругости системы пружин с изменением угла наклона платформы отличается от величины, необходимой для поддержания постоянного натяжения ремней, поэтому для определения результирующей жесткости системы пружин необходимо

рассматривать только ту область, в которой изменяется угол наклона платформы в процессе растяжения ремней (красная сплошная линия на рис. 6). Вне этой области наблюдается расхождение кривых фактического изменения результирующей силы упругости системы пружин, имеющих линейный характер (штриховые линии на рис. 6), с нелинейными кривыми изменения силы упругости, необходимой для поддержания постоянного натяжения ремней.

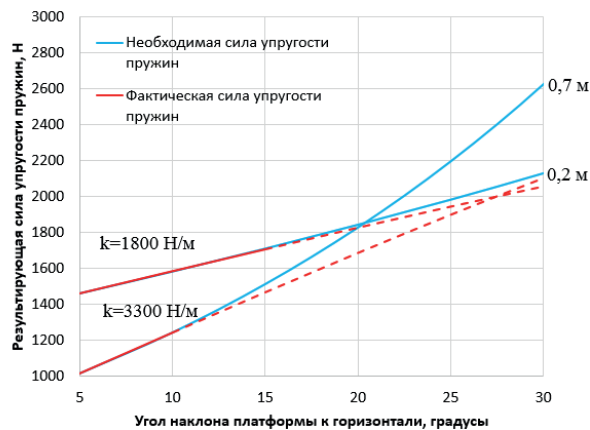


Рис. 6. Расчет результирующей жесткости системы пружин при различном положении электродвигателя на платформе

Fig. 6. Calculation of the resulting stiffness of the spring system for different positions of the motor on the platform

Для системы из двух пружин, первоначально сжатых, результирующая сила упругости записывается как

$$F_{\text{пр}} = K_1(\Delta l_{10} - \Delta l) - K_2(\Delta l_{20} + \Delta l), \quad (13)$$

где $K_1, \Delta l_{10}, K_2, \Delta l_{20}$ – коэффициенты упругости и начальные величины удлинений для верхней и нижней пружины соответственно; Δl – приращение длины пружин в процессе растяжения ремней (при уменьшении угла наклона платформы). Из (12) и (13) следует, что результирующий коэффициент упругости системы пружин связан с коэффициентами упругости отдельной пружины соотношением

$$K_{\Sigma} = K_1 + K_2 = K_1(1 + A), \quad (14)$$

где A – отношение коэффициентов упругости нижней и верхней пружины соответственно.

Дальнейший расчет пружин, входящих в компоновку автоматического натяжителя, производится для случая наибольшего расстояния вдоль платформы до электродвигателя, при котором нагруженность пружин будет минимальной. На рис. 7 показано, как изменяются коэффициенты упругости пружин в зависимости от выбранной величины соотношения жесткостей A .

Из графиков следует, что при отсутствии нижней пружины жесткость верхней пружины равна результирующей, при этом с увеличением коэффициента упругости нижней пружины жесткость верхней уменьшается.

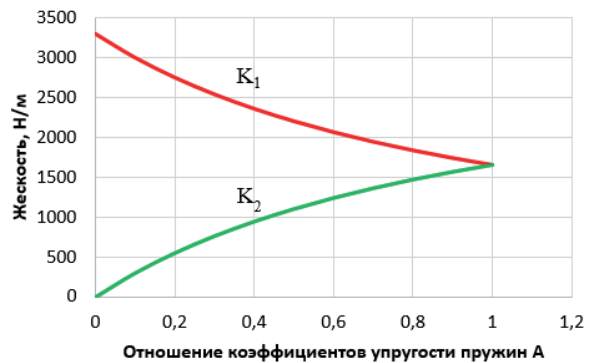


Рис. 7. Область изменения коэффициентов упругости пружин

Fig. 7. Area of change in the elasticity of springs

С учетом выбранного соотношения коэффициентов упругости пружин A из (14) определяются коэффициенты упругости верхней и нижней пружин. На основании данных по величине жесткости пружин выполняется расчет их геометрических характеристик – диаметра пружины D , диаметра проволоки d , количества витков n . Внутренний диаметр пружины подбирается с учетом того, что внутри него должен помещаться с некоторым запасом вал упруго-деформируемой опоры. При выборе диаметра проволоки необходимо учесть, что нагруженность верхней пружины больше, чем нагруженность нижней, в результате проволока для верхней пружины должна быть более жесткой и иметь больший диаметр [18, 19].

Внешний диаметр пружин определяется с учетом величины внутреннего диаметра пружин согласно выражению

$$\begin{aligned} D_1 &= D_{\text{в}} + \Delta D_1 + 2d_1; \\ D_2 &= D_{\text{в}} + \Delta D_2 + 2d_2, \end{aligned} \quad (15)$$

где $D_{\text{в}}$ – диаметр вала упруго-деформируемой опоры; ΔD – зазор между пружиной и валом.

Необходимое количество витков для верхней и нижней пружин соответственно определяется согласно формулам [20]

$$\begin{aligned} n_1 &= G_1 \frac{d_1^4}{8D_1^3k_1}; \\ n_2 &= G_2 \frac{d_2^4}{8D_2^3k_2}, \end{aligned} \quad (16)$$

где G – модуль сдвига материала пружины (зависит от марки используемой стали); k – число рабочих витков в пружине.

Силы упругой деформации пружин при начальном угле наклона платформы определяются из уравнения баланса моментов сил, изменение силы упругости пружин в процессе растяжения ремней определяется изменением величины деформации пружин согласно закону Гука.

По представленной методике, базирующейся на формулах (14)–(16), выполнен расчет, результаты которого приведены в таблице.

Таблица. Параметры верхней и нижней пружины

Table. Parameters of the upper and lower spring

Параметр/Parameter	Значение/Value of	
	верхней пружины upper spring	нижней пружины lower spring
Диаметр проволоки, мм Wire diameter, mm	6	3
Наружный диаметр пружины, мм Spring outer diameter, mm	70	65
Внутренний диаметр пружины, мм Spring internal diameter, mm	58	59
Количество витков/Turning number	18	6
Рабочая нагрузка, Н/Work load, N	1300–1500	250–300
Коэффициент жесткости, Н/м Stiffness coefficient, N/m	2750	550
Модуль сдвига материала пружины, ГПа Spring material shear module, GPa	78,5	78,5

Выводы

1. Разработана методика расчета автоматического натяжителя ремней станка-качалки, включающая расчет оптимальных значений угла наклона платформы к горизонтали, положения электродвигателя на платформе и упругих характеристик пружин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Станок-качалка с автоматическим натяжителем ремней: пат. Рос. Федерации № 163866; заявл. 05.05.2015; опубл. 10.08.2016, Бюл. № 22.
2. Жуков К.П., Гуревич Ю.Е. Проектирование деталей и узлов машин. – М.: Изд-во «Станкин», 2004. – 671 с.
3. Приводы скважинных штанговых насосов / В.П. Жулаев, К.Р. Уразаков, М.М. Ахтямов, З.З. Алиев. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2010. – 119 с.
4. Balta B., Sonmez F., Cengiz A. Speed losses in V-ribbed belt drives // Mechanism and Machine Theory. – 2015. – V. 86. – P. 1–14.
5. Алиев Т.М., Мелик-Шахназаров А.М., Тер-Хачатуров А.А. Измерительные информационные системы в нефтяной промышленности. – М.: Недра, 1991. – 351 с.
6. Хакимьянов М.И., Хусаинов Ф.Ф., Шафиков И.Н. Проблемы повышения энергетических характеристик электроприводов скважинных штанговых насосов // Электротехнические системы и комплексы. – 2017. – № 2 (35). – С. 35–40.
7. Takacs G., Gajda M. An Enhanced Model for the Design of Tapered Sucker-Rod Strings // Society of Petroleum Engineers. – 2017. – V. 32 (Iss. 01). – P. 1–6.
8. Эксплуатация скважин установками штанговых насосов на поздней стадии разработки нефтяных месторождений / В.М. Валовский, К.М. Валовский, Г.Ю. Басос, Н.Г. Ибрагимов, В.Г. Фадеев, А.В. Артюхов. – М.: Изд-во «Нефтяное хозяйство», 2016. – 592 с.
9. Bloch H.P. Petrochemical Machinery Insights. – Woburn: Butterworth-Heinemann, 2017. – 725 p.
10. Dynamic model of a Rod Pump Installation for inclined wells / R.N. Bakhtizin, K.R. Urazakov, S.F. Ismagilov, A.S. Topolnikov, F.F. Davletshin // SOCAR Proceedings. – 2017. – № 4. – P. 74–82.
2. Показано, что с точки зрения минимизации нагруженности пружин наиболее оптимальными являются: минимальное значения угла наклона платформы и максимальное расстояние вдоль нее до электродвигателя.
3. Продемонстрирован расчет коэффициентов упругости пружин, входящих в компоновку автоматического натяжителя. Результирующий коэффициент упругости системы пружин варьируется в интервале 1,8–3,3 кН/м в зависимости от положения электродвигателя вдоль платформы.
4. Рассчитаны пределы изменения угла наклона платформы в процессе растяжения приводных ремней. Начальный угол наклона платформы закономерно возрастает с уменьшением расстояния вдоль нее до электродвигателя и изменяется в пределах 11,5–16,2°.
5. Предлагаемый механизм автоматического натяжителя приводных ремней, расчет которого производится согласно представленной методике, позволит повысить эксплуатационную надежность станков-качалок путем обеспечения стабильной работы клиноременной передачи, способствует увеличению срока службы привода и поддержанию высокого КПД штанговой установки.
11. Mikhaylov V.G., Ponomarev A.I., Topolnikov A.S. Prediction of gas factor taking into account gas dissolved in the water at late stages development of oil fields // SOCAR Proceedings – 2017. – № 3. – P. 41–48.
12. Ямалиев В.У., Ишемгузин И.Е., Латыпов Б.М. Оценка силы трения плунжера о цилиндр штангового скважинного насоса при проектировании колонны штанг // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2017. – Т. 19. – № 1. – С. 70–75.
13. Ugural A.C., Fenster S.K. Advanced Strength and Applied Elasticity. – Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2003. – 560 p.
14. Ануриев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя (в 3-х т.). Т. 3. – М.: Изд-во «Машиностроение», 2001. – 864 с.
15. Bhandari V.B. Design of Machine Elements. – New York City: Tata McGraw-Hill Education, 2007. – 861 p.
16. Bhandari V.B. Introduction to Machine Design. – New York City: Tata McGraw-Hill Education, 2013. – 645 p.
17. Timoshenko S.P., James M.G. Theory of Elastic Stability. – Mineola: Dover Publications, 2009. – 560 p.
18. Уразаков К.Р. Механизированная добыча нефти (сборник изобретений). – Уфа: Изд-во «Нефтегазовое дело», 2010. – 329 с.
19. Насосные установки для малодебитных скважин / К.Р. Уразаков, В.П. Жулаев, Ф.З. Булюкова, В.А. Молчанова. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2014. – 236 с.
20. Скважинные насосные установки для добычи нефти / В.Н. Ивановский, В.И. Дарищев, А.А. Сабилов, В.С. Каштанов, С.С. Пекин. – М.: ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2002. – 824 с.

Поступила 07.11.2018 г.

Информация об авторах

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

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

Шайжанов Н.С., аспирант кафедры машин и оборудования нефтегазовых промыслов Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Тугунов П.М., аспирант кафедры машин и оборудования нефтегазовых промыслов Уфимского государственного нефтяного технического университета.

UDC 622.276.53

RESEARCH OF AN AUTOMATED SYSTEM OF TENSION OF DRIVE BELTS IN A PUMPJACK

Kamil R. Urazakov¹,

Urazakk@mail.ru

Eduard O. Timashev¹,

timashev@mail.ru

Nursultan S. Shayzhanov¹,

shaizhanov007@yandex.ru

Pavel M. Tugunov¹,

paveltugunov@gmail.com

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

Relevance. The efficiency of pumpjacks – the most common type of drive of sucker rod pumps – is largely determined by the reliability of the V-belt drive. The absence of a mechanism, which ensures optimal tension of the drive belts, causes significant energy losses in the V-belt transmission due to slippage of the belts and decrease in operating characteristics of pumping units. Currently, the control and adjustment of tension of the drive belts of the machine are carried out manually. The foregoing causes the relevance of developing the mechanisms for automatic belt tension.

The object: automatic tensioner of drive belts for pumpjack using the principle of adjusting the interaxle distance pulleys by changing the inclination angle of the platform with installed motor. Adjustment of the angle of inclination is achieved by the joint operation of compression springs of different rigidity. The spring of greater rigidity due to the force of the elastic compression deformation provides tension of the belts, the spring of less rigidity is designed to compensate fluctuations in the system.

The aim of the research is to study an automated system of tension of drive belts, develop a technique for calculating the automatic belt tensioner of the pumpjack, which includes determining the optimal value of the platform's inclination to the horizontal, the position of electric motor on the platform, and the elastic characteristics of the springs.

Methods: application of the principles of analytical mechanics, differential calculus for counting optimal values of automatic tension parameters.

Results. The author have developed the technique for calculating the automatic tensioner for the drive belt of a pumpjack, which makes it possible to maintain the optimum tension of the belts during operation of the sucker rod pump system. The optimum values of the initial inclination angle of the platform, the position of the electric motor on the platform, the limits of variation in the platform inclination angle during the stretching of the belts are calculated. It is shown that from the point of view of minimizing the load on the spring, the optimal values are the minimum platform inclination angle and the maximum distance along it to the electric motor. The authors calculated the compression springs included in the automatic tensioner arrangement, and determined the optimum values of the elasticity coefficients of the springs.

Key words:

Pumpjack, drive belt, belt tension, automatic tensioner, compression spring, coefficient of spring stiffness.

REFERENCES

1. Urazakov K.R., Zotov A.N., Shayzhanov N.S., Akhtyamov M.M. *Stanok-kachalka s avtomaticheskimi natyazhitelem remney* [Pumpjack with automatic belt tensioner]. Patent RF, no. 163866, 2015.
2. Zhukov K.P., Gurevich Yu.E. *Proektirovanie detaley i uzlov mashin* [Design of machine parts and components]. Moscow, Stankin Publ., 2004. 671 p.
3. Zhulaev V.P., Urazakov K.R., Akhtyamov M.M., Aliev Z.Z. *Prirody skvazhinnykh shtangovykh nasosov* [Drives of sucker rod pumps]. Ufa, UGNTU Publ., 2010. 119 p.
4. Balta B., Sonmez F., Cengiz A. Speed losses in V-ribbed belt drives. *Mechanism and Machine Theory*, 2015, vol. 86, pp. 1–14.
5. Aliev T.M., Melik-Shakhnazarov A.M., Ter-Khachaturov A.A. *Izmeritelnye informatsionnye sistemy v neftyanoy promyshlennosti* [Measuring information systems in the oil industry]. Moscow, Nedra Publ., 1991. 351 p.
6. Khakimyanov M.I., Khusainov F.F., Shafikov I.N. Problems of increasing the energy characteristics of electric drives of borehole rod pumps. *Electrotechnical systems and complexes*, 2017, no. 2 (35), pp. 35–40. In Rus.
7. Takacs G., Gajda M. An Enhanced Model for the Design of Tapered Sucker-Rod Strings. *Society of Petroleum Engineers*, 2017, vol. 32 (Iss. 01), pp. 1–6.
8. Valovskii V.M., Valovskii K.M., Basos G.Yu., Ibragimov N.G., Fadeev V.G., Artyukhov A.V. *Ekspluatatsiya skvazhin ustanovkami shtangovykh nasosov na pozdney stadii razrabotki neftyannykh mestorozhdeniy* [Well operation by installation of rod pumps in the late stages of development of oil fields]. Moscow, Neftyanoe khozyaistvo Publ., 2016. 592 p.
9. Bloch H.P. *Petrochemical Machinery Insights*. Woburn, Butterworth-Heinemann Publ., 2017. 725 p.
10. Bakhtizin R.N., Urazakov K.R., Ismagilov S.F., Topol'nikov A.S., Davletshin F.F. Dynamic model of a Rod Pump Installation for inclined wells. *SOCAR Proceedings*, 2017, no. 4, pp. 74–82.
11. Mikhaylov V.G., Ponomarev A.I., Topolnikov A.S. Prediction of gas factor taking into account gas dissolved in the water at late stages development of oil fields. *SOCAR Proceedings*, 2017, no. 3, pp. 41–48.
12. Yamaliev V.U., Ishemzhuzhin I.E., Latypov B.M. Evaluation of the frictional force of a plunger on the cylinder of a sucker-hole

- pump in the design of a rod string. *Izvestiya Samara Scientific Center, Russian Academy of Sciences*, 2017, vol. 19, no. 1, pp. 70–75. In Rus.
13. Ugural A.C., Fenster S.K. *Advanced Strength and Applied Elasticity*. Upper Saddle River, Prentice-Hall Publ., 2003. 560 p.
 14. Anuryev V.I. *Spravochnik konstruktora-mashinostroitelya* [Handbook of the designer-machine builder]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2001. Vol. 3, 864 p.
 15. Bhandari V.B. *Design of Machine Elements*. New York, City Tata McGraw-Hill Education Publ., 2007. 861 p.
 16. Bhandari V.B. *Introduction to Machine Design*. New York City, Tata McGraw-Hill Education Publ., 2013. 645 p.
 17. Timoshenko S.P., James M.G. *Theory of Elastic Stability*. Mineola, Dover Publications Publ., 2009. 560 p.
 18. Urazakov K.R. *Mekhanizirovannaya dobycha nefi (sbornik izobretenii)* [Mechanized oil production (collection of Inventions)]. Ufa, Neftegazovoe delo Publ., 2010. 329 p.
 19. Urazakov K.R., Zhulaev V.P., Bulyukova F.Z., Molchanova V.A. *Nasosnye ustanovki dlya malodebitnykh skvazhin* [Pumping installations for low-yield wells]. Ufa, UGNTU Publ., 2014. 236 p.
 20. Ivanovskii V.N., Darishchev V.I., Sabirov A.A., Kashtanov V.S., Pekin S.S. *Skvazhinnye nasosnye ustanovki dlya dobychi nefi* [Downhole pumping units for oil production]. Moscow, GUP «Neft i gaz» RGU nefi i gaza im. I.M. Gubkina Publ., 2002. 824 p.

Received: 7 November 2018.

Information about the authors

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

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

Nursultan S. Shayzhanov, post-graduate student, Ufa State Petroleum Technological University.

Pavel M. Tugunov, post-graduate student, Ufa State Petroleum Technological University.

УДК 621.31

ПОЛИКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ УСТОЙЧИВОСТИ УЗЛОВ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ НЕФТЕДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Лосев Федор Алексеевич¹,
fedor_los@mail.ru

Сушков Валерий Валентинович²,
sushkovvv@gray-nv.ru

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

² Нижневартковский государственный университет,
Россия, 628600, г. Нижневартковск, ул. Ленина, 56.

Актуальность. Работоспособность технологических систем нефтяного месторождения напрямую зависит от надежности электроснабжения. Наиболее частыми нарушениями электроснабжения являются провалы и прерывания напряжения, которые могут привести к потере устойчивости узлов электродвигательной нагрузки, что ведет к экономическим потерям нефтедобывающего предприятия. Для повышения устойчивости узлов нагрузки могут применяться различные устройства, например динамические компенсаторы искажений напряжения и источники бесперебойного питания, также устойчивость позволяет повысить правильная настройка устройств автоматического восстановления питания потребителей, однако при этом необходимо учитывать степень независимости источников питания.

Цель: разработать поликритериальный подход к анализу мероприятий по повышению устойчивости узлов электродвигательной нагрузки нефтедобывающих предприятий, учитывающий экономические и технические факторы.

Объекты: узел электродвигательной нагрузки, устройства повышения устойчивости узлов нагрузки.

Методы: математическое моделирование работы узлов электродвигательной нагрузки при провалах и прерываниях напряжения; математическое моделирование устройств повышения устойчивости узлов нагрузки; оценка экономической эффективности мероприятий по повышению устойчивости узлов нагрузки.

Результаты. Для анализа мероприятий по повышению устойчивости узлов электродвигательной нагрузки предложен поликритериальный подход, позволяющий учитывать как экономические, так и технические факторы. Для оценки технических факторов предложено использовать коэффициент запаса устойчивости по напряжению и коэффициент зависимости источников питания, для оценки экономических факторов – коэффициент экономической эффективности капитальных вложений. Проведен анализ эффективности применения динамических компенсаторов искажений напряжения и быстродействующего автоматического ввода резерва для повышения устойчивости узлов нагрузки кустовых насосных станций и кустов скважин.

Ключевые слова:

Повышение устойчивости узлов нагрузки, граница динамической устойчивости, динамический компенсатор искажений напряжения, быстродействующий автоматический ввод резерва, кустовая насосная станция.

Введение

Нефтяное месторождение включает ряд взаимозависимых технологических систем, которые обеспечивают нефтедобычу, например, система добычи, сбора, подготовки и транспорта нефти, система поддержания пластового давления (ППД) [1]. Каждая технологическая система электрифицирована и зависит от работоспособности системы электроснабжения [2].

Одним из наиболее частых нарушений электроснабжения являются провалы и прерывания напряжения, которые могут привести к потере устойчивости узла электродвигательной нагрузки и к большому недоотпуску продукции и, соответственно, к экономическим потерям. Для предотвращения подобной ситуации применяют различные устройства для повышения устойчивости узла электродвигательной нагрузки, например, динамические компенсаторы искажений напряжения (ДКИН), источники бесперебойного питания

(ИБП) [3, 4] и т. д. ДКИН обладает высокой скоростью срабатывания, но время его работы ограничено. ИБП лишен технических ограничений ДКИН по времени работы, но имеет большую стоимость. В этом случае необходимо также учитывать степень независимости источников питания и надежность срабатывания устройств восстановления питания потребителей путем автоматического присоединения резервного источника питания при отключении рабочего источника питания, таких как автоматический ввод резерва (АВР) и быстродействующий автоматический ввод резерва (БАВР). Таким образом, проблема повышения устойчивости узла электродвигательной нагрузки имеет два аспекта – технический и экономический, тогда разработка поликритериального подхода к анализу мероприятий по повышению устойчивости узлов электродвигательной нагрузки нефтедобывающих предприятий является актуальной.

Поликритериальный подход

Экономический подход включает определение капитальных затрат на мероприятия по повышению устойчивости и экономического эффекта, вызванного этими мероприятиями.

Для оценки эффективности мероприятий по повышению устойчивости узлов нагрузки предлагается использовать коэффициент экономической эффективности капитальных вложений [5]:

$$K_э = \frac{\mathcal{E}_t}{\mathcal{Z}}, \quad (1)$$

где $\mathcal{Z}$ – капитальные вложения в мероприятия по повышению устойчивости; $\mathcal{E}_t$ – экономический эффект от повышения устойчивости, достигаемый в течение 1 года.

Капитальные вложения в мероприятия по повышению устойчивости:

$$\mathcal{Z} = \mathcal{Z}_i - \mathcal{Z}_б,$$

где $\mathcal{Z}_б$ – капитальные вложения при базовом варианте электроснабжения; $\mathcal{Z}_i$ – капитальные вложения при предлагаемом варианте электроснабжения с повышением устойчивости узлов электродвигательной нагрузки.

Потеря устойчивости узла электродвигательной нагрузки приводит к полному или частичному простоем потребителей, что ведет к недоотпуску продукции (нефти), простоем основных фондов. Для устранения негативных последствий простоя применяют форсированные режимы работы технологического оборудования (включение резервных насосных агрегатов для выполнения плана по закачке воды в нефтяной пласт, например, на кустовых насосных станциях (КНС)). Сокращение времени форсировки ведет к снижению повышенного потребления электроэнергии [2] за время форсирования режима работы насосных агрегатов. Таким образом, можно принять, что экономический эффект в данном случае будет равен величине снижения экономического ущерба при проведении мероприятий по повышению устойчивости узла электродвигательной нагрузки. В общем виде примем, что экономический эффект имеет следующие составляющие: снижение упущенной прибыли из-за недоотпуска продукции $\mathcal{E}_{t1}$, уменьшение потребления электроэнергии за счет работы оборудования в форсированных режимах $\mathcal{E}_{t2}$ и снижение условно-постоянных расходов в себестоимости нефти $\mathcal{E}_{t3}$:

$$\mathcal{E}_t = \mathcal{E}_{t1} + \mathcal{E}_{t2} + \mathcal{E}_{t3}.$$

Снижение упущенной прибыли из-за недоотпуска продукции определяется разностью ущербов от остановки технологии при базовом и предлагаемом вариантах электроснабжения (с устройствами по повышению устойчивости). При строительстве новых объектов за базовый вариант принимаются типовые схемы подстанций, типовое оборудование. При модернизации объектов базовым вариантом выступает существующая система электроснабжения. Тогда первая составляющая экономического эффекта равна

$$\mathcal{E}_{t1} = Y_{16} - Y_{1i},$$

где Y_{16} – ущерб от остановки производства при базовом варианте электроснабжения без устройств по повышению устойчивости; Y_{1i} – ущерб от остановки производства при предлагаемом варианте электроснабжения с устройствами по повышению устойчивости узлов электродвигательной нагрузки.

Тогда ущерб, обусловленный потерей прибыли нефтедобывающего предприятия за год, равен

$$Y_1 = Q(\Pi - C_n),$$

где Π – оптовая цена нефти, р/м³; C_n – себестоимость нефти, р/м³

Годовые потери продукции, вызванные потерей устойчивости узлов нагрузки, определяются [6]:

- для насосных скважин

$$Q = t_n \sum_{i=1}^n q_i,$$

где t_n – время простоя за год по причине потери устойчивости, ч; q_i – дебит отдельных скважин по нефти, м³/ч; n – количество эксплуатационных скважин.

- для КНС, водозабора

$$Q = \frac{Q_{\Sigma} t_n (1 - b_{cp})}{K_{ac} K},$$

где b_{cp} – средняя обводненность продукции по способам эксплуатации; K_{ac} – коэффициент учета замороженных скважин; K – отношение объема закачиваемой воды к объему добываемой жидкости.

Экономический эффект, обусловленный снижением потребления электроэнергии за счет уменьшения времени работы оборудования в форсированных режимах, определяется разницей затрат на электрическую энергию при базовом и предлагаемом вариантах электроснабжения:

$$\mathcal{E}_{t2} = \mathcal{Z}_{16} - \mathcal{Z}_{1i},$$

где $\mathcal{Z}_{16}$ – затраты на электроэнергию в форсированных режимах работы оборудования при базовом варианте электроснабжения; $\mathcal{Z}_{1i}$ – затраты на электроэнергию в форсированных режимах работы оборудования при предлагаемом варианте электроснабжения с повышением устойчивости узлов электродвигательной нагрузки.

Расчет потребления электроэнергии, например для КНС, основан на определении продолжительности работы насосного блока в форсированном режиме по следующей методике [6]:

1. Время простоя за год

$$t_n = T_{np} N,$$

где N – ожидаемое количество отключений КНС; T_{np} – время простоя при отключении КНС.

2. Потери продукции при закачке, перекачке

$$Q_{prod} = Q_{\Sigma} t_n,$$

где Q – суммарная производительность насосного блока в нормальном режиме.

3. Производительность насосного блока при включении резервных насосов в послеаварийном режиме

$$Q_{п.а} = Q_n (n_{осн} + K_n n_{рез}) K_{пр},$$

где Q_n – производительность насоса в нормальном режиме; $n_{осн}$ – число рабочих насосов; $n_{рез}$ – число резервных насосов; K_n – коэффициент использования резервных насосов; $K_{пр}$ – коэффициент, учитывающий снижение производительности насоса при включении дополнительных агрегатов.

4. Продолжительность работы насосного блока для ликвидации последствий отключения КНС

$$t_{п.а} = \frac{Q_{прод}}{Q_{п.а} - Q_{\Sigma}}.$$

5. Дополнительные энергозатраты

$$W = K_n n_{рез} P_n K_{\Sigma} t_{п.а},$$

где P_n – номинальная мощность электродвигателей насосов; K_{Σ} – коэффициент загрузки электродвигателей насосов.

Далее определяются экономические затраты на электроэнергию, например, для двухставочного тарифа

$$Z_1 = W \left(\frac{\alpha}{T_m} + \beta \right),$$

где α – тариф за максимум заявленной мощности, р/кВт; β – тариф за потребленную электроэнергию, р/кВт·ч; T_m – число часов использования максимума нагрузки, ч/год.

Экономический эффект от снижения условно-постоянных расходов в себестоимости нефти будет намного меньше, чем эффект от снижения упущенной прибыли и эффект от снижения потребления электроэнергии в форсированных режимах работы. Уменьшение времени простоя оборудования из-за потери устойчивости узлов нагрузки позволит уменьшить условно-постоянные расходы, но они в большей степени обусловлены следующими факторами: амортизация скважин и прочих основных средств, цеховые и общепромысловые расходы, заработная плата, расходы на освоение и подготовку новых скважин [7]. Таким образом, при оценке экономического эффекта от повышения устойчивости узлов нагрузки нефтедобывающих предприятий пренебрегаем снижением условно-постоянных расходов в себестоимости нефти из-за его малого влияния на общий экономический эффект.

Мероприятия по повышению устойчивости представляют собой инвестиционный проект, одним из основных факторов которого является дисконтированный срок окупаемости. Это период возврата денежных средств с учетом временной стоимости денег (ставки дисконта) [7]. В электроэнергетике дисконтированный срок окупаемости для эффективных проектов составляет 5–8 лет [8]. При повышении устойчивости узлов электродвигательной нагрузки экономический эффект достигается за счет сокращения времени простоя оборудования из-за аварийных отключений, возникающих при потере устойчивости [9, 10]. Таким образом, выражение для определения экономического

эффекта повышения устойчивости узлов нагрузки с учетом дисконтирования имеет вид [7]:

$$\Delta = \sum_{t=1}^T (\Delta_t - Z_t) \frac{1}{(1+E)^t}, \quad (2)$$

где Δ_t – экономический эффект в t -м году; Z_t – затраты, осуществляемые в t -м году; T – количество лет; E – ставка дисконта.

Для объектов электроэнергетики затраты в первом расчетному году состоят из капитальных и эксплуатационных затрат, в последующие годы остаются только эксплуатационные затраты, которые включают расходы на ремонт и обслуживание оборудования, а также амортизационные отчисления. Согласно [8], ежегодные издержки на ремонты и обслуживание элементов электрической сети напряжением 6–35 кВ составляют 4 % капитальных затрат, амортизационные отчисления для электрических сетей напряжением 6–35 кВ в среднем составляют 6 %. С учетом вышесказанного упростим выражение (2):

$$\Delta = -Z + \sum_{t=1}^T (\Delta_t - 0,13) \frac{1}{(1+E)^t}. \quad (3)$$

Подставив (1) в (3) и упростив, получаем выражение для экономического эффекта повышения устойчивости, включающее только капитальные вложения и коэффициент их экономической эффективности:

$$\Delta = -Z + 3 \sum_{t=1}^T (K_{\Sigma} - 0,1) \frac{1}{(1+E)^t}.$$

Для определения граничных значений коэффициента экономической эффективности капитальных вложений в мероприятия по повышению устойчивости узлов нагрузки ставка дисконта принималась равной 0,1, дисконтированный срок окупаемости 5 лет:

$$\begin{cases} \Delta = -Z + 3 \sum_{t=1}^5 K(K_{\Sigma} - 0,1) \frac{1}{1,1^t}; \\ \Delta > 0. \end{cases}$$

Далее раскрыли знак суммы и получили выражение:

$$-Z + 3(K_{\Sigma} - 0,1) \cdot 3,79 > 0.$$

После математических преобразований получено следующее неравенство

$$K_{\Sigma} > 0,364.$$

Таким образом, при значении коэффициента экономической эффективности капитальных вложений больше 0,364 мероприятия по повышению устойчивости узлов нагрузки окупятся за срок не более 5 лет при ставке дисконта 0,1, следовательно, их можно рекомендовать к внедрению.

Технический подход включает в себя определение ожидаемого годового числа отключений потребителей, вызванных провалами и прерываниями напряжения, с учетом коэффициента зависимости источников питания. Ожидаемое количество про-

валов и прерываний напряжения, приводящих к потере устойчивости, определяется следующим образом:

1. Определяется ГДУ выбранного узла электродвигательной нагрузки с учетом несимметричных провалов напряжения [11]. Для этого составляется схема замещения в неподвижной относительно ротора электродвигателя системе координат $d-q$, состоящая из: схем замещения электродвигателей, схем замещения линий электропередачи, схем замещения трансформаторов и схемы замещения внешней системы электроснабжения [12–14]. Для оценки влияния несимметричных провалов напряжения производится их разложение на симметричные составляющие, затем моделируется выбег электродвигателей под воздействием напряжения прямой и обратной последовательностей в течение длительности провала напряжения. Далее моделируется самозапуск электродвигателей при восстановлении напряжения системы до номинального значения. Если самозапуск успешный, то увеличивается длительность провала напряжения, если неуспешный, то значение длительности и глубины определяют точку на ГДУ и цикл повторяется.

2. Определяется ожидаемое годовое количество отключений потребителей, вызванных провалами и прерываниями напряжения с заданным распределением их количества в координатах глубины и длительности на основе метода [15]. Для оценки используется статистическое распределение провалов и прерываний напряжения для смешанных (кабельных и воздушных) сетей, приведенное в ГОСТ 32144 [16], также может использоваться распределение провалов и прерываний напряжения, полученное на основе измерений на рассматриваемом энергетическом объекте. Полученное распределение строится в виде поверхности нормированного среднегодового количества возмущений, затем рассчитывается объем, ограниченный поверхностью нормированного количества возмущений и плоскостями времени ввода резерва и кривой динамической устойчивости.

3. Коэффициент зависимости источников определяется по методике, описанной в [17]. На первом этапе создается математическая модель сети внешнего электроснабжения, затем во всех узлах схемы моделируются трехфазные короткие замыкания и фиксируются значения остаточных напряжений на шинах низшего напряжения рассматриваемого узла электродвигательной нагрузки. Далее определяются узлы, короткие замыкания в которых привели к глубоким провалам напряжения (остаточное напряжение меньше напряжения статической устойчивости узла нагрузки) на первой секции шин, на второй секции шин и на двух секциях шин одновременно. На следующем этапе по параметрам потока отказа линий электропередачи определяется количество отказов для каждого узла электрической сети внешнего электроснабжения и рассчитывается коэффициент зависимости источников питания по выражению:

$$K_a = \frac{N_{1,2}}{N_1 + N_2 - N_{1,2}},$$

где N_1 – число критических провалов напряжения на первом ИП за время наблюдения T ; N_2 – число критических провалов напряжения на втором ИП за время наблюдения T ; $N_{1,2}$ – число одновременных критических провалов напряжения на обоих ИП за время наблюдения T .

4. Учитывается влияние степени независимости источников питания на ожидаемое годовое количество отключений потребителей из-за потери устойчивости узла электродвигательной нагрузки. Коэффициент зависимости K_a представляет собой вероятность провала напряжения на двух источниках питания одновременно [17], следовательно, чем меньше коэффициент зависимости источников, тем больше вероятность срабатывания АВР и БАПР, и наоборот. Также для непрерывных производств коэффициент зависимости источников питания относительно трехфазных коротких замыканий не должен превышать 0,5 [17].

При применении на подстанции БАПР возможны ситуации, при которых все виды провалов напряжения устраняются за счет переключения на резервный источник за доли секунды, тогда ожидаемое количество отключений потребителя из-за потери устойчивости, определенное по многомерному показателю устойчивости, будет равно нулю. Это условие выполнится только в случае стопроцентного срабатывания БАПР и при полной независимости источников питания, что на практике не встречается.

Таким образом, с учетом независимости источников питания ожидаемое годовое количество отключений потребителей, вызванных провалами напряжения с заданным распределением их количества в координатах глубины и длительности, предлагается использовать следующее выражение:

$$N = \begin{cases} N_0 K_a, & \text{если } N_{\pi} = 0 \text{ или } K_a > 0,5; \\ \frac{N_{\pi}}{1 - K_a}, & \text{если } K_a \leq 0,5, \end{cases}$$

где N_0 – ожидаемое количество провалов напряжения, приводящих к нарушению устойчивости узлов нагрузки, в системе электроснабжения потребителя согласно статистическим данным; N_{π} – ожидаемое количество отключений потребителей, рассчитанное по многомерному показателю устойчивости.

Результаты экспериментов

Для апробации предложенного поликритериального подхода были выбраны два устройства для повышения устойчивости узлов электродвигательной нагрузки: БАПР и ДКИН, которые являются наиболее эффективными техническим решениями для объектов нефтедобычи [18].

Для оценки влияния данных устройств на узел электродвигательной нагрузки использовался ко-

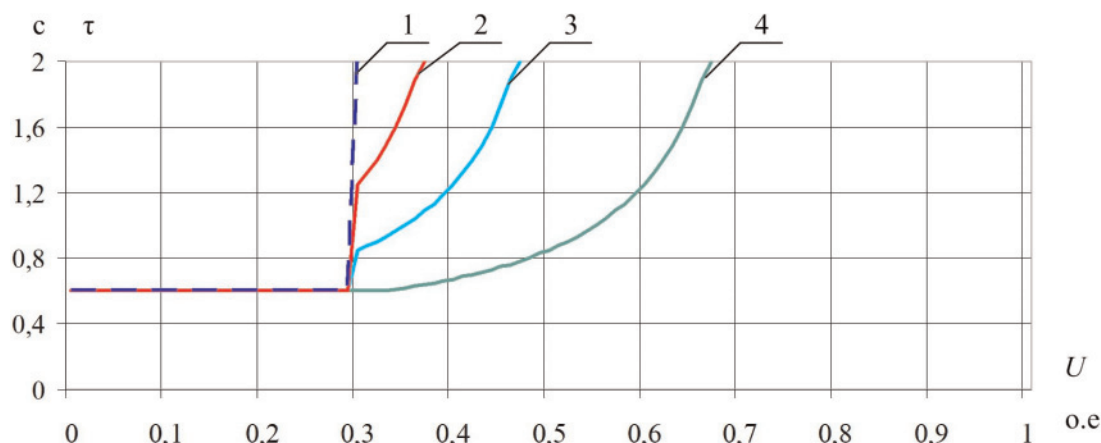


Рис. 1. Границы динамической устойчивости узла нагрузки КНС с электродвигателями серии АРМ мощностью 1250 кВт, напряжением 6 кВ при использовании: 1) ДКИН 40 %, 2) ДКИН 30 %, 3) ДКИН 20 %, 4) без ДКИН

Fig. 1. Dynamic stability curves of the sectional pump station with electric motors ARM series with power of 1250 kW, voltage of 6 kV when using: 1) DVR 40 %, 2) DVR 30 %, 3) DVR 20 %, 4) without DVR

эффицент запаса устойчивости по напряжению, который определяется по выражению [19]:

$$K_{\text{з}} = \frac{S_{\text{уст}}}{S_{\text{общ}}},$$

где $S_{\text{уст}}$ – площадь области устойчивой работы, ограниченная границей динамической устойчивости и единицей по оси напряжения; $S_{\text{общ}}$ – площадь области, ограниченная единицей по оси напряжения и временем ввода резерва $t_{\text{пр}}$ по оси длительности провала напряжения.

ДКИН обеспечивает компенсацию провалов напряжения глубиной до 70 % длительностью до 30 секунд, при этом данные устройства отличаются по степени компенсации провалов напряжения от 20 до 60 % от номинального значения [20–25]. Для определения наиболее эффективного ДКИН по степени компенсации было проведено моделирование для узла нагрузки КНС с электродвигателями серии АРМ мощностью 1250 кВт напряжением 6 кВ и получены ГДУ (рис. 1).

В качестве электрической сети внешнего электроснабжения использовалась схема питания потребителей первой категории по надежности электроснабжения, включающая подстанции напряжением 110/35/6 кВ и 35/6 кВ, коэффициент зависимости источников для которой равен 0,29. Ожидаемое количество провалов и прерываний напряжения на шинах узла нагрузки было принято равным 4, распределение провалов было принято согласно ГОСТ 32144 [16]. На основании принятых данных был проведен анализ применения ДКИН для повышения устойчивости узла нагрузки КНС (табл. 1).

Для типовой схемы электроснабжения КНС коэффициент запаса устойчивости по напряжению равен 0,6, при применении ДКИН 20 % коэффициент запаса повысился до 0,73, при ДКИН 30 % – до 0,78 и при ДКИН 40 % – до 0,8 (табл. 1). Дальнейшее увеличение глубины компенсации не дает

роста запаса устойчивости по напряжению, так как рассматриваемые ДКИН не работают при остаточных напряжениях менее 30 % [20–25]. Для каждого типа ДКИН был рассчитан коэффициент экономической эффективности капитальных вложений, а также были построены графики ущерба, обусловленного упущенной прибылью предприятия, и капитальных затрат (рис. 2) относительно базового значения, принятого равным 70 млн р.

Таблица 1. Анализ применения ДКИН для повышения устойчивости узла нагрузки КНС с электродвигателями серии АРМ мощностью 1250 кВт, напряжением 6 кВ

Table 1. Analysis of DVR using for increasing electromotive loading stability of the sectional pump station with electric motors ARM series with power of 1250 kW voltage of 6 kV

Тип устройства Device type	Коэффициент запаса устойчивости по напряжению Voltage stability reserve coefficient	Коэффициент зависимости источников питания Power supplies dependence coefficient	Коэффициент экономической эффективности капитальных вложений Investment efficiency coefficient
Без ДКИН Without DVR	0,6	0,29	–
ДКИН/DVR 20 %	0,73	0,29	0,91
ДКИН/DVR 30 %	0,78	0,29	0,64
ДКИН/DVR 40 %	0,8	0,29	0,49

Согласно результатам расчета (табл. 1), для ДКИН 20 % коэффициент экономической эффективности капитальных вложений равен 0,91, для ДКИН 30 % – 0,64, для ДКИН 40 % – 0,49. Данная зависимость связана со значительным ростом капитальных вложений при увеличении глубины компенсации ДКИН, вызывающей незначительное снижение ущерба. Таким образом, наиболее эффективной степенью компенсации ДКИН явля-

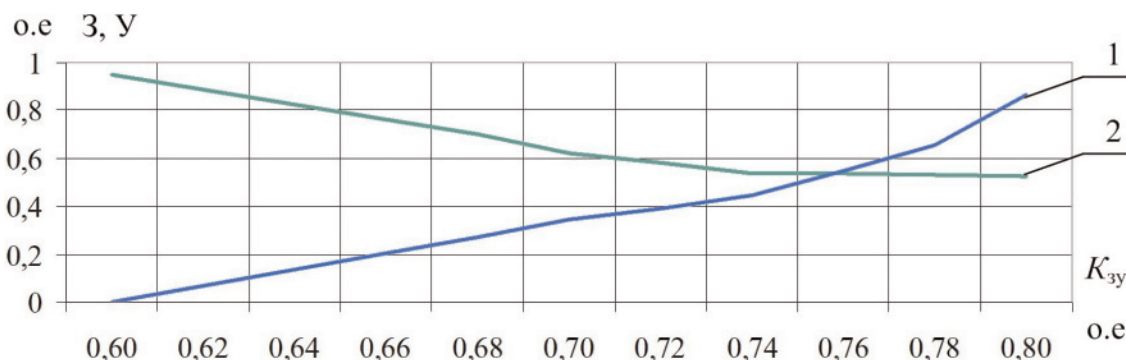


Рис. 2. 1) Зависимость капитальных затрат от коэффициента запаса устойчивости по напряжению при использовании ДКИН; 2) зависимость ущерба при потере устойчивости узла нагрузки от коэффициента запаса устойчивости по напряжению при использовании ДКИН

Fig. 2. 1) Capital investments dependences on voltage stability reserve coefficient when using DVR; 2) loss loading stability economic damage dependences on voltage stability reserve coefficient when using DVR

ется 20 % для КНС с электродвигателями серии АРМ мощностью 1250 кВт напряжением 6 кВ.

Далее рассматривались варианты установки БАПР и ДКИН 20 % на узел нагрузки КНС различной производительности и на узел нагрузки добывающих скважин с установками электрических центробежных насосов (УЭЦН) различной производительности. Для повышения точности моделирования погружного асинхронного электродвигателя можно использовать программно-аппаратные комплексы мониторинга параметров УЭЦН [26, 27]. Установка БАПР на узел нагрузки позволяет устранять все виды провалов и прерываний напряжения за счет быстрого переключения на резервный источник питания, при этом коэффициент запаса устойчивости по напряжению равен 1. Для оценки эффективности ДКИН использовались ГДУ КНС (рис. 1) и кустов скважин (рис. 3). Схема внешнего электроснабжения и распределения провалов напряжения по длительности и глубине была принята неизменной для всех расчетов. Для узлов нагрузки КНС и кустов скважин были рассчитаны технические и экономические показатели мероприятий по повышению устойчивости (табл. 2).

Таблица 2. Анализ мероприятий по повышению устойчивости узлов электродвигательной нагрузки объектов нефтедобывающего предприятия

Table 2. Analysis of actions for increasing electromotive loading stability of the oil-extracting enterprises facilities

Объект Facility	Производительность Productivity	Мероприятие по повышению устойчивости Action for increasing loading stability	Коэффициент запаса устойчивости по напряжению Voltage stability reserve coefficient	Коэффициент зависимости источников питания Power supplies dependence coefficient	Коэффициент экономической эффективности капитальных вложений Investment efficiency coefficient
КНС/Sectional pump station	Q=200 м³/ч	БАПР/HSATE ДКИН/DVR 20 %	1	0,29	0,58
			0,73		0,59
	Q=720 м³/ч		1		1,74
Кусты скважин Well clusters	Q=1890 м³/ч		0,73		0,91
			1		2,23
			0,73		0,95
	Q=0,5 т/ч		1		0,01
			0,54		0,03
	Q=2,5 т/ч		1		0,07
			0,54		0,1
	Q=5 т/ч		1		0,15
			0,54		0,19

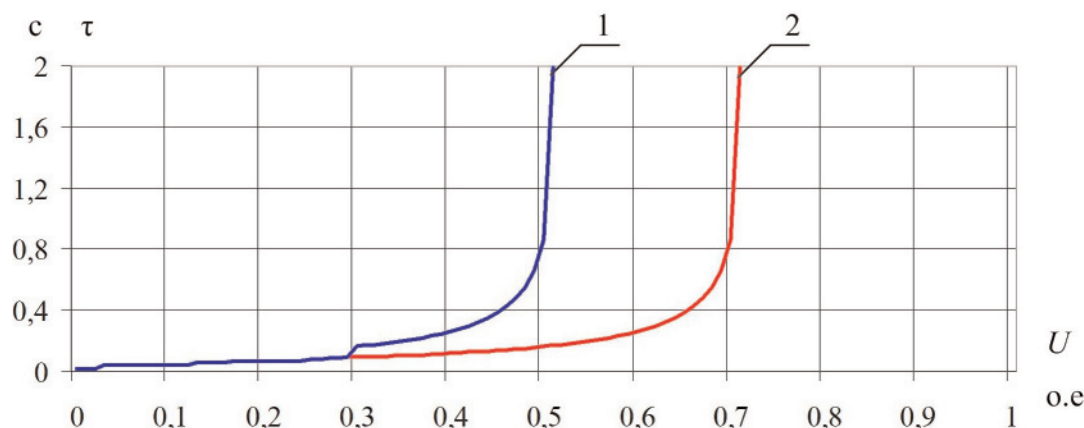


Рис. 3. Границы динамической устойчивости куста скважин: 1 – с применением ДКИН 20 %, 2 – исходная

Fig. 3. Dynamic stability curves of the well cluster: 1) when using DVR 20 %, 2) original

Согласно результатам расчета (табл. 2), повышение устойчивости кустов скважин производительностью от 0,5 до 5 т/ч с помощью БАВР и ДКИН не является экономически целесообразным, т. к. коэффициент экономической эффективности капитальных вложений во всех случаях меньше 0,364. Повышение устойчивости узла нагрузки КНС с помощью БАВР показывает, что при производительности КНС 200 м³/ч коэффициент экономической эффективности капитальных вложений равен 0,58, при производительности 1890 м³/ч – 2,23, следовательно, чем больше производительность КНС, тем быстрее окупится применение дорогостоящего БАВР. Коэффициент экономической эффективности капитальных вложений в ДКИН для повышения устойчивости узла нагрузки КНС равен 0,59 при производительности 200 м³/ч и 0,95 – при производительности 1890 м³/ч.

Заключение

Для анализа мероприятий по повышению устойчивости узлов электродвигательной нагруз-

ки целесообразен поликритериальный подход, позволяющий учитывать коэффициент зависимости источников питания, коэффициент запаса устойчивости по напряжению и коэффициент экономической эффективности капитальных вложений. Так, при росте запаса устойчивости по напряжению уменьшается ожидаемое количество отключений узла нагрузки из-за потери устойчивости и требуется увеличивать капитальные вложения в мероприятия по повышению устойчивости.

Для узла нагрузки кустовой насосной станции коэффициент экономической эффективности капитальных вложений уменьшается на 30 % при повышении коэффициента запаса устойчивости по напряжению на 7 % при помощи динамического компенсатора искажений напряжения.

Коэффициент экономической эффективности капитальных вложений в быстродействующий автоматический ввод резерва для повышения устойчивости узла нагрузки кустовой насосной станции увеличивается в 4 раза при увеличении производительности объекта в 9 раз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мищенко И.Т. Скважинная добыча нефти. – М: ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. – 816 с.
2. Меньшов Б.Г., Ершов М.С., Яризов А.Д. Электротехнические установки и комплексы в нефтегазовой промышленности. – М.: ОАО «Изд-во «Недра», 2000. – 487 с.
3. Пупин В.М. Устройства защиты электрооборудования от провалов напряжения длительностью от 10 миллисекунд // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2013. – № 10. – С. 23–34.
4. Пупин В.М., Куфтин Д.С., Сафонов Д.О. Новые способы защиты электрооборудования в питающих сетях предприятий при провалах напряжения // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2012. – № 4. – С. 22–28.
5. Нешитой А.С. Инвестиции. – М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К», 2007. – 372 с.
6. СТП 0148463.004–87. Оценка эффективности мероприятий по повышению надежности электрических сетей нефтяных промыслов. – Тюмень: Ротапринт Гипротюменнефтегаза, 1988. – 52 с.
7. Семенов В.М. Экономика предприятия. – СПб.: Питер, 2008. – 416 с.
8. Файбисович Д.Л. Справочник по проектированию электрических сетей. – М.: ЭНАС, 2012. – 376 с.
9. Heine P., Pohjanheimomethod P. A method for estimating the frequency and cost of voltage sags // IEEE Transactions on Power Systems. – 2002. – V. 17. – Iss. 2. – P. 290–296.
10. Gupta C.P., Milanovic J.V. Probabilistic Assessment of Financial Losses due to Interruptions and Voltage Sags. Part I // The Methodology. – 2006. – V. 21. – Iss. 2. – P. 918–924.
11. Лосев Ф.А., Сушков В.В. Разработка методики и алгоритмов оценки влияния несимметричных провалов напряжения на устойчивость узла асинхронной электродвигательной нагрузки нефтяных месторождений // Омский научный вестник. – 2018. – № 4 (160). – С. 94–98.
12. Jiadai L., Venkata D. Detailed Magnetic Equivalent Circuit Based Real-Time Nonlinear Power Transformer Model on FPGA for Electromagnetic Transient Studies // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2016. – V. 63. – Iss. 2. – P. 1191–1202.
13. Deane J. Modeling the dynamics of nonlinear inductor circuits // IEEE Transactions on Magnetics. – 1994. – V. 30. – Iss. 5. – P. 2795–2801.
14. Беников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высшая школа, 1985. – 536 с.
15. Martianov A.S., Sushkov V.V. Ride-through solutions: Classification and comparison // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). – IEEE, 2016. – P. 1–4.
16. ГОСТ 32144–2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 18 с.
17. Ершов М.С., Егоров А.В., Анцифоров В.А. Методы оценки надежности и независимости источников питания в системах промышленного электроснабжения // Промышленная энергетика. – 2014. – № 1. – С. 2–6.
18. Мартыанов А.С., Сушков В.В. Обоснование технических решений для повышения динамической устойчивости установок добычи нефти с электрическими центробежными насосами // Омский научный вестник. – 2017. – № 6 (156). – С. 105–111.
19. Егоров А.В., Новоселова Ю.В. Устойчивость асинхронных многомашинных комплексов при внешних многопараметрических возмущениях // Промышленная энергетика. – 2000. – № 11. – С. 24–27.
20. Dynamic Voltage Restore DVR SET. Operating manual. ZIGOR Corporation. URL: <http://www.zigor.com/products/power-quality-back-up/zigor-power-avc/> (дата обращения: 03.09.2018).
21. Singh S.K., Srivastava S.K. Enhancement in power quality using dynamic voltage restorer (DVR) in distribution network // International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems. – Tamilnadu, India, 2017. – P. 1–5.
22. Ghosh A., Jindal A.K., Joshi A. Design of a Capacitor-Supported Dynamic Voltage Restorer (DVR) for Unbalanced and Distorted Loads // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2004. – V. 19. – № 1. – P. 405–413.
23. Rauf A.M., Khadkikar V. An Enhanced Voltage Sag Compensation Scheme for Dynamic Voltage Restorer // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2015. – V. 62. – Iss. 5. – P. 268–269.
24. Deepa F., Tomson T. Mitigation of voltage sag and swell using dynamic voltage restorer // Annual International Conference on

- Emerging Research Areas: Magnetics, Machines and Drives (AICERA/iCMMMD). – Kottayam, India, 2014. – P. 1–6.
25. Ital A.V., Borakhade S.A. Compensation of voltage sags and swells by using Dynamic Voltage Restorer (DVR) // International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques. – Tamilnadu, India, 2016. – P. 1515–1519.
26. Разработка наблюдателя полного порядка с оперативным мониторингом момента сопротивления для погружных асинхронных электродвигателей / А.С. Глазырин, С.Н. Кладиев, К.С. Афанасьев, В.В. Тимошкин, И.Г. Слепнёв, В.И. Полищук, Н. Sándor // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 2. – С. 118–126.
27. Боловин Е.В., Глазырин А.С. Метод идентификации параметров погружных асинхронных электродвигателей установок электроприводных центробежных насосов для добычи нефти // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 1. – С. 123–131.

Поступила 28.11.2018 г.

Информация об авторах

Лосев Ф.А., ассистент кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета.

Сушков В.В., доктор технических наук, профессор кафедры энергетики Нижневартковского государственного университета.

UDC 621.31

POLYCRITERIA APPROACH TO THE ANALYSIS OF ACTIONS FOR INCREASING ELECTROMOTIVE LOADING STABILITY OF THE OIL-EXTRACTING ENTERPRISES

Fedor A. Losev¹,
fedor_los@mail.ru

Valery V. Sushkov²,
sushkovvv@gray-nv.ru

¹ Industrial University of Tyumen,
38, Volodarsky Street, Tyumen, 625000, Russia.

² Nizhnevartovsk State University,
56, Lenin Street, Nizhnevartovsk, 628600, Russia.

Relevance. The oil field technological systems operability directly depends on power supply reliability. The most frequent power supply interruptions are voltage sags which can bring to stability loss of electromotive loading that results in economic losses of the oil-extracting enterprise. Various equipment, for example, dynamic voltage restore and standby power supply, can be used to increase the electromotive loading stability. The correct setup of power supply resumption equipment by automatic connection of the standby power supply at shutdown of the working power supply allows increasing electromotive loading stability, however at the same time it is necessary to consider power supply independence.

The main aim of the research is to develop the polycriteria approach to the analysis of actions for increase in electromotive loading stability of the oil-extracting enterprises considering economic and technical factors.

Objects of the research are electromotive loading and equipment for increase in electromotive loading stability.

Methods: mathematical modeling of electromotive loading operating at voltage sags; mathematical modeling of equipment for increase in electromotive loading stability; economic efficiency assessment of equipment for increase in electromotive loading stability.

Results. The authors have proposed the polycriteria approach to the analysis of actions for increase in electromotive loading stability of the oil-extracting enterprises considering economic and technical factors. Voltage stability reserve coefficient, power supplies dependence coefficient and capital investments economic efficiency coefficient were used for efficiency assessment of actions to increase in electromotive loading stability. The analysis of use efficiency of dynamic voltage restore and high-speed automatic transfer equipment for increase in loading stability of sectional pump stations and well clusters was carried out.

Key words:

Increasing electromotive loading stability, dynamic stability curve, dynamic voltage restore, high-speed automatic transfer equipment, sectional pump station.

REFERENCES

- Mishchenko I.T. *Skvazhinnaya dobycha nefti* [Well oil production]. Moscow, RGU nefti i gaza im. I.M. Gubkina «Neft i gaz» Publ., 2003. 816 p.
- Menshov B.G., Ershov M.S., Yarizov A.D. *Elektrotehnicheskie ustanovki i komplekсы v neftegazovoy promyshlennosti* [Electro-technical units and complexes in the oil and gas industry]. Moscow, Nedra Publ., 2000. 487 p.
- Pupin V.M. Protective devices of electrical equipment from voltage drops with duration from 10 milliseconds. *Electric equipment: operation and repair*, 2013, no. 10, pp. 23–34. In Rus.
- Pupin V.M., Kuftin D.S., Safonov D.O. New electric equipment protection methods in power lines of the enterprises at voltage falls. *Electric equipment: operation and repair*, 2012, no. 4, pp. 22–28. In Rus.
- Neshitoy A.S. *Investitsii* [Investment]. Moscow, «Dashkov i K» Publ., 2007. 372 p.
- STP 0148463.004–87. *Otsenka effektivnosti meropriyatiy po povysheniyu nadezhnosti elektricheskikh setey neftyanykh promyslov* [Enterprise Standard 0148463.004–87. Effectiveness assessment of actions for increase in reliability of oil fields electrical networks]. Tyumen, Rotaprint Giprotymenneftegaz Publ., 1988. 52 p.
- Semenov V.M. *Ekonomika predpriyatiya* [Economy of the enterprise]. St. Petersburg, Piter Publ., 2008. 416 p.
- Faybisovich D.L. *Spravochnik po proektirovaniyu elektricheskikh setey* [Projection book of electrical networks]. Moscow, ENAS Publ., 2012. 376 p.
- Heine P., Pohjanheimomethod P. A method for estimating the frequency and cost of voltage sags. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2002. – V. 17. – Iss. 2. – P. 290–296.
- Gupta C.P., Milanovic J.V. Probabilistic Assessment of Financial Losses due to Interruptions and Voltage Sags. Part I. *The Methodology*, 2006, vol. 21, Iss. 2, pp. 918–924.
- Losev F.A., Sushkov V.V. Technique and algorithms for induction electromotive loading node stability assessment of oil fields at three-phase unbalance voltage sag. *Omsk Scientific Bulletin*, 2018, no. 4 (160), pp. 94–98. In Rus.
- Jiadai L., Venkata D. Detailed Magnetic Equivalent Circuit Based Real-Time Nonlinear Power Transformer Model on FPGA for Electromagnetic Transient Studies. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, vol. 63, Iss. 2, pp. 1191–1202.
- Deane J. Modeling the dynamics of nonlinear inductor circuits. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1994, vol. 30, Iss. 5, pp. 2795–2801.
- Venikov V.A. *Perekhodnye elektromekhanicheskie protsessy v elektricheskikh sistemakh* [Transient electromechanical phenomena in electrical systems]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1985. 536 p.
- Martianov A.S., Sushkov V.V. Ride-through solutions: Classification and comparison. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). *IEEE*, 2016. pp. 1–4.
- GOST 32144–2013. *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektroobzheniya obshchego naznacheniya* [State Standard 32144–2013. Electric energy.

- Compatibility of technical means electromagnetic. Quality standards of electric energy in the power supply systems]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 18 p.
17. Ershov M.S., Egorov A.V., Antsiforov V.A. Metody otsenki nadezhnosti i nezavisimosti istochnikov pitaniya v sistemakh promyshlennogo elektrosnabzheniya [Methods of assessment of reliability and independence of power supplies in the power supply systems]. *Industrial power engineering*, 2014, no. 1, pp. 2–6.
 18. Martyanov A.S., Sushkov V.V. Comparison of ride-through solutions for electric submersible pump units. *Omsk Scientific Bulletin*, 2017, no. 6 (156), pp. 105–111. In Rus.
 19. Egorov A.V., Novoselova Yu.V. Ustoychivost asinkhronnykh mnogomashinnykh kompleksov pri vneshnikh mnogoparametricheskikh vozmushcheniyakh [Asynchronous multiple machine complexes stability in case of external multiparameter interruptions]. *Industrial power engineering*, 2000, no. 11, pp. 24–27.
 20. *Dynamic Voltage Restore DVR SET*. Operating manual. ZIGOR Corporation. Available at: <http://www.zigor.com/products/power-quality-back-up/zigor-power-avc/> (accessed 3 September 2018).
 21. Singh S.K., Srivastava S.K. Enhancement in power quality using dynamic voltage restorer (DVR) in distribution network. *International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems*. Tamilnadu, India, 2017. pp. 1–5.
 22. Ghosh A., Jindal A.K., Joshi A. Design of a Capacitor-Supported Dynamic Voltage Restorer (DVR) for Unbalanced and Distorted Loads. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2004, vol. 19, no. 1, pp. 405–413.
 23. Rauf A. M., Khadkikar V. An Enhanced Voltage Sag Compensation Scheme for Dynamic Voltage Restorer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, vol. 62, Iss. 5, pp. 2683–269.
 24. Deepa F., Tomson T. Mitigation of voltage sag and swell using dynamic voltage restorer. *Annual International Conference on Emerging Research Areas: Magnetics, Machines and Drives (AICERA/iCMMD)*. Kottayam, India, 2014. pp. 1–6.
 25. Ital A.V., Borakhade S.A. Compensation of voltage sags and swells by using Dynamic Voltage Restorer (DVR). *International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques*. Tamilnadu, India, 2016. pp. 1515–1519.
 26. Glazyrin A.S., Kladiev S.N., Afanasiev K.S., Timoshkin V.V., Slepnev I.G., Polishchuk V.I., Halasz S. Design of full order observer with real time monitoring of load torque for submersible induction motors. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 2, pp. 118–126. In Rus.
 27. Bolovin E.V., Glazyrin A.S. Method for identifying parameters of submersible induction motors of electrical submersible pump units for oil production. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 1, pp. 123–131. In Rus.

Received: 28 November 2018.

Information about the authors

Fedor A. Losev, assistant, Industrial University of Tyumen.

Valery V. Sushkov, Dr. Sc., professor, Nizhnevartovsk State University.

УДК 621.165.51: 620.179.148: 620.192.46

МЕТОД ИНТЕГРИРОВАННОЙ ОЦЕНКИ УСТАЛОСТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СТРУКТУРЕ ВОССТАНОВЛЕННЫХ ЛОПАТОК ТЭЦ И ГЭС

Савинкин Виталий Владимирович¹,
cavinkin7@mail.ru

Кузнецова Виктория Николаевна²,
dissovetsibadi@bk.ru

Ратушная Татьяна Юрьевна¹,
tratushnaia@mail.ru

Киселев Леонид Александрович³,
remplazma@mail.ru

¹ Северо-Казахстанский государственный университет им. М. Козыбаева,
Республика Казахстан, 150000, г. Петропавловск, ул. Пушкина 86.

² Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет,
Россия, 644080, г. Омск, пр. Мира, 5.

³ ТОО «Ремплазма»,
Республика Казахстан, 150000, г. Петропавловск, ул. Я. Гашека, 22.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки методики точного определения ресурсной долговечности и надежности высоконагруженного оборудования, используемого для производства и преобразования энергии на основе георесурсов (ГЭС, ТЭЦ), основанной на выявлении зон концентрации внутренних напряжений как показателя фазовых изменений в структуре материала деталей.

Цель: повышение ресурсной долговечности нагруженных лопаток турбины ГЭС и ТЭЦ за счет внедрения разработанной интегрированной методики точного прогнозирования структурно-фазовых изменений на стадии зарождения усталостных дефектов.

Объект: лопатки турбин ТЭЦ и ГЭС, восстановленные источником лазерно-плазменной энергии.

Применялся комплексный метод исследования концентрации внутренних напряжений в структуре нагруженных деталей, подверженных динамическим нагрузкам. Использовалась методология системного анализа, а также метод распределения поля остаточной намагниченности в деградированной микроструктуре материала. При разработке алгоритма интегрированного метода диагностики и точного прогнозирования применялись методы математической статистики. Восстановленные детали исследовались методами неразрушающего контроля с последующим анализом и обработкой полученных результатов.

Результаты. Разработан алгоритм проведения диагностики восстановленных деталей высокотехнологичных комплексов производства и преобразования энергии георесурсов на примере лопаток турбины ГЭС. Сформирована база данных концентраций напряжений лопатки в зависимости от фазовой структуры металла, позволяющая установить причинно-следственные связи между дефектом, технологическими режимами восстановления и режимами эксплуатации агрегата. Решена научная проблема по созданию единой физической модели, и определены границы применимости данного метода. Установлен безопасный режим эксплуатации энергетического оборудования ($H_x = 62-76$ А/м), повышающий ресурс турбины в 1,7 раза.

Ключевые слова:

Усталостные напряжения, фазовая структура, лопатка турбины, интегрированная оценка, методы неразрушающего контроля.

Введение

Экстремальные условия эксплуатации, дефицит технологий восстановления энергетического комплекса и машиностроительного оборудования Казахстана, России и других стран СНГ подтверждают, что на качество, безопасность и энергоэффективность производства и преобразования вырабатываемой энергии на основе георесурсов существенное влияние оказывает ресурс нагруженных турбоагрегатов. На сегодняшний день на территории СНГ работает более 500 тепло- и гидроэлектростанций. Доля морально устаревших турбин, по приблизительным подсчетам, составляет около 65 %, при этом темпы роста цен на энергетические ресурсы, техническое обслуживание катастрофически растут.

Для получения тепловой и электрической энергии в энергетике используют турбины с вращающимся рабочим органом ротора с закрепленными на нем лопатками, приводимыми в действие потоком давления пара, образованным в результате сгорания измельченного угля, или потоком воды. Таким образом, происходит преобразование одного вида энергии (давление пара, воды) в другой (тепло и электричество).

В ходе эксплуатации лопатки турбин подвергаются усиленному эрозионному изнашиванию [1]. Непредвиденные поломки оборудования ТЭЦ или ГЭС, сопряженные с выходом из строя гидротурбины, кораблением, обрывом, эрозионным износом рабочих лопаток n -ступени и усталостным вибрационным разрушением [2, 3] влечет за собой техно-

генные аварии и сбои в системе подачи электроэнергии в стране [4]. Электрическая и тепловая энергия задают главный вектор развития энергетической отрасли с возможностью эффективного использования георесурсов.

Неисправности на многих ГЭС и ТЭЦ выявили острую необходимость в методике точного прогнозирования ресурсной надежности, восстановления и мониторинга состояния энергетического оборудования, используемого для производства и преобразования энергии георесурсов, на структурно-фазовом уровне материала агрегата. Научно-обоснованный подход к оценке и диагностике усталостной надежности энергетического комплекса с учетом системных связей динамических нагрузок и структурных изменений в материале лопаток турбин в мировой практике энергетической отрасли не применяется и не имеет нормативного регулирования.

Исследование данных процессов позволит определять места высоконагруженных агрегатов, работающих на стадии зарождения внутренних скрытых дефектов, а не в момент их концентрации, как принято в классических расчетных методиках. Основные результаты исследований позволят не только идентифицировать зарождающийся дефект, но и интерпретировать его, что повысит надежность, долговечность и эффективность работы турбин ТЭЦ и ГЭС.

Для решения поставленной задачи необходима как модернизация методологического подхода, так и создание метрологического обеспечения точного прогнозирования структурно-фазового состояния и усталостной долговечности турбоагрегата, что позволит повысить качество неразрушающего контроля энергетического оборудования, долговечность и безопасность ГЭС и ТЭЦ.

Основными требованиями, предъявляемыми к лопаткам паровых и газовых турбин, является соответствие их проектной геометрии и размерных параметров требованиям чертежей, а также высокий уровень физико-механических свойств (прочность, твердость, сопротивления усталости, фреттинг-стойкость, эрозионной и коррозионной стойкости) [5].

Ресурсная долговечность и надежность деталей определяется их жизненным циклом. К основным дефектам, влияющим на долговечность нагружаемых лопаток, можно отнести следующие: износ, деформация, вырыв, изменение физико-механических свойств конструктивных элементов и накопление усталостных напряжений в лопатках турбины. Научные изыскания подтвердили, что первостепенная причина зарождения подобных дефектов в энергонагруженных агрегатах находится в локальных участках формирования усталостных напряжений (ЗКН – зоны концентрации напряжений). Это участки динамического и механического воздействия, где прогрессируют процессы коррозии, усталости, нарушая структурную связь кристаллической решетки материала. Следовательно,

определение ЗКН оборудования, как показателя структурных изменений, является актуальной задачей диагностики и прогнозирования ресурса турбины.

Несмотря на значительное количество работ в области прогнозирования остаточного ресурса, создание научно-методической базы методик выполнения измерений и комплексной оценки мест локализации структурных дефектов на стадии их зарождения с целью повышения надежности изделий сложной формы при неразрушающем контроле представляется перспективной областью исследований.

Теоретическое обоснование экспериментального интегрированного метода контроля, идентификации и интерпретации измерений напряженности восстановленной структуры

Основная идея работы заключается в исследовании концентрации внутренних напряжений в структуре нагруженных деталей на участках, подверженных максимальным динамическим нагрузкам, что позволит установить основные зависимости повышения надежности и эффективной эксплуатации. Исследуя процесс диагностики как отдельный этап жизненного цикла лопаток турбин и инструмент прогнозирования надежности и долговечности, определены основные методы неразрушающего контроля, получившие широкое применение в мировой практике машиностроения. К ним относятся ультразвуковой, акустико-эмиссионный, магнитопорошковый и другие. Классическая дефектоскопия обеспечивает обнаружение только несплошностей в металле и не позволяет использовать данные методы для оценки изменений свойств лопатки на структурно-фазовом уровне в момент зарождения процессов усталости в металле.

На сегодняшний день усовершенствован и успешно внедряется во многих сферах деятельности промышленных предприятий по преобразованию энергии георесурсов уникальный способ диагностики изделий, в основу которого положен комплекс известных физических явлений, таких как магнитоупругий эффект и рассеяние магнитного потока (MFL – Magnetic Flux Leakage) в слабых магнитных полях [6–8].

Данный метод обладает рядом преимуществ, его применение не требует специальных намагничивающих устройств; заранее не известны места концентрации напряжений от рабочих нагрузок определяются в процессе их контроля. Не требуется предварительная подготовка поверхности деталей. Средства измерений, реализующие данный метод, имеют малые габаритные размеры, автономное питание и совместимы с персональным компьютером, что позволяет автоматизировать обработку результатов измерений и контроля.

К основным недостаткам можно отнести низкую устойчивость к внешним воздействиям, но главная его проблема заключается в том, что не из-

вестно, какая зона концентрации (рассеяния) напряженности остаточного магнитного поля (ОМП) соответствует зоне концентрации механических напряжений от дефектов физической несплошности металла лопатки [9, 10]. Для решения этой проблемы необходим физический энергетический критерий оценки магнитного состояния. Такой критерий существует, но в рассматриваемом методе предложен и используется частный показатель (не критерий) математической производной напряженности ОМП. Напряженность принудительно наведенного магнитного поля и ОМП не коррелируют и не имеют прямой зависимости от деформированного состояния и структурно-фазового состава металла. Также одна из научных проблем заключается в отсутствии обоснованной степени воспроизводимости результатов измерительного эксперимента. В этом основной недостаток методологии анализа магнитограмм ОМП в методе MFL.

В производственной практике принцип вихревых токов играет ключевую роль при контроле параметров в процессе проведения технической диагностики. Сущность вихретокового метода базируется на эффекте согласованного проявления внешнего электромагнитного поля и поля вихревых токов, создаваемых соленоидом катушки возбуждения в электропроводящей структуре лопатки. Электромагнитные характеристики и геометрические параметры исследуемой лопатки, а также координатное положение датчиков вихревых токов (ДВТ) оказывают значительное воздействие на плотность вихревых токов в исследуемом объекте. Следовательно, характеристики лопатки воздействуют на ЭДС датчика, т. е. результаты измерений содержат большее количество выходных параметров. Внешние факторы рабочей среды не снижают качество сигнала вихретокового датчика и достоверности результатов.

Важной научной проблемой данного метода является отсутствие единой строгой физической модели и установления границ применимости данного метода, что ставит под сомнение однозначность получаемых результатов предшествующих исследователей. Практика современного ремонтно-восстановительного производства показывает необходимость в универсальном методе оценки качественных и аппроксимирующих количественных показатели измеряемых параметров. Данная методика должна иметь метрологическое обеспечение с достоверной статистической базой.

Исследованиями ведущих ученых, таких как А.А. Дубов, Е.А. Демин, А.И. Миляев, О.И. Стеклов, В.М. Матюнин, R. Zoughi, M.J. Lovejoy, N. Diallo, S. Mamadou, N. Fromer, A. Neil, S. Myung [11, 12] и др., установлено, что при неразрушающем контроле изделий, кроме самой оценки мест локализации скрытых дефектов (микротрещин, питтинга, усталостных напряжений), важной задачей стоит точность измерений и установление причин зарождения очагов дефектов. Решить данную задачу можно путем синтеза совре-

менных методов неразрушающего контроля и методики прогнозирования технического состояния объекта исследования.

Е.С. Гаркунов, М.Б. Аркулис, М.П. Барышников, Н.И. Мишенева, Ю.И. Савченко [13, 14] в своих работах утверждают, что применяемые методы неразрушающего контроля имеют направленность на обнаружение уже сформированных трещин и других скрытых дефектов, и они не позволяют осуществить раннюю диагностику структуры детали на стадии зарождения повреждений. Применение предложенного комплексного метода технической диагностики в сочетании с проверочными расчетами на прочность и вероятностным прогнозированием наиболее напряженных узлов турбины делает задачу определения реального ресурса лопаток турбины выполнимой.

Кроме того, предлагаемый способ диагностирования позволяет по характеристике распределения поля остаточной намагниченности H_x вдоль поверхности детали, определить тон колебаний, т. е. оценить вибрационную надежность лопаток турбины. В этом случае используется эффект поглощения энергии механических колебаний (демпфирование колебаний), который вызывает соответствующий рост остаточной намагниченности лопаток.

Схема контроля восстановленных лопаток после эксплуатации по предлагаемому методу представлена на рис. 1.

Этап № 1. Параметры и условия эксплуатации. На начальном этапе необходимо проанализировать условия эксплуатации, техническую документацию, а также факторы, влияющие на снижение надежности оборудования. Далее определить марку материала и его прочностные критерии, химико-компонентный состав, сферу и особенности эксплуатации, цикличность работы и расчетные нагрузки.

Этап № 2. Оперативно-технологические измерения исследуемой лопатки. Регистрация режимов работы, параметров, характеризующих конструктивно-технологические особенности, установление зависимости параметров технологического цикла, таких как: номинальное давление, рабочая температура, вибрации от воздействия рабочей среды. После регистрации вышеперечисленных параметров проводится их сопоставление со справочными и расчетными данными для внесения поправок в информационный банк данных.

Этап № 3. Критическая оценка результатов. Формирование максимально объективной информации о механических свойствах структуры лопаток. Реализуется определение и классификация дефектов, установление причинно-следственных связей и последовательность процессов их возникновения и развития. Данный шаг является значимым, так как задействованы значительные объемы средств измерений и методов обнаружения скрытых дефектов. Одновременно формируется информационный резерв данных для прогнозирования ресурса.

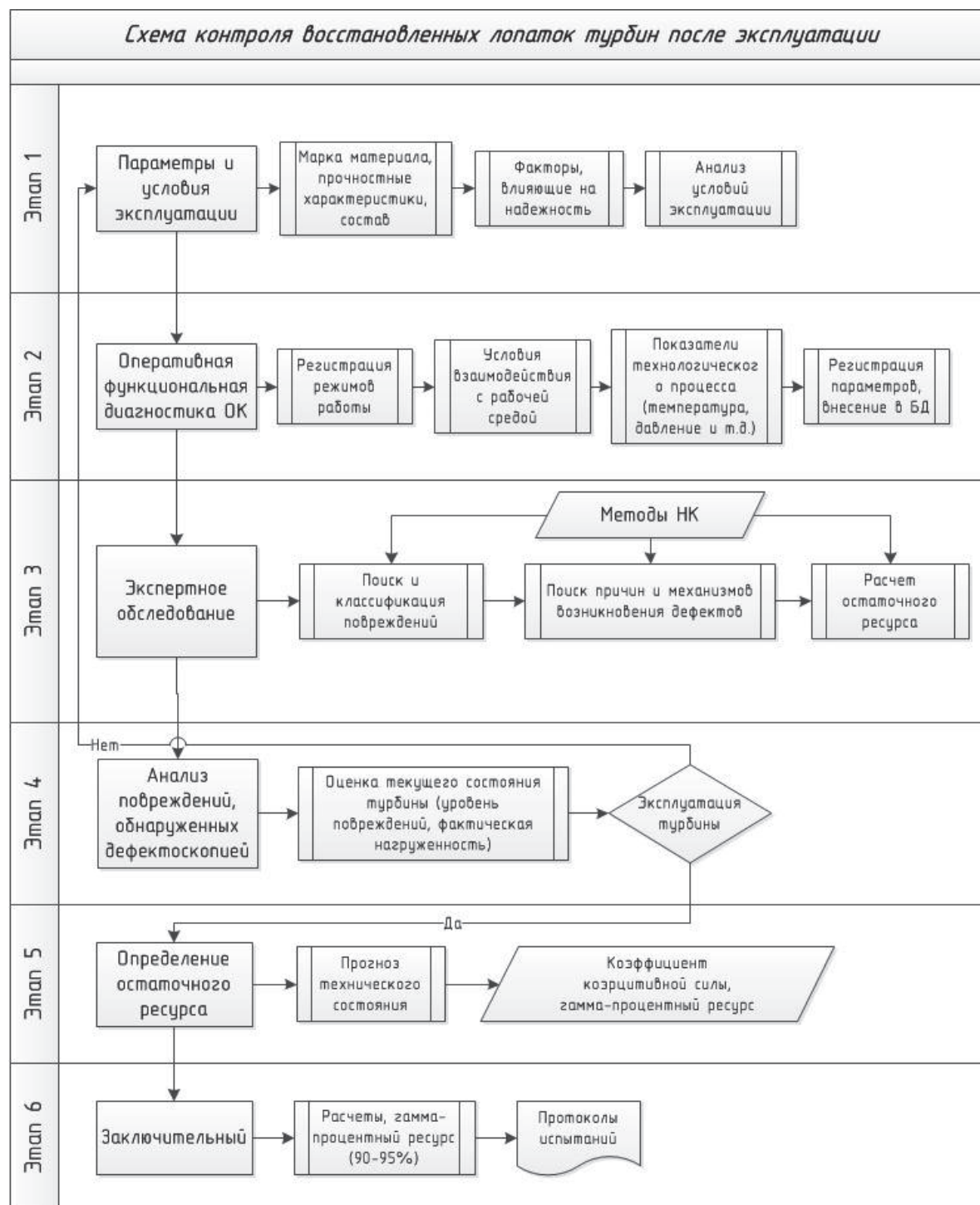


Рис. 1. Схема контроля восстановленных лопаток турбин после эксплуатации

Fig. 1. Scheme for monitoring the recovered turbine blades after operation

Этап № 4. Идентификация и интерпретация дефектов. Вынесение решения о целесообразности эксплуатации турбины. Кроме этого, проводится оценивание фактической работоспособности турбины и ее динамических режимов нагружения. Результатом проведенной работы является математически-статистическая оценка таких параме-

тров, как трещиностойкость, интенсивность развития трещин и их увеличение от размера допустимой глубины $h_{доп}$ до глубины, предшествующей разрушению $h_{мах}$, интенсивность развития очагов питинга, динамика формирования коэрцитивной силы на неповрежденном участке металла $H_{стмах}$ и в зоне повреждений $H_{сгмах}$. Полученные количе-

ственные показатели пограничных значений характеристик турбины в целом и лопаток для прогноза их остаточного ресурса становятся завершающим шагом данного этапа.

Этап № 5. Определение остаточного ресурса. Остаточный ресурс лопаток турбин устанавливается многокритериальным подходом путём прогноза безотказной работы по качественным параметрам, характеризующим предельное состояние.

В качестве главного показателя остаточного ресурса рекомендован масштабный коэффициент. Его значение характеризует величину коэрцитивной силы, влияющей на гамма-процентный γ ресурс.

Этап № 6. Заключительный. Составляется отчет о фактическом состоянии турбины, предельной наработке T до отказа, определяется локальная зона изменения структуры металла, испытывающая максимальные динамические нагрузки.

Экспериментальные исследования зависимости циклических нагрузок от времени, контроль и измерение усталостных напряжений с адаптацией к производственному процессу

Исследованиями установлено, что за время эксплуатации оборудования в отдельных деталях создаются локальные очаги усталостных напряжений (ОУН), которые снижают усталостную и вибрационную прочность восстанавливаемых участков лопаток, работающих в условиях знакопеременных циклических нагрузок [15, 16]. Основные требования, значения действующих сил и моментов, которые формируют технические и эксплуатационные условия работы турбины, регламентированы ГОСТ 34365–2017 «Турбины тепловые промышленного применения (паровые турбины, газовые турбины со ступенями давления). Общие требования». При оценивании минимальных значений напряжения цикла $\sigma_{\min}$ эксплуатационные параметры (скорость потока пара, скорость вращения турбины, влажность пара, давление, угол атаки пара, температура и др.) обуславливают действующие динамические нагрузки, циклическое изменение которых формирует силы сопротивления, приводящие к нарушению равновесного распределения сил и моментов, влияющих на эффективность и надежность эксплуатации лопаток турбин.

Следовательно, важно конкретизировать технические характеристики паровой турбины Т-100/120, на которой установлены восстановленные лопатки (табл. 1). Исследуется турбина типа Т-100/120 номинальной мощностью 110000 кВт при 3000 об/мин. Напряжения изгиба, возникающие под действием газового потока в лопатках, составляют 80–130 МПа.

Зависимости величины циклически действующей нагрузки от временного интервала на практике бывают самыми различными: от структурированных до беспорядочных и мало регламентированных. При экспериментальных исследованиях в качестве показателей циклическости нагрузок вы-

- переменные напряжения за один цикл их изменения;
- минимальное напряжение цикла $\sigma_{\min}$, Н/м², наименьшее по алгебраическому значению напряжение цикла, равное алгебраической разности среднего напряжения цикла и амплитуды;
- максимальное напряжение цикла $\sigma_{\max}$, Н/м²;
- наибольшее по алгебраическому значению напряжение цикла, равное алгебраической сумме среднего напряжения цикла и амплитуды;
- период цикла t – время одного цикла напряжения в лопатках.

Таблица 1. Технические характеристики паровой турбины Т-100/120

Table 1. Technical characteristics of the steam turbine T-100/120

Технические характеристики Technical characteristics	Значение характеристики Value of the characteristics
Давление (абсолютное) свежего пара, кгс/см ² Fresh steam pressure (absolute), kgf/cm ²	120
Температура свежего пара, °С Fresh steam temperature, °C	555
Частота вращения ротора, об/мин Rotor speed, r/min	3000
Номинальная мощность турбины, МВт Rated power of the turbine, MW	110
Расход свежего пара при номинальной мощности, т/ч Fresh steam consumption at rated power, t/h	398
Номинальная отопительная нагрузка, Гкал/ч Nominal heating load, Gcal/h	175 (примерно/ approximately 340)
Максимальная отопительная нагрузка с учетом использования теплоты пара, поступающего в конденсатор, для подогрева сетевой воды, Гкал/ч Maximum heating load taking into account the use of steam heat entering the condenser to heat the mains water, Gcal/h	184

Среднее напряжение цикла определяем по выражению (1): формулы перенесли, видимо из-за конвертации в более позднюю версию, они стали картинками

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}; \quad (1)$$

амплитуду цикла по формуле (2):

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}; \quad (2)$$

размах цикла определяем по формуле (3):

$$\sigma_a = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}. \quad (3)$$

Коэффициент асимметрии цикла определяем по формулам (4), (5)

$$R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}; \quad (4)$$

$$R = \tau_{\min} / \tau_{\max}. \quad (5)$$

Свойство металла противостоять усталости определяется пределом выносливости σ_{R1} , Н/м² (предел усталости), которое регламентируется значением максимального напряжения цикла с асимметрией R , соответствующей заданной долговечно-

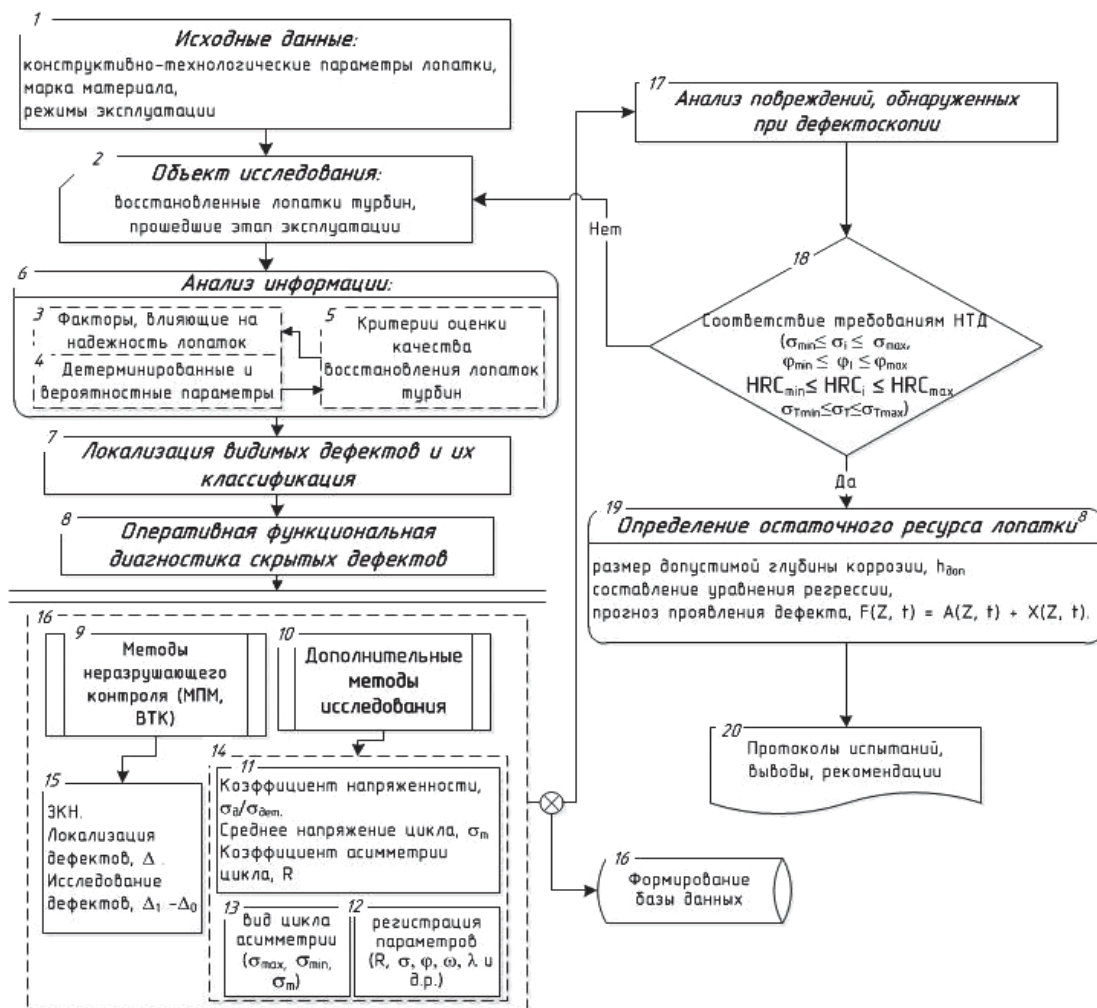


Рис. 2. Блок-схема алгоритма интегрированного метода диагностики лопаток турбин

Fig. 2. Block diagram of the algorithm of integrated turbine blade diagnostics

сти. Предел выносливости при симметричном цикле σ_{-1} – это предел выносливости при условии, что $\sigma_{\max} = \sigma_{\min}$, но противоположны по знаку, то есть $R = -1$. В случае, если цикл симметричный, уравнение будет подчиняться синусоидальному закону (6):

$$\sigma = \sigma_i - \sigma_a \sin(\omega t + \varphi). \quad (6)$$

Наиболее значимые результаты исследований методов обнаружения и измерения напряженности микроструктуры восстановленных лопаток турбины Т-100/120 реализованы в алгоритме интегрированного метода диагностики (рис. 2).

Разработанный алгоритм позволяет более точно определять зоны формирования напряжений в фазовой структуре лопатки и установить причинно-следственную связь зарождения и развития дефектов в прогнозируемый период времени. Для апробации методики были выбраны рабочие лопатки из высокохромистой стали мартенситно-ферритного класса 15X11МФ, применяемые на ТЭЦ-2 г. Петропавловска. Рассмотрим ключевые этапы алгоритма проведения контроля лопаток турбин.

В процессе оценки соответствия профиля лопатки техническим требованиям осуществлялось измерение остаточных напряжений аттестованным средством измерений марки ИКН-7М-16 (относительная погрешность измеряемого магнитного поля для каждого канала измерений составляет не более $\pm 5\%$; относительная погрешность измеряемой длины составляет не более $\pm 5\%$), идентификация которых основана на магнитоупругом эффекте и рассеянии магнитного потока в слабых магнитных полях фазовой структуры металла. Этот метод позволил сформировать базу данных причин возникновения фазовых дефектов в структуре нагруженных деталей на стадии предразрушения [17]. Рентгеноструктурный анализ восстановленного образца выполнен на дифрактометре «Дрон-3М» ($\text{Cu-K}\alpha$ -излучение) в симметричной съемке по Брэггу–Брентано.

Предложенный метод не только определяет очаги возможных усталостных дефектов, но также позволяет выявить и интерпретировать ошибки технологического процесса восстановления. Экс-

периментально доказано, что термодинамические явления наплавочных процессов существенно изменяют коэффициент термического расширения металла восстановленных лопаток [18–21]. Для изделий, функционирующих под влиянием знакопеременных циклических нагрузок и восстановленных плазменным напылением, запас усталостной прочности оценивали следующими параметрами:

- коэффициентом концентрации напряжений:

$$a_{\sigma} = \sigma_{\max} / \sigma_H,$$

где $\sigma_{\max}$ – максимальное напряжение в зоне действия концентрации напряжений, МН/мм²; σ_H – номинальное напряжение в том же сечении, МН/мм²;

- масштабным фактором распределения:

$$\varepsilon_{\sigma} = \sigma_{-1d} / \sigma_{-1},$$

где σ_{-1d} – предел выносливости образца произвольного диаметра, МН/мм²; σ_{-1} – предел выносливости образцов диаметром 7,5 мм, МН/мм².

По результатам испытаний установлено, что зона зарождения и развития дефекта совпадает с плоскостью расчетного сечения. При этом возрастает концентрация внутренних напряжений в точке опасного сечения. При последующем нагружении лопатки концентрация внутренних напряжений в металле возрастает, что сопровождается изменением структурной составляющей. Результаты исследования концентрации внутренних напряжений представлены в виде графика (рис. 3).

Контроль и измерения проводились на длине рабочей кромки лопатки, в местах, наиболее подверженных механическому и эрозионно-динамическому износу. Сканирование шестнадцатиканальным датчиком прибора ИКН-7М-16 проводилось от коренного сечения лопатки к периферийному или, наоборот, по трем осям координат.

Сплошная красная линия на графике (рис. 3) показывает изменение магнитного поля на метр длины образца (А/м), на котором четких всплесков не видно. Красная пунктирная линия показывает допустимое значение напряжений для данного вида изделия. Синяя сплошная линия графика (градиента) показывает места всплеска напряженности магнитного поля, характеризующие формирование концентраций напряжений на каждом миллиметре образца (А/мм). Изменение знака показывает направление изогнутости.

Анализ данных, полученных в результате экспериментальных исследований

По итогам контроля определены участки лопатки, работающие в наиболее напряженных условиях. Это участки, у которых линии концентраций напряжений и деформации расположены поперечно и имеют максимальный коэффициент интенсивности напряжений. Значения этого коэффициента рассчитываются автоматически и отображаются на экране по вызову мастера-диагноста.

Локальные очаги напряженности структуры формируются в местах возникновения дефектов образца на контрольной длине от 71 до 82 мм и на 10 мм от критической точки (рис. 3). Если в опасном сечении, при выбранной схеме заземления, изгибающий момент и действующие напряжения имеют наибольшее значение, то при изгибе других видов эти величины меньше примерно на 20–25 %.

Значения остаточных напряжений в зоне восстановления не превышали пороговые значения. Структура металла при этом представляет сорбит, ориентированный на мартенсит, и обеспечивает микротвердость восстановленной лопатки от 544 до 590 НВ. Как известно, твердость и микротвердость являются одними из качественных критериев процесса плазменного восстановления. Изме-

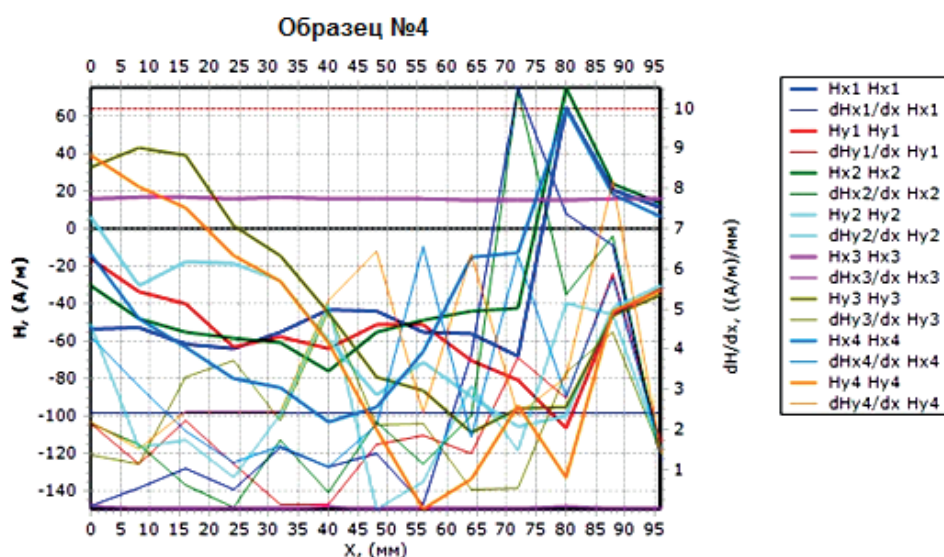


Рис. 3. График зон концентрации напряжений в лопатке турбины

Fig. 3. Graph of stress concentration zones in turbine blades

рение микротвердости проводилось на микротвердомере ПМТ-3 с нагрузкой по ГОСТ 9450–76 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников» от основы поверхности образца до края поверхности покрытия к основе с захватом переходной зоны.

Структура в виде сорбита, ориентированного на мартенсит, образуется при определенном химическом составе материала и температурном режиме воздействия. Данные условия являются ключевыми параметрами технологического процесса плазменного восстановления и достигаются при разных режимах наплавки, напыления или при «отпуске». В технологическом процессе восстановления лопаток присутствует операция «отпуск» переходной зоны от наплавленного металла к основному, вследствие чего формируется ферритная прослойка. Это происходит в результате вынужденного диффундирования углерода. Значит, структурные дефекты детали являются следствием неэффективно выбранных режимов восстановления.

Следовательно, обоснована необходимость в установлении зависимости между изменениями внутренних усталостных напряжений, структурно-фазового состояния металла, предшествующими появлению микротрещин и полному разрушению, и технологическими параметрами восстановления лопаток турбины ТЭЦ и ГЭС.

По результатам исследования усталостных напряжений в структуре металла лопатки авторами впервые сформирована база данных, позволяющая интерпретировать рассеяние магнитного потока в слабых магнитных полях на единицу площади, в зависимости от фазовой структуры лопаток и особенностей технологии их восстановления. Результаты исследования причин напряженного состояния структуры металла позволили сформировать базу данных по соответствию структурно-фазового состава напряженности магнитного поля и дефекта (табл. 2).

Каждому виду дефекта соответствует определенная структурно-фазовая составляющая и уровень напряженности магнитного поля.

Например, при мелкозернистом перлите и ферритных включениях очень слабо прослеживается граница первичных аустенитных зерен (образец № 4), что приводит к микротрещинам и обеспечивает высокую пористость материала при термообработке. Установленная причинно-следственная связь дефекта и напряженности магнитного поля характеризует неэффективные параметры режимов восстановления, повлекшие слабую диффузию углерода из основного металла и недостаточную величину погонной энергии при плазменном напылении.

Рассматривая образец № 1 можно отметить, что всплеск напряженности магнитного поля по

Таблица 2. Результаты исследования причин напряженного состояния структуры металла лопатки турбины

Table 2. Results of investigation of the causes of the stressed state of the turbine blade metal structure

Образец Sample	Напряженность магнитного поля, $H_s, A/m$ Magnetic field intensity, $H_s, A/m$	Структурно-фазовое состояние Structural-phase state	Микротвердость, HV Microhardness, HV	Вид обработки Kind of processing	Дефект Defect	Причина дефекта Cause of the defect
1	62±1,76	Сорбит, ориентированный на мартенсит Martensite – oriented sorbitol	544–590	Оплавнение без присадки Reflow without additive	Изменение проектной геометрии (деформация) Changing the design geometry (deformation)	Малая глубина закалки, неправильные режимы эксплуатации турбины Shallow depth of hardening, wrong modes of turbine operation
2	54±1,42	Средне игольчатый мартенсит и легированный феррит, выделившийся по границам первичных аустенитных зерен в период кристаллизации Medium-neededle martensite and doped ferrite precipitated along the boundaries of the primary austenitic grains during the crystallization period	746–1200	Плазменное напыление Plasma spraying	–	–
3	76±1,82	Грубая игольчатая структура. Эвтектический ледебурит Rough-neededle structure. Eutectic ledeburite	446–458	Плазменное напыление Plasma spraying	Хрупкость Fragility	Перегрев металла в процессе напыления Metal overheating during plasma spraying
4	80±2,4	Мелкозернистый перлит + немного феррита. Очень слабо прослеживаются границы первичных аустенитных зерен Fine-grained perlite + some ferrite. The boundaries of primary austenitic grains are very poorly traced	302–318	Плазменное напыление Plasma spraying	Трещины и единичные поры Cracks and single pores	Слабая диффузия углерода из основного металла – недостаточная величина погонной энергии при напылении Weak diffusion of carbon from the base metal – insufficient amount of running energy during spraying

результатам измерений составил $H_x = 62 \pm 1,76$ А/м при доверительной вероятности 95 %. Это соответствует структурно-фазовому состоянию сорбита, ориентированного на мартенсит, и характеризуется отсутствием технологических дефектов. Однако при тяжелых режимах эксплуатации турбины возрастают динамические и вибрационные нагрузки, при которых в лопатке развиваются усталостные процессы и приводят ее к деформации и разрушению. При формировании фазовой структуры металла в виде средне игольчатого мартенсита и легированного феррита, выделившегося по границам первичных аустенитных зерен, дефекты отсутствуют, микротвердость составляет 746–1200 HV, а напряженность магнитного поля составляет $H_x = 54 \pm 1,42$ А/м. При значениях напряженности $H_x = 76 \pm 1,82 - 80 \pm 2,4$ А/м магнитного поля фазовая структура металла имеет иные составляющие (мелкозернистый перлит), приводящие к дефектам, усталостным напряжениям и разрушению, именно поэтому данные условия являются критическими.

Таким образом, сформированная база данных концентраций напряжений лопатки в зависимости от структуры металла позволяет установить причинно-следственные связи между дефектом, технологическими режимами восстановления и режимами эксплуатации агрегата.

Изменение ресурса лопаток во многом определяется структурно-фазовыми составляющими, а степень наработки на отказ в большинстве случаев зависит от зарождения усталостных трещин, первоисточенная причина которых в концентрации внутренних напряжений. Следовательно, доказана необходимость в пересмотре методики диагностики и прогнозирования ресурса, а также адекватность результатов предложенного комплексного метода оценки ресурсной долговечности оборудования.

Основным показателем ресурса должно быть не количество рабочих циклов $N_{не}$ до полного разрушения лопатки, как предписано в классических методиках и справочниках [21], а количество циклов до появления предельных внутренних напряжений, предшествующих образованию микротрещин. В свою очередь, представленная поэтапная интегрированная методика прогнозирования должна завершаться расчетом коэффициента трещиностойкости с учетом коэрцитивной силы.

Заключение

В результате проведенных исследований влияния концентрации усталостных напряжений на формирование фазовой структуры лопаток турбины ТЭЦ установлено, что научно-теоретические положения теории распределения потоков остаточной намагниченности в деградированной микроструктуре материала полностью применимы для анализа временных характеристик вибрационной надежности, случайных нагрузок. Практические и экспериментальные результаты исследова-

ний позволили разработать эффективный метод интегрированной оценки усталостных напряжений в структуре восстановленных лопаток турбин ТЭЦ и обосновать его применимость и адекватность измеренных параметров напряженности.

Предлагаемая методика позволяет своевременно определять лопатки турбин, которые работают с зонами КН от $76 \pm 1,82$ до $80 \pm 2,4$ А/м в перлитной фазе, т. е. на критической стадии пред разрушения зерен структуры. При формировании фазовой структуры металла в виде средне игольчатого мартенсита и легированного феррита, выделившегося по границам первичных аустенитных зерен, дефекты отсутствуют, микротвердость составляет 746–1200 HV, а напряженность магнитного поля – $H_x = 54 \pm 1,42$ А/м. Значение $H_x = 54 \pm 1,42$ А/м оптимальное для безотказной работы лопаток, имеющих высокий ресурсный запас 10^6 прочности. Разработан алгоритм проведения диагностики лопаток с использованием методов неразрушающего контроля, который синтезирует взаимодействие метрологического оборудования и методической составляющей применения математического аппарата, что повышает точность оценки остаточного ресурса лопаток и турбины в целом.

Производственные испытания предложенного интегрированного метода позволят безошибочно определять зоны зарождения очагов внутренних напряжений лопаток на ранней стадии их формирования. Сформированная база данных о дефекте позволяет анализировать структурную и фазовую составляющую лопатки как до восстановления, так и после. Предложенный подход комплексной оценки изменения структурной составляющей позволит расширить область понимания формирования усталостных напряжений, оценить возможные критические нагрузки при эксплуатации и сформировать критерии для разработки энергосберегающей технологии восстановления высококонцентрированными источниками плазменной энергии.

Комплексное использование методов неразрушающего контроля и индекса технического состояния (интегрированным методом) для исследования динамики и прогнозирования изменения свойств лопатки турбины позволяет обеспечить абсолютную информационную помощь принятия конструктивно-технологических решений, направленных на снижение количества отказов оборудования и предотвращения техногенных катастроф с участием энергетических комплексов. На этом принципе будет реализовано планирование энергоэффективных работ и выбор стратегии повышения надежности производства и преобразования энергии технологическими и эксплуатационными методами. Системный подход и точное прогнозирование комплекса критериальных показателей позволяют значительно увеличить ресурс работы энергетического оборудования и существенно снизить себестоимость производства электрической и тепловой энергии за счет преобразования энергии георесурсов.

Решена научная проблема по созданию единой физической модели и определению границ применимости данного метода, что повышает достоверность и однозначность получаемых результатов по оценке ресурса лопаток турбин ТЭЦ.

Результаты исследований позволили определить четкие границы условий надежной эксплуатации турбины ТЭЦ. Установлено, что безопасный режим эксплуатации энергетического оборудования должен находиться в пределах $H_x = 62 \pm 1,76 - 76 \pm 1,82$ А/м. Данные значения возможно достичь при формировании фазовой структуры материала, приближенной или сходной со среднегильчатым мартенситом и легированным ферритом. Следовательно, предложенная методика позволяет не только прогнозировать вибрационный ресурс энергетического комплекса, но и совершенствовать технологию восстановления изношенных частей. Данная задача решается за счет регулирования исследованных термодинамических параметров и установленных закономерностей изменения причинно следственных связей между технологией и

формированием фазовой структуры, обеспечивающей запас прочности к динамическим нагрузкам.

Научные исследования проведены при совместном партнерском сотрудничестве с производственной средой машиностроения ремонтно-восстановительной отрасли ТОО «Ремплазма», ТОО «Завод многопрофильного оборудования» и АО «СЕВКАЗЭНЕРГО» ТЭЦ-2 г. Петропавловск.

Металлографические исследования восстановленных лопаток проведены на базе и при поддержке Физико-технического института Национальной Академии Наук Беларуси г. Минск.

Установленные зависимости ОУН от микроструктуры материала определены в ходе грантовых исследований, финансируемых МОН РК по проекту № 2607/ГФ4–15-ОТ «Разработка и внедрение энергоэффективной технологии восстановления лопаток сложной геометрии паровых и газовых турбин ТЭЦ высококонцентрированным источником плазменной энергии с адаптивной системой управления процессами» договор № 63 от 27.02.2017 года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проблемы при эксплуатации лопаток последних ступеней паровых турбин после восстановительного ремонта / А.М. Филиппов, Е.О. Голикова, А.Н. Сидоров, А.С. Азин // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2016. – № 3. – С. 17–22.
2. Должанский П.Р., Егоров А.В., Доброхотов С.Э. Повышение работоспособности рабочих лопаток последних ступеней турбин Т-250 // Металл оборудования ТЭС. Проблемы и перспективы» ОАО «ВТИ»: Сборник докладов научно-практической конференции. – М., 2006. – С. 79–82.
3. Должанский П.Р., Доброхотов С.Э. Повышение эксплуатационной надежности рабочих лопаток последних ступеней турбин Т-250/300–240 // Надежность и безопасность энергетики. – 2008. – № 1. – С. 56–59.
4. Abhijit R. Take Stock of Turbine Blades Failure Phenomenon // Journal of the Institution of Engineers (India): Series C. – 2018. – V. 99. – Iss. 1. – P. 97–103.
5. Савинкин В.В., Ратушная Т.Ю., Абилямажинова А.А. Исследования концентрации внутренних напряжений в лопатках турбины ТЭЦ методом магнитной памяти металла // Научно-технический журнал «Метрология». – 2017. – № 1. – С. 33–42.
6. Ali Sophian, Guiyun Tian, Mengbao F. Pulsed Eddy Current Non-destructive Testing and Evaluation: a Review // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2017. – V. 30. – Iss. 6. – P. 1473–1474.
7. Дубов А.А. Диагностика турбинного оборудования с использованием магнитной памяти металла. – М.: ЗАО «ТИССО», 2009. – 148 с.
8. Coupling method of magnetic memory and eddy current nondestructive testing for retired crankshafts / Chen Ni, Lin Hua, Xiaokai Wang, Zhou Wang, Xunpeng Qin, Zhou Fang // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2016. – V. 30. – Iss. 7. – P. 3097–3104.
9. О проблемах применимости метода магнитной памяти металла при контроле напряженно-деформированного состояния металлоконструкций / М.Б. Аркулис, М.П. Барышников, Н.И. Мишенева, Ю.И. Савченко // Дефектоскопия. – 2009. – № 8. – С. 10–12.
10. An algorithm for evaluating the state of a generating unit based on the identification measurements of vibrosignals / Yu.N. Klukushin, K.T. Koshekov, V.Yu. Kobenko, E.S. Trunin // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2014. – V. 50. – Iss. 7. – P. 413–418.
11. Zhang W.W., Cong S. Process optimization and performance evaluation on laser beam welding of austenitic/martensitic dissimilar materials // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2017. – V. 92. – Iss. 9–12. – P. 4161–4168.
12. Murakami R., Akizono K. A study on the impact fatigue crack propagation into the welding residual stresses field // International Journal of Fracture. – 1983. – V. 23. – Iss. 4. – P. R151–R154.
13. Artamonov V.V., Artamonov V.P. Diagnostics of the causes of the operational destruction of rotor blades of gas turbines // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2013. – V. 49. – Iss. 9. – P. 538–542.
14. Corrosion Fatigue of Rotating Blades / M.A. Virchenko, E.V. Levchenko, B.A. Arkad'ev, Yu.F. Kosyak, V.P. Sukhinin, Yu.Ya. Kachuriner // Thermal Engineering. – 1997. – V. 44. – № 6. – P. 464–468.
15. Савинкин В.В., Ратушная Т.Ю. Математическое описание основных факторов, повышения газодинамической нагрузки турбины ТЭЦ // Вестник, Серия техническая, СКГУ им. М. Козыбаева. – 2016. – № 4 (33). – С. 114–118.
16. Расчеты на прочность в машиностроении: Справочник в 5 т. / под ред. С.Д. Пономарев, В.Л. Бидерман. – М.: Машиниздат, 1956–1958. – 1118 с.
17. Неразрушающий контроль: Справочник в 7 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 7. В 2 кн. Кн. 1: Вибродиагностика. – М.: Машиностроение, 2005. – 829 с.
18. Загидуллин Р.В., Загидуллин Т.Р. Исследование зависимости поля остаточной намагниченности от напряженно-деформированного состояния металла стального изделия. Ч. 2. Зависимость поля остаточной намагниченности металла от механического напряжения // Контроль. Диагностика. – 2011. – № 8 (158). – С. 14–20.
19. Новиков В.Ф., Семенов В.В., Бахарев М.С. Возможности определения предела пропорциональности (предела микротеку-

- чести) стали по кривым магнитоупругого размагничивания // Контроль. Диагностика. – 2006. – № 4. – С. 16–17.
20. Blachnio J., Bogman M. A Non-destructive method to assess condition of gas turbine blades, based on the analysis of blade-surface images // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2010. – № 11. – P. 89–98.
21. Artamonov V.V., Artamonov V.P. Diagnostics of the causes of the operational destruction of rotor blades of gas turbines // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2013. – Т. 49. – № 9. – P. 538–542.

Поступила 30.01.2019 г.

Информация об авторах

Савинкин В.В., доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой транспорта и машиностроения, Северо-Казахстанский государственный университет им. М. Козыбаева.

Кузнецова В.Н., доктор технических наук, профессор, декан факультета «Нефтегазовая и строительная техника», Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет.

Ратушная Т.Ю., магистр, докторант кафедры транспорта и машиностроения, Северо-Казахстанский государственный университет им. М. Козыбаева.

Киселев Л.А., заслуженный изобретатель КазССР, директор ТОО «Ремплазма».

UDC 621.165.51: 620.179.148: 620.192.46

METHOD OF INTEGRATED ASSESSMENT OF FATIGUE STRESSES IN THE STRUCTURE OF THE RESTORED BLADES OF CHP AND HPS

Vitalii V. Savinkin¹,
cavinkin7@mail.ru

Viktoria N. Kuznetsova²,
dissovetsibadi@bk.ru

Tatyana Yu. Ratushnaya¹,
tratushnaia@mail.ru

Leonid A. Kiselev³,
remplazma@mail.ru

¹ North Kazakhstan State University named after M. Kozybaev,
86, Pushkin Street, Petropavlovsk, 150000, Republic of Kazakhstan.

² Siberian State Automobile and Highway University,
5, Mira Avenue, Omsk, 644080, Russia.

³ LLP «Remplazma»,
22, Ya. Gashek Street, Petropavlovsk, 150000, Republic of Kazakhstan.

The relevance of research is caused by the necessity to develop the method of precise definition of the resource durability and reliability of heavily loaded equipment used for energy production and conversion on the basis of geo-resources (hydro, CHP), based on identification of zones of concentration of internal stresses, as an indicator of phase change in the material structure of the parts.

The main aim of the research is to increase resource durability of loaded turbine blades of hydro and thermal power stations due to implementation of the developed integrated methodology of precise prediction of structural-phase changes at the early stages of fatigue defects.

The object of research is the turbine blades of CHP and HPP, restored by a source of laser-plasma energy.

The complex research method was used to study the concentration of internal stresses in the structure of loaded parts subjected to dynamic loads. The methodology of system analysis was used, as well as the method of distribution of the residual magnetization field in the degraded microstructure of the material. In development of the algorithm of the integrated method of diagnosis and accurate prediction, the methods of mathematical statistics were used. The restored parts were studied by nondestructive testing followed by analysis and processing of the results.

Result. The authors have developed the algorithm of diagnostics of the restored details of high-tech complexes of energy production and transformation of georesources, on the example of turbine blades of hydroelectric power station. A database of blade stress concentrations depending on the phase structure of the metal was formed, which allows establishing the cause-and-effect relationships between the defect, technological recovery modes and operating modes of the unit. The scientific problem of creating a single physical model is solved and the limits of applicability of this method are determined. The authors determined the safe operation mode of power equipment ($H_x=62-76$ A/m), which increases the turbine life by 1,7 times.

Key words:

Fatigue stresses, phase structure, turbine blade, integrated assessment, non-destructive testing methods.

REFERENCES

1. Filippov A.M., Golikova E.O., Sidorov A.N., Azin A.S. Problems in the operation of blades of the last stages of steam turbines after recovery repair. *Actualnye problemy v mfshinostroenii*, 2016, no. 3, pp. 17–22. In Rus.
2. Dolzhansky P.R., Egorov A.V., Dobrokhoto S.E. Povyshenie rabotosposobnosti rabochnik lopatok poslednikh stupeney turbin T-250 [Increase of working capacity of working blades of last stages of turbines T-250]. *Metall oborudovaniya TES. Problemy i perspektivy* OAO «VTI». *Sbornik dokladov nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Collection of reports of scientifically-practical conference. Metal of the equipment of CHP. Problems and prospects]. Moscow, 2006. pp. 79–82.
3. Dolzhansky P.R., Dobrokhoto S.E. Increase of operational reliability of working blades of last stages of turbines T-250/300–240. *Reliability and safety of power*, 2008, no. 1, pp. 56–59. In Rus.
4. Abhijit R. Take Stock of Turbine Blades Failure Phenomenon. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series C*, 2018, vol. 99, Iss. 1, pp. 97–103.
5. Savinkin V.V., Ratushnaya T.Yu., Abilmazhinova A.A. Issledovaniya kontsentratsii vnutrennikh napryazheniy v lopatkakh turbiny TETs metodom magnitnoy pamyati metalla [Investigations of concentration of internal stresses in turbine blades of CHP by the method of magnetic metal memory]. *Scientific and technical journal «Metrology»*, 2017, no. 1, pp. 33–42. In Rus.
6. Ali Sophian, Guiyun Tian, Mengbao F. Pulsed Eddy Current Non-destructive Testing and Evaluation: A Review. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2017, vol. 30, Iss. 6, pp. 1473–1474.
7. Dubov A.A. *Diagnostika turbinogo oborudovaniya s ispolzovaniem magnitnoy pamyati metalla* [Diagnostics of turbine equipment using magnetic memory of metal]. Moscow, 2009. 148 p.
8. Chen Ni, Lin Hua, Xiaokai Wang, Zhou Wang, Xunpeng Qin, Zhou Fang. Coupling method of magnetic memory and eddy cur-

- rent nondestructive testing for retired crankshafts. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2016, vol. 30, Iss. 7, pp. 3097–3104.
9. Arkulis M.B., Baryshnikov M.P., Misheneva N.I., Savchenko Yu.I. *O problemakh primenymosti metoda magnitnoy pamyati metalla pri kontrole napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya metallokonstruktsiy* [On the problems of the magnetic metal memory method applicability in controlling the stress-strain state of metal structures]. *Defectoscopy*, 2009, no. 8, pp. 10–12.
 10. Klikushin Yu.N., Koshekov K.T., Kobenko V.Yu., Trunin E.S. An algorithm for evaluating the state of a vibrosignals. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2014, vol. 50, Iss. 7, pp. 413–418.
 11. Zhang W.W., Cong S. Process optimization and performance evaluation on laser beam welding of austenitic/martensitic dissimilar materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. 92, Iss. 9–12, pp. 4161–4168.
 12. Murakami R., Akizono K. A study on the impact of fatigue crack propagation in the course of the study of isolated stresses field. *International Journal of Fracture*, 1983, vol. 23, Iss. 4, pp. R151–R154.
 13. Artamonov V.V., Artamonov V.P. Diagnostics of the causes of the operational destruction of rotor blades of gas turbines. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2013, vol. 49, Iss. 9, pp. 538–542.
 14. Virchenko M.A., Levchenko E.V., Arkad'ev B.A., Kosyak Yu.F., Sukhinin V.P., Kachuriner Yu.Ya. Corrosion Fatigue of Rotating Blades. *Thermal Engineering*, 1997, vol. 44, no. 6, pp. 464–468.
 15. Savinkin V.V., Ratushnaya T.Yu. *Matematicheskoe opisanie osnovnykh faktorov povysheniya gazodinamicheskoy nagruzki turbiny TEC* [Mathematical description of the main factors for increasing the gas-dynamic load of the turbine of CHP]. *Vestnik. Seriya tekhnicheskaya, SKGU im. M. Kozybaeva*, 2016, no. 4 (33), pp. 114–118.
 16. *Raschety na prochnost v mashinostroenii: Spravochnik v 5 tomakh* [Calculations for strength in mechanical engineering: a handbook in 5 volumes]. Ed. by S.D. Ponomarev. Moscow, 1956–1958. 1118 p.
 17. *Nerazrushashchy kontrol. Spravochnik. V 7 tomakh*. [Non-destructive testing: Handbook. In 7 volumes]. Ed. by V.V. Kluev, Moscow, Mechanical engineering Publ., 2005. 829 p.
 18. Zagidulin R.V., Zagidulin T.R. Research of the dependence of the residual magnetization field on the stress-strain state of the metal of the steel product. P. 2. Dependence of the residual magnetization field of a metal on the mechanical stress. *Control. Diagnostics*, 2011, no. 8 (158), pp. 14–20. In Rus.
 19. Novikov V.F., Semenov V.V., Bakharev M.S. The possibilities for determining the limit of proportionality (the limit of microtemperature) of steel along the curves of magnetoelastic demagnetization. *Control. Diagnostics*, 2006, no. 4, pp. 16–17. In Rus.
 20. Blachnio J., Bogman M. A Non-destructive method for assessing the condition of gas turbine blades, based on the analysis of blade-surface images. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2010, no. 11, pp. 89–98.
 21. Artamonov V.V., Artamonov V.P. Diagnostics of the causes of the operational destruction of rotor blades of gas turbines. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2013, vol. 49, no. 9, pp. 538–542.

Received: 30 January 2019.

Information about the authors

Vitalii V. Savinkin, Dr. Sc., associate professor, head of the department, North Kazakhstan State University named after M. Kozybaev.

Victoria N. Kyznetsova, Dr. Sc., professor, Siberian State Automobile and Highway University.

Tatyana Yu. Ratushnaya, postgraduate student, North Kazakhstan State University named after M. Kozybaev.

Leonid A. Kiselev, Honored Inventor of the Kazakh SSR, Director of the LLP «Remplazma».

УДК 536.24

НОВЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ТЕРМОСИФОНОВ БОЛЬШИХ РАЗМЕРОВ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ

Максимов Вячеслав Иванович,
elf@tpu.ru.

Нурпейис Атлант Едилулы,
nurpeiis_atlant@mail.ru

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

Актуальность исследования обоснована необходимостью разработки математических моделей теплофизических процессов, протекающих в термосифонах, существенно менее сложных, по сравнению с известными (в которых решаются сложные задачи гидродинамики для парового канала), но в то же время обеспечивающих возможность адекватного прогностического моделирования процессов теплопереноса в термосифонах и определения их основных характеристик (температур, тепловых потоков, скоростей испарения), необходимых для создания систем теплоснабжения с использованием геотермальной и петротермальной энергии глубинных слоев земли при передаче теплоты системой термосифонов большой высоты.

Цель: апробация нового подхода к описанию процессов теплопереноса в термосифонах, являющихся основными элементами системы извлечения теплоты глубинных слоев земли (геотермальной и петротермальной энергии) путем сравнения результатов математического моделирования температур в рамках новой модели в характерных точках слоя теплоносителя и результатов экспериментальных исследований.

Объект: замкнутый двухфазный термосифон.

Метод. Краевая задача математической физики решалась методом конечных разностей.

Результаты. На основании анализа и обобщения результатов экспериментальных исследований разработан новый подход к математическому моделированию процесса формирования теплового режима термосифонов большой высоты для использования геотермальной теплоты. Сформулирована математическая модель, описывающая теплоперенос в слое теплоносителя на нижней крышке термосифона и обеспечивающая возможность достоверного прогноза скоростей испарения (или кипения) теплоносителя. Модель отличается от известных описанием не только теплопроводности, но и процесса естественной конвекции в слое теплоносителя. Численные исследования выполнены на пространственной сетке 36×101 , шаг по времени изменялся в диапазоне от 10^{-3} до 10^{-6} с. Рассматривался диапазон тепловых потоков q , соответствующих условиям интенсивного испарения на свободной поверхности слоя теплоносителя. Проведено сравнение температур в точке, расположенной на оси симметрии термосифона на расстоянии 6 мм от поверхности его нижней крышки, полученных при проведении численного анализа и установленных в экспериментах. В качестве теплоносителя рассматривался *n*-пентан – низкокипящая жидкость, которая может использоваться в термосифонах при относительно низкой (до 40°C) температуре скальных пород или воды. Установлено хорошее соответствие результатов численного моделирования температурных полей в области анализа и экспериментов. Установлено, что свободная конвекция в слое теплоносителя при достаточно высоких тепловых потоках к нижней поверхности термосифона играет важную роль в формировании температурного поля жидкости и скорости ее испарения со свободной поверхности. Разработанный подход может быть использован при анализе систем геотермального и петротермального теплоснабжения при извлечении теплоты из глубинных слоев земли с использованием группы термосифонов большой высоты.

Ключевые слова:

Двухфазный термосифон, математическое моделирование, тепловой поток, теплоперенос, испарение, конденсация, термогравитационная конвекция.

Введение

Одним из перспективных (возможно, даже самым перспективным) направлением в создании систем теплоснабжения будущего является использование геотермальной и петротермальной энергии [1, 2]. Но ее эффективное использование возможно только при извлечении с больших глубин (до 1 км), где температура среды (грунта, скальных пород) превышает 100°C . Одним из наиболее реальных способов такого использования теплоты глубинных слоев земли является система из нескольких десятков замкнутых двухфазных термосифонов большой (10–15 м) высоты. Разработка такой системы возможна по результатам комплекса как экспериментальных, так и теоретических исследований. Последние в связи с большими характерными размерами областей исследования, скорее всего, на начальном этапе работы должны быть

основными. Но анализ современного состояния теории и эксперимента процессов, протекающих в термосифонах, показывает, что несмотря на достаточно большое число публикаций с результатами экспериментальных, например [3–5], и теоретических, например [6–8], исследований, хорошо известные математические модели (наиболее значимые [9–11]) очень сложны в эксплуатации – необходимы большие затраты времени вычислений на анализ одного варианта условий работы термосифонов. Поэтому актуальной является задача разработки математических моделей теплофизических процессов, протекающих в термосифонах, существенно менее сложных, по сравнению, например, с [12–14], но в то же время обеспечивающих возможность адекватного прогностического моделирования процессов теплопереноса в термосифонах и определения их основных харак-

теристик (температур, тепловых потоков, скоростей испарения).

Анализ и обобщение результатов выполненных ранее экспериментов [15, 16] показал, что характерные времена гидродинамических процессов в паровом канале термосифонов (движение пара, в первую очередь) много меньше характерных времен теплопереноса в слое теплоносителя на нижней крышке этого теплообменника. Определяющей характеристикой комплекса процессов, протекающих в термосифоне, является скорость испарения теплоносителя со свободной поверхности его слоя в нижней части парового канала ($W_{\text{исп}}$). Вычисление этой величины является во многих случаях достаточно сложной самостоятельной задачей, но в последние годы предложены методы расчета $W_{\text{исп}}$ в условиях высоких температур поверхности испарения [17, 18], обеспечивающие хорошее соответствие результатов вычислений $W_{\text{исп}}$ и экспериментальных данных даже в условиях высоких температур среды, в которой происходит испарение жидкости.

По результатам экспериментов [15, 16] разработан новый подход к описанию теплофизических процессов в термосифоне, отличающийся от известных моделированием теплопереноса только в слое теплоносителя на нижней крышке термосифона, и вычисление по результатам этого моделирования скорости испарения хладагента (основной характеристики работы термосифона).

Цель настоящей работы – апробация этого нового подхода путем сравнения результатов математического моделирования температур в рамках новой модели в характерных точках слоя теплоносителя и результатов экспериментальных исследований.

Постановка задачи

При постановке задачи использовалась разработанная авторами статьи физическая модель, основой которой является положение о том, что тепловой режим термосифона в полной мере определяется основной характеристикой комплекса взаимосвязанных теплофизических и гидродинамических процессов, протекающих во всех характерных областях этого теплообменника (зоны испарения и конденсации, парового канала, пленки стекающего по вертикальным стенкам термосифона теплоносителя, верхней и нижней крышек, вертикальных стенок), – массовой скорости испарения теплоносителя с поверхности слоя последнего на нижней крышке. При таком подходе принимается, что величина $W_{\text{исп}}$ зависит только от интенсивности теплопереноса в нижней части парового канала.

Задача теплопереноса в этом слое рассматривается в рамках модели, учитывающей механизмы теплопроводности и термогравитационной конвекции. Принято допущение (которое можно квалифицировать как основное), что граница раздела «теплоноситель–пар» не смещается в пространстве

(т. е. предполагается, что весь конденсат, образующийся на верхней крышке, успевает возвратиться в зону испарения и компенсировать убыль массы теплоносителя в результате испарения). При этом на основании результатов экспериментальных исследований [19] предполагается, что температура «оборотного» конденсата ниже температуры поверхности испарения. Последнее допущение не является вполне очевидным для условий стекания конденсата по вертикальным стенкам термосифона. Но классическая схема работы термосифонов малой высоты [20], в которой конденсат медленно стекает (в зону испарения) и достаточно интенсивно при этом нагревается потоком высокотемпературных паров, движущихся вверх (в зону конденсации), скорее всего не будет эффективна в термосифонах большой высоты. В последних целесообразно возврат конденсата в зону испарения проводить не в результате пленочного течения по стенкам термосифона, а при падении каплей относительно «холодного конденсата» с верхней крышки через паровой канал большой протяженности (до 15 м). В этом случае характерные времена движения капель будут много меньше (в десятки раз) характерного времени стекания пленки. Кроме того, в этом случае температура каплей конденсата будет незначительно отличаться от температуры, при которой происходит конденсация на верхней крышке. В результате конденсат возвращается в область испарения очень быстро и с достаточно низкой температурой.

В дополнение обоснованию этого допущения можно отметить, что встречный поток пара будет препятствовать движению капель, но это торможение, как показали эксперименты [21], приведет к тому, что идущая за первой капля догонит ее и сольется с ней. В результате масса капли и, соответственно, действующая на нее сила тяжести увеличиваются. При этом увеличится и скорость падения капли. Процесс движения капель в этих условиях будет самоподдерживающим, как следует из выводов [21]. Кроме того, при падении с высоты нескольких метров скорость капель будет достигать больших значений и следующие во втором, в третьем и других «эшелонах» по высоте парового канала капли будут поглощать идущие впереди. Увеличению размеров капель конденсата, движущихся через паровой канал, также будет способствовать установленный в экспериментах [22, 23] процесс непрерывной трансформации (изменения формы) капель в полете под действием силы тяжести. Установлено [22, 23], что капли четырех исследованных типичных жидкостей (скорее всего, это закономерно для ньютоновских жидкостей) последовательно принимают форму сферы; эллипсоида, вытянутого по направлению движения; блина; эллипсоида, вытянутого в поперечном направлении, и ряд других промежуточных форм. В результате поперечные размеры каждой капли циклически увеличиваются почти в два раза [22, 23], и вероятность коагуляции (слияния) движущихся

в непосредственной близости капля существенно растёт. Все эти процессы на практике приведут к тому, что капельный поток будет быстро проходить по паровому каналу из зоны конденсации в зону испарения.

В такой постановке математическая модель процессов теплопереноса в слое конденсата представляет собой систему нестационарных уравнений в частных производных с соответствующими краевыми условиями. Задача решена в осесимметричной постановке. С целью повышения уровня возможных обобщений результатов математического моделирования система уравнений математической физики и соответствующие ей краевые условия записаны в безразмерных переменных.

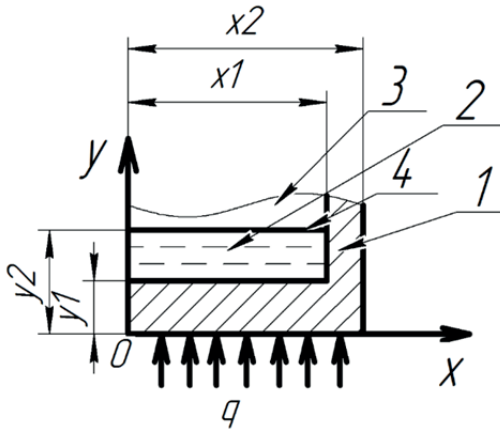


Рис. 1. Область решения: 1 – металлический корпус; 2 – слой конденсата; 3 – паровой канал; 4 – поверхность испарения

Fig. 1. Area of solution: 1 is the metal case; 2 are the layers of condensate; 3 is the vapor channel; 4 is the surface evaporation

Безразмерные уравнения переноса вихря, Пуассона и энергии в условиях теплопроводности и естественной конвекции в слое теплоносителя и уравнение теплопроводности для стенок термосифона имеют вид [10]:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial \tau} + U \frac{\partial \Omega}{\partial X} + V \frac{\partial \Omega}{\partial Y} = \sqrt{\frac{\text{Pr}}{\text{Ra}}} \left(\frac{\partial^2 \Omega}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial Y^2} \right) + \frac{\partial \Theta_2}{\partial X}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2} = -\Omega, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Theta_2}{\partial \tau} + U \frac{\partial \Theta_2}{\partial X} + V \frac{\partial \Theta_2}{\partial Y} = \frac{1}{\sqrt{\text{Ra Pr}}} \left(\frac{\partial^2 \Theta_2}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta_2}{\partial Y^2} \right), \quad (3)$$

$$\frac{1}{\text{Fo}_1} \frac{\partial \Theta_1}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_1}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta_1}{\partial Y^2}. \quad (4)$$

где $\text{Pr} = \frac{\nu}{a_2}$ – число Прандтля; $\text{Ra} = \frac{g_y \beta (T_h - T_0) H^3}{\alpha a_2}$ –

число Рэлея; $\text{Fo}_1 = \frac{a_1 t_0}{H^2}$ – число Фурье; X, Y – безразмерные координаты декартовой системы коор-

динат; a – коэффициент температуропроводности; $H = y_2$ – характерный размер, м; t_0 – масштаб времени, с; τ – безразмерное время; U, V – безразмерные скорости, соответствующие u, v ; V_{in} – масштаб скорости, м/с; T_0 – температура теплоносителя на нижней крышке в начальный момент времени, К; T_h – температура кипения хладагента, К; Θ – безразмерная температура; ψ – функция тока, м²/с; ψ_0 – масштаб функции тока, м²/с; Ψ – безразмерный аналог ψ ; ω – завихренность, 1/с; ω_0 – масштаб завихренности, 1/с; Ω – безразмерный аналог ω .

Начальные условия для уравнений (1)–(4):

$$\begin{aligned} \Psi(X, Y, 0) &= \Omega(X, Y, 0) = 0, \\ \Theta_1(X, Y, 0) &= \Theta_2(X, Y, 0) = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

Граничные условия для уравнений (1)–(4):

$$X = 0, \quad 0 \leq Y \leq Y_1: \frac{\partial \Theta_1}{\partial X} = 0, \quad (6)$$

$$X = 0, \quad Y_1 \leq Y \leq Y_2: \frac{\partial \Theta_2}{\partial X} = 0, \quad \begin{cases} \frac{\partial^2 \Psi_2}{\partial X^2} = 0, \\ \frac{\partial \Psi_2}{\partial X} = 0, \end{cases} \quad (7)$$

$$X = X_2, \quad 0 \leq Y \leq Y_2: \frac{\partial \Theta_1}{\partial X} = 0, \quad (8)$$

$$Y = 0, \quad 0 \leq X \leq X_2: -\frac{\partial \Theta_1}{\partial Y} = \text{Ki}, \quad (9)$$

$$Y = Y_2, \quad 0 \leq X \leq X_1: \frac{\partial \Theta_2}{\partial Y} = \frac{Q_e W_e H}{\lambda (T_h - T_0)}, \quad (10)$$

$$Y = Y_2, \quad X_1 \leq X \leq X_2: \frac{\partial \Theta_1}{\partial Y} = 0, \quad (11)$$

$$X = X_1,$$

$$Y_1 \leq Y \leq Y_2: \begin{cases} \Theta_1 = \Theta_2, \\ \lambda_1 \frac{\partial \Theta_1}{\partial X} = \lambda_2 \frac{\partial \Theta_2}{\partial X}, \end{cases} \begin{cases} \Psi_2 = 0, \\ \frac{\partial \Psi_2}{\partial X} = 0, \end{cases} \quad (12)$$

$$Y = Y_1,$$

$$0 \leq X \leq X_1: \begin{cases} \Theta_1 = \Theta_2, \\ \lambda_1 \frac{\partial \Theta_1}{\partial Y} = \lambda_2 \frac{\partial \Theta_2}{\partial Y}, \end{cases} \begin{cases} \Psi_2 = 0, \\ \frac{\partial \Psi_2}{\partial Y} = 0, \end{cases} \quad (13)$$

$$W_e = \frac{A(P_{vs} - P_v)}{\sqrt{\frac{2\pi RT}{M}}}, \quad (14)$$

$$P_{vs} = P_0 \exp\left(-\frac{Q_e M}{RT}\right), \quad P_v = \frac{\rho RT}{M}. \quad (15)$$

Сформулированная краевая задача (1)–(15) решена методом конечных разностей с использованием алгоритма [24, 25], разработанного для решения аналогичных задач термогравитационной конвекции в условиях неоднородных граничных

условий и фазовых переходов на границах раздела. Численные исследования выполнены на пространственной сетке 36×101 , шаг по времени изменялся в диапазоне от 10^{-3} до 10^{-6} с. Область моделирования приведена на рис. 1. Рассматривался диапазон тепловых потоков q , соответствующих условиям интенсивного испарения на свободной поверхности слоя теплоносителя. Режим кипения не рассматривался по двум основным причинам. Первая – условия кипения теплоносителя на нижней крышке термосифона при использовании последовательно каскада последних не достигаются во всех вышерасположенных термосифонах кроме первого, которых при большой глубине размещения каскада может быть несколько десятков. Вторая – кипение приводит к формированию двухфазной среды в слое теплоносителя и турбулизации течения. В этих условиях задача становится чрезвычайно сложной.

На рис. 2 приведены результаты сравнения температур, полученных при проведении численного анализа и установленных в экспериментах [15, 16], в точке, расположенной на оси симметрии термосифона на расстоянии 6 мм от поверхности его нижней крышки. В качестве теплоносителя рассматривался Н-пентан – низкокипящая жидкость, которая может использоваться в термосифонах при относительно низкой (до 40°C) температуре скальных пород или воды (такие температуры достигаются на относительно небольших глубинах). Вертикальными короткими линиями обозначены доверительные интервалы определения температур в экспериментах [15, 16]. Хорошо видно, что теоретический тренд $T(\tau)$ проходит несколько выше (на $0,5\text{ K}$) экспериментального, но отклонения значений температур в каждый момент времени практически не выходят за границы доверительного интервала определения $T(\tau)$ при доверительной вероятности 0,95. Можно сделать вывод,

что сформулированная в рамках разработанного авторами статьи нового подхода математическая модель теплопереноса в слое теплоносителя на нижней крышке термосифона хорошо соответствует реальному изучаемому процессу при достаточно типичных условия работы таких теплообменников. Можно отметить, что в интервале τ от 0 до 3500 с температура в контролируемой точке растет, но это увеличение незначительно (менее 3 K).

На рис. 3, 4 приведены распределения температур по направлениям осей x и y при $q=0,4\text{ кВт/м}^2$ в точках $y=6\text{ мм}$ и $x=0\text{ мм}$. Видно, что максимальный перепад температур по толщине слоя не превышает 3 K , т. е. процесс термогравитационной конвекции, инициированный подводом теплоты к нижней крышке, приводит к интенсивному перемешиванию жидкости. Перепад температур по поперечной координате также не превышает 3 K при времени 300 с (а–в) и 1 K при 6000 с (г–е), что иллюстрирует интенсивный процесс выравнивания температур и по поперечной координате.

На рис. 5 приведены линии тока в слое теплоносителя на нижней крышке термосифона при $q=0,4\text{ кВт/м}^2$ ($\tau=300\text{ с}$ и $\tau=6000\text{ с}$). Видно, что в правой половине слоя теплоносителя формируется одна достаточно интенсивная вихревая структура (скорости в продольном и поперечном направлениях достигают $0,5\text{ мм/с}$ при температурах среды от 303 до 309 K). С ростом времени скорости естественной конвекции растут вследствие подъема температуры нижней крышки термосифона и, соответственно, теплоносителя в нижней части слоя. Можно сделать вывод, что термогравитационная конвекция является основным механизмом формирования температурного поля слоя теплоносителя на нижней крышке термосифона и, соответственно, температуры свободной поверхности, величина которой в рассматриваемых условиях определяет скорость испарения теплоносителя.

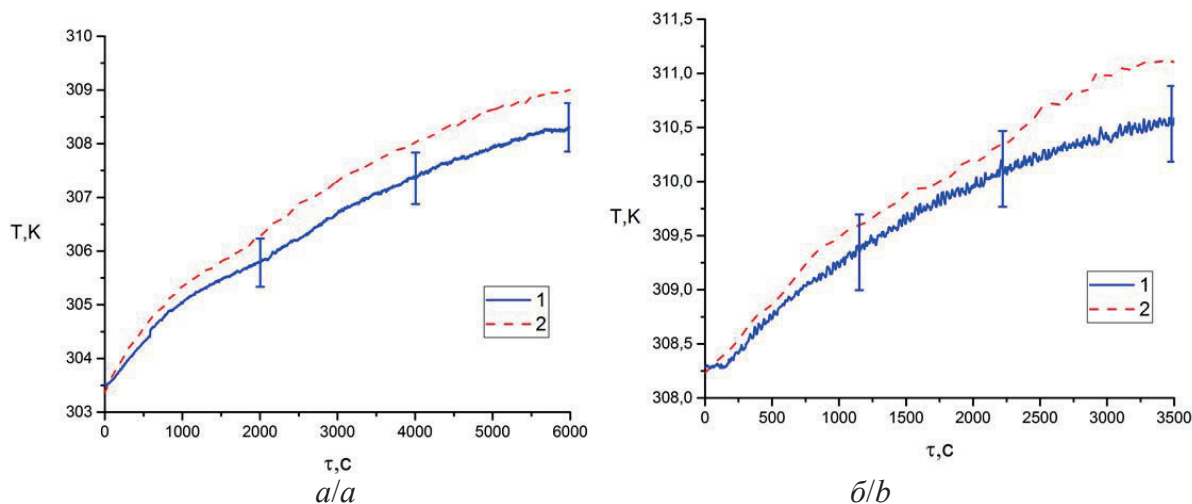


Рис. 2. Температурные зависимости в точке $x=0\text{ мм}$, $y=6\text{ мм}$ от времени для слоя теплоносителя (Н-пентан), а) $q=0,4\text{ кВт/м}^2$, б) $q=0,5\text{ кВт/м}^2$, (1 – эксперимент, 2 – численное моделирование (---))

Fig. 2. Temperature dependencies in the point $x=0\text{ mm}$, $y=6\text{ mm}$ on time for the coolant layer (n-pentane), а) $q=0,4\text{ kW/m}^2$, б) $q=0,5\text{ kW/m}^2$, (1 – experiment, 2 – numerical modeling (---))

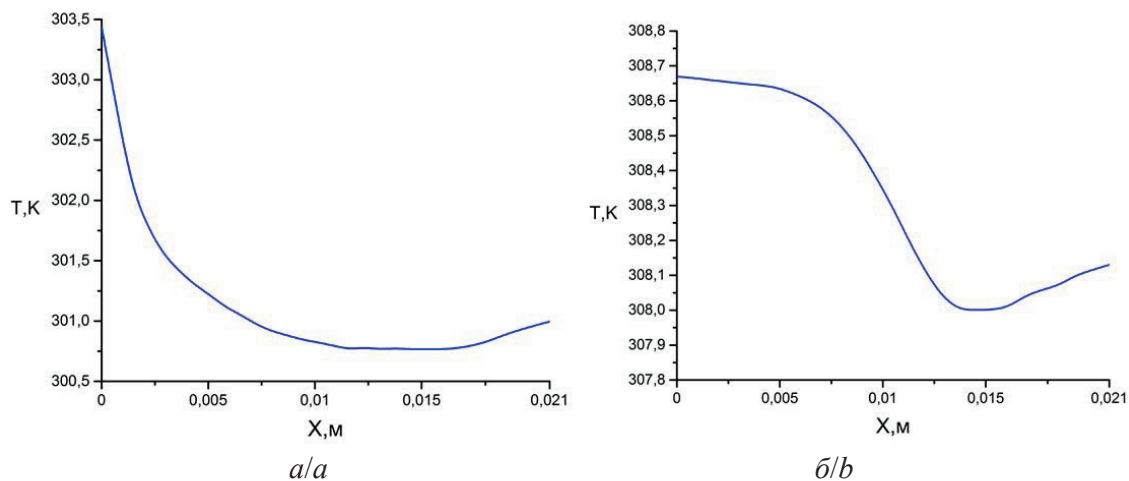


Рис. 3. Распределения температур по оси X в сечении $Y=6$ мм в слое теплоносителя на нижней крышке термосифона при $q=0,4$ кВт/м² и времени: а) 300 с, б) 6000 с

Fig. 3. Temperature distribution along the X -axis in the cross-section $Y=6$ mm in the coolant layer on the bottom cover of thermosiphon at $q=0,4$ kW/m² and time: а) 300 s; б) 6000 s

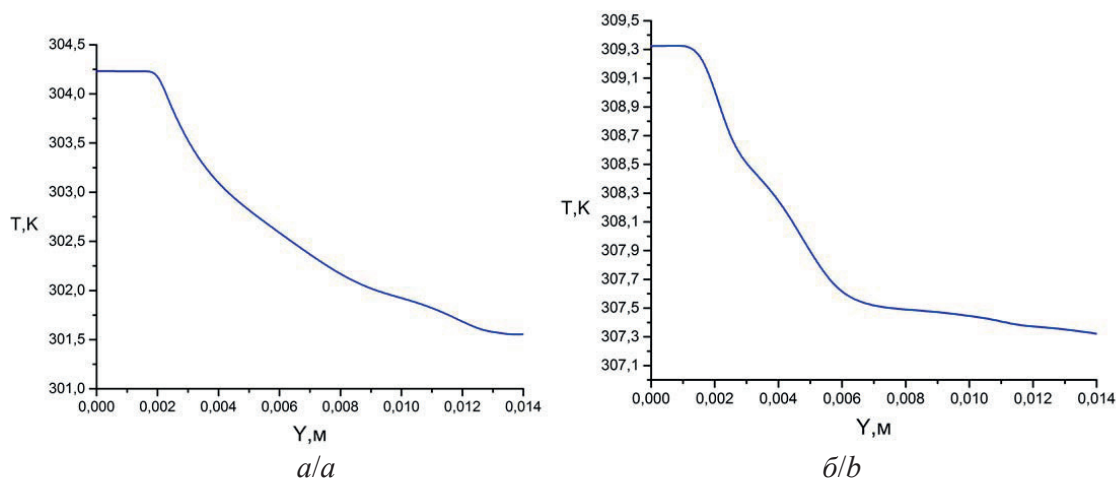


Рис. 4. Распределения температур по оси Y в сечении $Y=6$ мм в слое теплоносителя на нижней крышке термосифона при $q=0,4$ кВт/м² и времени: а) 300 с, б) 6000 с

Fig. 4. Temperature distribution along the Y -axis in the cross-section $Y=6$ mm in the coolant layer on the bottom cover of thermosiphon at $q=0,4$ kW/m² and time: а) 300 s; б) 6000 s

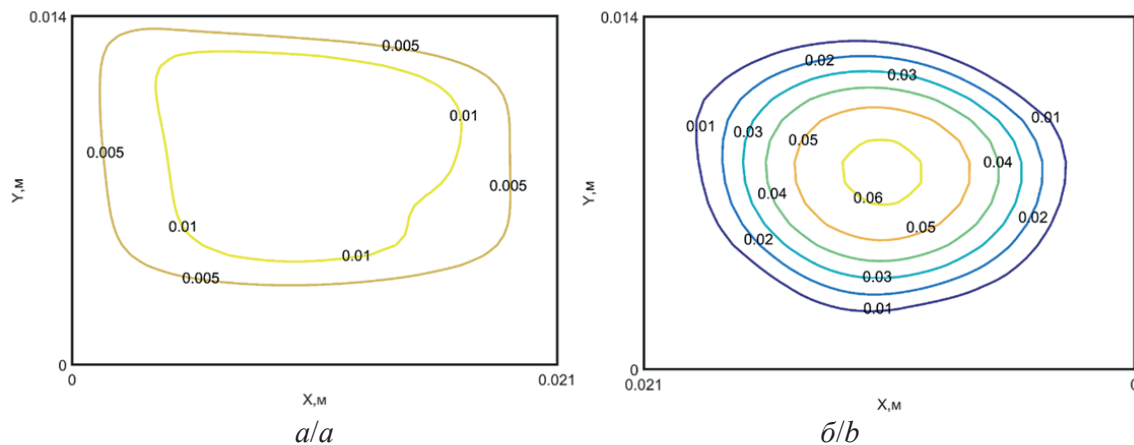


Рис. 5. Линии тока в слое теплоносителя на нижней крышке термосифона при $q=0,4$ кВт/м² и времени: а) 300 с, б) 6000 с

Fig. 5. Current lines in the coolant layer on the bottom cover of thermosiphon at $q=0,4$ kW/m² and time: а) 300 s; б) 6000 s

Заключение

По результатам анализа и обобщения выполненных ранее экспериментальных исследований сформирована математическая модель теплопереноса на нижней крышке термосифона, отличающаяся от известных учетом процессов термогравитационной конвекции. Сравнение результатов численного моделирования с использованием этой модели и полученных в экспериментах зависимостей температур в характерных точках области анализа от времени показало их хорошее соответствие. Установлено, что свободная конвекция в слое теплоносителя при достаточно высоких те-

пловых потоках к нижней поверхности термосифона играет важную роль в формировании температурного поля жидкости и скорости ее испарения со свободной поверхности. Результаты численных исследований дают основания для вывода о перспективности использования предложенного в работе подхода к описанию тепловых режимов замкнутых двухфазных термосифонов.

Исследование проведено в рамках программы повышения конкурентоспособности Национального исследовательского Томского политехнического университета среди ведущих мировых научно-образовательных центров (Госзадание «Наука» 8.13264.2018/8.9, проект ВИУ-ИШЭ-300/2018).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Томаров Г.В., Шипков А.А. Современная геотермальная энергетика: геотермальные электростанции с бинарным циклом // Теплоэнергетика. – 2017. – № 4. – С. 3–12.
2. Гнатусь Н.А., Хуторской М.Д., Хмелевской В.К. Петроптермальная геотермальная и геофизика // Вест. Моск. Ун-та. Сер. 4. Геология. – 2011. – № 3. – С. 3–9.
3. Kim C., Lee K.-S., Yook S.-J. Effect of air-gap fans on cooling of windings in a large-capacity, high-speed induction motor // Applied Thermal Engineering. – 2016. – V. 100. – P. 658–667.
4. Thermal enhancement by using grooves and ribs combined with delta-winglet vortex generator in a solar receiver heat exchanger / L. Luo, F. Wen, L., Wang B. Sundén, S. Wang // Applied Energy. – 2016. – V. 183. – P. 1317–1332.
5. Ibrahim E., Moawed M., Berbish N.S. Heat transfer characteristics of rotating triangular thermosyphon // Heat Mass Transfer. – 2012. – V. 48. – P. 1539–1548.
6. Two-phase closed thermosyphons: a review of studies and solar applications / D. Jafari, A. Franco, S. Filippeschi, P. Di Marco // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – V. 53. – P. 575–593.
7. Theoretical and Experimental Analysis of the Steady Flow Across the Cylinderhead of a Low-Capacity Engine / A. Castilla, M. Rubio, C. Ferrera, J.M. Montanero, J. Fernández // Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME. – 2016. – V. 83. – Iss. 12. – 4 p. DOI: 10.1115/1.4034619.
8. Kumar A., Dhiman A., Baranyi L. Fluid flow and heat transfer around a confined semi-circular cylinder: Onset of vortex shedding and effects of Reynolds and Prandtl numbers // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2016. – V. 102. – P. 417–425.
9. Kuznetsov G.V., Sitnikov A.E. Numerical analysis of basic regularities of heat and mass transfer in high-temperature heat pipe // TVT. – 2002. – V. 40. – Iss. 6. – P. 964–970.
10. Kuznetsov G.V., Al-Ani M.A., Sheremet M.A. Numerical analyses of convective heat transfer in a closed two-phase thermosiphon // Journal of Engineering Thermophysics. – 2011. – V. 20 (2). – P. 201–210.
11. Fadhl B., Wrobel L.C., Jouhara H. Numerical modelling of the temperature distribution in a two-phase closed thermosyphon // Applied Thermal Engineering. – 2013. – V. 60. – P. 122–131.
12. Gautam P., Chandy A.J. Numerical investigation of the air pumping noise generation mechanism in tire grooves // Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of the ASME. – 2016. – V. 135. – Iss. 5. – 8 p. DOI: 10.1115/1.4033342.
13. Numerical modeling of current loads on a net cage considering fluid-structure interaction / Y. Yao, Y. Chen, H. Zhou, H. Yang // Journal of Fluids and Structures. – 2016. – V. 62. – P. 350–366.
14. Gilani S., Montazeri H., Blocken B. CFD simulation of stratified indoor environment in displacement ventilation: Validation and sensitivity analysis // Building and Environment. – 2016. – V. 95. – P. 299–313.
15. Nurpeis A., Ponomarev K., Nemova T. Peculiarities of temperature fields formation in vapor channels of thermosyphons with heat carriers boiling at low temperatures // MATEC Web of Conf. – 2017. – V. 141. – 4 p. URL: doi.org/10.1051/mateconf/201714101005 (дата обращения 29.03.2019).
16. Nurpeis A., Orlova E., Ponomarev K. An experimental study of the influence of a thermosyphon filling ratio on a temperature distribution in characteristic points along the vapor channel height // MATEC Web of Conf. – 2017. – V. 110. – 5 p. URL: doi.org/10.1051/mateconf/201711001062 (дата обращения 29.03.2019).
17. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Evaporation of single droplets and dispersed liquid flow in motion through high-temperature combustion products // High Temperature. – 2014. – V. 52. – P. 568–575.
18. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Numerical investigation of the influence of convection in a mixture of combustion products on the integral characteristics of the evaporation of a finely atomized water drop // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2014. – V. 87. – P. 103–111.
19. Fadhl B., Wrobel L.C., Jouhara H. Numerical modelling of the temperature distribution in a two-phase closed thermosyphon // Applied Thermal Engineering. – 2013. – V. 60. – P. 122–131.
20. Eidan A.A., Najim S.E., Jalil J.M. An experimental and a numerical investigation of HVAC system using thermosyphon heat exchangers for sub-tropical climates // Applied Thermal Engineering. – 2017. – V. 114. – P. 693–703.
21. Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Evaporation of two liquid droplets moving sequentially through high-temperature combustion products // Thermophysics and Aeromechanics. – April 2014. – V. 21. – Iss. 2. – P. 255–258.
22. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. The motion of a manifold of finely dispersed liquid droplets in the counterflow of high-temperature gases // Technical Physics Letters. – July 2014. – V. 40. – Iss. 6. – P. 499–502.
23. Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Influence of the initial parameters of spray water on its motion through a counter flow of high-temperature gases // Technical Physics. – July 2014. – V. 59. – Iss. 7. – P. 959–967.
24. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Численные методы решения задач конвекции-диффузии. – М.: Эдиториал УРСС, 1999. – 248 с.
25. Mathematical simulation of thermophysical and thermochemical processes during combustion of intumescent fire-protective coating / V.L. Strakhov, A.N. Garaschenko, G.V. Kuznetsov, V.P. Rudzinskii // Combustion, Explosion and Shock Waves. – 2001. – V. 37. – P. 178–186.

Поступила 03.04.2019 г.

Информация об авторах

Максимов В.И., кандидат технических наук, доцент Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова, Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Нурпейис А.Е., ассистент Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова, Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 536.24

NEW APPROACH TO MODELLING THE FORMATION OF LARGE-SIZED THERMOSIPHONS THERMAL REGIME FOR USING GEOTHERMAL HEAT

Vyacheslav I. Maksimov¹,
elf@tpu.ru

Atlant E. Nurpeiis¹,
nurpeiis_atlant@mail.ru

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

The relevance of the research is caused by the necessity to develop mathematical models of thermophysical processes occurring in thermosiphons. These models are significantly less complex than the known ones, where sophisticated hydrodynamics problems are solved for vapor channel. However, at the same time they provide the possibility of adequate predictive modeling of heat transfer processes in thermosiphons and determining their main characteristics (temperature, heat fluxes, and evaporation rates) which are necessary to create heat supply systems using geothermal and petrothermal energy of the deep layers of the earth when heat transfers by high thermosiphons system.

The main aim of the research is the validation of new approach to description of heat transfer in thermosiphons, which are the main elements of the system for extracting heat from the deeper layers of the earth (geothermal and petrothermal energy) by comparing the results of mathematical modeling of temperatures within the framework of the new model at characteristic points of the coolant layer and experimental results.

Object: two-phase close thermosiphon

Method. The formulated boundary problem of mathematical physics was solved by the finite difference method.

Results. Based on the analysis and synthesis of experimental results, the authors have developed a new approach to mathematical modeling of thermal regime formation of high thermosiphons for using geothermal heat. We formulated mathematical modeling describing heat transfer in a coolant layer on the bottom cover of thermosiphon. This model provides to make reliable prediction of evaporation (or boiling) rates of a coolant. The model differs from the known ones by description of conduction, as well as natural convection in the coolant layer. A good agreement was established between the results of numerical calculations of temperature fields in the area of analysis and the experiments. Numerical studies were performed on a spatial grid of 36×101 , the time step was varied in the range from 10^{-3} to 10^{-6} s. We considered the range of heat fluxes q corresponding to the conditions of intense evaporation on the free surface of the coolant layer. Experimentally and numerically obtained temperatures at a point located on the symmetry axis of a thermosiphon at a distance of 6 mm from the surface of its bottom cover were compared. N-pentane, a low-boiling liquid that can be used in thermosiphons at relatively low temperature (up to 40 °C) of rock or water, was considered as a coolant. The temperature fields obtained in the experiments and numerical simulations agree well. Natural convection in the coolant layer at sufficiently high heat fluxes to the lower surface of the thermosiphon plays an important role in formation of liquid temperature field and the rate of its evaporation from the free surface. The developed approach can be used for analysis of geothermal and petrothermal heat supply systems when extracting heat from the deeper layers of the earth using a group of high thermosiphons.

Key words:

Two-phase thermosiphon, mathematical modelling, heat flux, heat transfer, evaporation, condensation, thermo-gravitational convection.

The study was conducted in the framework of the program of increasing the competitiveness of National Research Tomsk Polytechnic University among world's leading research and educational centers (state assignment «Science» 8.13264.2018/8.9, project VIU-ISHE-300/2018).

REFERENCES

1. Tomarov G.V., Shipkov A.A. Modern geothermal power: Binary cycle geothermal power plants. *Thermal Engineering*, 2017, no. 4, pp. 3–12. In Rus.
2. Gnatus N.A., Khutorskoy M.D., Khmelevskoy V.K. Petrothermal energy and Geophysics. *Moscow University Geology Bulletin. Geology*, 2011, no. 3, pp. 3–9. In Rus.
3. Kim C., Lee K.-S., Yook S.-J. Effect of air-gap fans on cooling of windings in a large-capacity, high-speed induction motor. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 100, pp. 658–667.
4. Luo L., Wen F., Wang L., Sundén B., Wang S. Thermal enhancement by using grooves and ribs combined with delta-winglet vortex generator in a solar receiver heat exchanger. *Applied Energy*, 2016, vol. 183, pp. 1317–1332.
5. Ibrahim E., Moawed M., Berbish N. S. Heat transfer characteristics of rotating triangular thermosiphon. *Heat Mass Transfer*, 2012, vol. 48, pp. 1539–1548.
6. Jafari D., Franco A., Filippeschi S., Di Marco P. Two-phase closed thermosiphons: a review of studies and solar applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 53, pp. 575–593.
7. Castilla A., Rubio M., Ferrera C., Montanero J. M., Fernández J. Theoretical and Experimental Analysis of the Steady Flow Across the Cylinderhead of a Low-Capacity Engine. *Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME*, 2016, vol. 83, Iss. 12, 4 p. DOI: 10.1115/1.4034619.
8. Kumar A., Dhiman A., Baranyi L. Fluid flow and heat transfer around a confined semi-circular cylinder: Onset of vortex shedding and effects of Reynolds and Prandtl numbers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, vol. 102, pp. 417–425.
9. Kuznetsov G.V., Sitnikov A.E. Numerical analysis of basic regularities of heat and mass transfer in high-temperature heat pipe. *TVT*, 2002, vol. 40, Iss. 6, pp. 964–970.
10. Kuznetsov G.V., Al-Ani M.A., Sheremet M.A. Numerical analyses of convective heat transfer in a closed two-phase thermos-

- iphon. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2011, vol. 20 (2), pp. 201–210.
11. Fadhl B., Wrobel L.C., Jouhara H. Numerical modelling of the temperature distribution in a two-phase closed thermosiphon. *Applied Thermal Engineering*, 2013, vol. 60, pp. 122–131.
12. Gautam P., Chandy A.J. Numerical investigation of the air pumping noise generation mechanism in tire grooves. *Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of the ASME*, 2016, vol. 135, Iss. 5, 8 p. DOI: 10.1115/1.4033342.
13. Yao Y., Chen Y., Zhou H., Yang H. Numerical modeling of current loads on a net cage considering fluid-structure interaction. *Journal of Fluids and Structures*, 2016, vol. 62, pp. 350–366.
14. Gilani S., Montazeri H., Blocken B. CFD simulation of stratified indoor environment in displacement ventilation: Validation and sensitivity analysis. *Building and Environment*, 2016, vol. 95, pp. 299–313.
15. Nurpeiis A., Ponomarev K., Nemova T. Peculiarities of temperature fields formation in vapor channels of thermosyphons with heat carriers boiling at low temperatures. *MATEC Web of Conf.*, 2017. Vol. 141, 4 p. Available at: doi.org/10.1051/matecconf/201714101005 (accessed 29 March 2019).
16. Nurpeiis A., Orlova E., Ponomarev K. An experimental study of the influence of a thermosyphon filling ratio on a temperature distribution in characteristic points along the vapor channel height. *MATEC Web of Conf.*, 2017. Vol. 110, 5 p. Available at: doi.org/10.1051/matecconf/201711001062 (accessed 29 March 2019).
17. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Evaporation of single droplets and dispersed liquid flow in motion through high-temperature combustion products. *High Temperature*, 2014, V. 52, pp. 568–575.
18. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Numerical investigation of the influence of convection in a mixture of combustion products on the integral characteristics of the evaporation of a finely atomized water drop. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2014, vol. 87, pp. 103–111.
19. Fadhl B., Wrobel L.C., Jouhara H. Numerical modelling of the temperature distribution in a two-phase closed thermosiphon. *Applied Thermal Engineering*, 2013, vol. 60, pp. 122–131.
20. Eidan A.A., Najim S.E., Jalil J.M. An experimental and a numerical investigation of HVAC system using thermosyphon heat exchangers for sub-tropical climates. *Applied Thermal Engineering*, 2017, vol. 114, pp. 693–703.
21. Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Evaporation of two liquid droplets moving sequentially through high-temperature combustion products. *Thermophysics and Aeromechanics*, April 2014, vol. 21, Iss. 2, pp. 255–258.
22. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. The motion of a manifold of finely dispersed liquid droplets in the counterflow of high-temperature gases. *Technical Physics Letters*, July 2014, vol. 40, Iss. 6, pp. 499–502.
23. Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Influence of the initial parameters of spray water on its motion through a counter flow of high-temperature gases. *Technical Physics*, July 2014, vol. 59, Iss. 7, pp. 959–967.
24. Samarskiy A.A., Vabishchevich P.N. *Chislennyye metody resheniya zadach konveksii-diffuzii* [Numerical methods for solving convection-diffusion problems]. Moscow, Editorial URSS Publ., 1999. 248 p. In Rus.
25. Strakhov V.L., Garaschenko A.N., Kuznetsov G.V., Rudzinskii V.P. Mathematical simulation of thermophysical and thermos chemical processes during combustion of intumescent fire-protective coating. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2001, vol. 37, pp. 178–186.

Received: 3 April 2019.

Information about the authors

Vyacheslav I. Maksimov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Atlant E. Nurpeiis, assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 544.5

ВЛИЯНИЕ БЕТА-ОБЛУЧЕНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ АКТИВНОСТИ МИКРОПОРОШКОВ АЛЮМИНИЯ

Ильин Александр Петрович¹,
ilyin@tpu.ru

Мостовщиков Андрей Владимирович^{1,2},
avmost@tpu.ru

Роот Людмила Олеговна¹,
tolbanova@mail.ru

Змановский Сергей Владиславович³,
zmanovskiy@rusal.com

Исмаилов Данияр Валерьевич⁴,
Ismaïlov_Daniyar_V@bk.ru

Рузиева Гузель Усеиновна⁴,
guzel.ruzieva@mail.ru

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

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

³ ООО «СУАЛ ПМ»,
Россия, г. Шелехов, ул. Южная, 2.

⁴ Казахский национальный университет им. Аль-Фараби,
Республика Казахстан, 050040, г. Алматы, пр. Аль-Фараби, 71.

Актуальность. Микропорошки алюминия являются сырьем для многих отраслей промышленности: порошковой металлургии, самораспространяющегося высокотемпературного синтеза новых материалов, водородной энергетики, пиротехники и ракетных топлив. Улучшение характеристик порошков алюминия способствует повышению их качества. Известные способы активирования порошков алюминия путем введения в состав алюминия добавок редкоземельных элементов, соединений ванадия, кремния, бора и других элементов приводит к загрязнению алюминия примесями. Облучение микропорошков β -частицами с энергией менее 8 МэВ не приводит к наведенной радиоактивности и в то же время активирует микропорошки алюминия.

Цель: получение и объяснение экспериментальных данных по изменению параметров активности микропорошков алюминия после их облучения в зависимости от дозы β -облучения.

Объекты: микропорошки алюминия АСД-6, АСД-6М, АСД-8, АСД-10, полученные распылением расплава алюминия.

Методы: дифференциальный термический анализ, рентгенофазовый анализ, методика облучения микропорошков алюминия β -излучением, методика расчета параметров активности порошков алюминия.

Результаты. Получены количественные показатели реакционной способности микропорошков алюминия АСД-6, АСД-6М, АСД-8 и АСД-10 до и после облучения β -излучением ускорителя ЭЛУ-4 с энергией 4 МэВ, т. е. энергией существенно ниже порога фотоядерных реакций, приводящих к наведенной активности. Дозы облучения образцов порошков составляли 1, 2, 4 Мрад. После β -облучения температура начала окисления снизилась максимально на 205 °С; максимальная скорость окисления возросла на 0,19 мг/мин (106 %); степень окисленности микропорошка АСД-6М повысилась на 18,9 %, а микропорошка АСД-10 минимально понизилась на 12,3 %; удельный тепловой эффект окисления после всех доз β -облучения увеличился максимально для АСД-10 на 188,6 кДж/моль. Запасание энергии микропорошками после β -облучения связано с формированием двойного электрического слоя в частицах алюминия.

Ключевые слова:

Микропорошки, алюминий, параметры активности, облучение, β -излучение, запасенная энергия, теплота плавления.

Введение

Действие ионизирующего излучения на металлы интенсивно изучалось еще со времен появления атомной промышленности [1]. На современном этапе развития радиационной физики и химии действие ионизирующего излучения определяет ресурс металлоконструкций и безопасность их эксплуатации [2]. Ионизирующее излучение в раз-

личных материалах генерирует метастабильные энергонасыщенные структуры: в диэлектриках – объемные однополярные заряды [3], в галогенидах щелочных металлов – различные виды дефектов с запасенной энергией [4], в массивных металлах – точечные, плоские и объемные дефекты [5].

Несмотря на большой объем исследований по действию ионизирующего излучения на материа-

лы в 60–70-е годы прошлого века, к настоящему времени остались практически не изученными микропорошки алюминия, подвергаемые действию излучений [6]. Упрощенный подход к структуре порошков металлов как к массивному материалу, а не к композиционному «металл–оксид» привел к вычеркиванию из научных исследований нового научного направления.

Целью работы являлось получение и объяснение экспериментальных данных по изменению параметров активности микропорошков алюминия после их облучения в зависимости от дозы β -облучения.

Методики экспериментов и характеристики микропорошков алюминия

В качестве объекта исследования выбраны микропорошки алюминия АСД-6, АСД-6М, АСД-8, АСД-10, выпускающиеся в промышленном масштабе [7]. Согласно паспортным, данным дисперсность порошков возрастает по порядку увеличения номера в обозначении (табл. 1).

Таблица 1. Характеристики микропорошков алюминия ($S_{уд}$ – площадь удельной поверхности, d_s – среднееповерхностный диаметр частиц, $\omega(Al)$ – массовая доля Al^0 , h – расчетная средняя толщина оксидной пленки)

Table 1. Characteristics of aluminum micro powders (S_{sp} – specific surface area, d_s – average particle diameter, $\omega(Al)$ – mass fraction of Al^0 , h – estimated average thickness of the oxide film)

Вид порошка Type of powder	$S_{уд}$, м ² /г S_{sp} , m ² /g	d_s , мкм/mkm	$\omega(Al)$ мас. % wt. %	h , нм/nm
АСД-6 ASD-6	0,51	4,36	98	11,9
АСД-6М ASD-6M	0,63	3,53	97	5,1
АСД-8 ASD-8	0,84	2,65	97	9,8
АСД-10 ASD-10	0,94	2,36	96	7,6

Для облучения микропорошков использовали ускоритель электронов ЭЛУ-4: энергия потока электронов – 4 МэВ, длительность импульса – 4,5 мкс, частота – 400 Гц. Образцы микропорошков облучали в тонком слое толщиной ~2 мм в виде конверта из алюминиевой фольги толщиной 8 мкм. Длина пробега электронов превышала толщину облучаемого образца, т. е. облучение проводили «на прострел». Дозу облучения определяли с использованием стандартной методики с использованием цилиндра Фарадея [8]. При выбранной интенсивности (0,01 мкА/см²) облучения температура поверхности образца не превышала 40 °С.

Для определения реакционной способности микропорошков алюминия использовали дифференциальный термический анализ (ДТА) при линейном повышении температуры со скоростью 10 град/мин в атмосфере воздуха (термоанализатор SDT Q600 фирмы «Instrument»). Из практики исследований для количественной оценки реак-

ционной способности порошков металлов использовали четыре параметра активности: температура начала окисления ($t_{но}$, °С), максимальная скорость окисления (V_{max} , мг/мин), степень окисленности порошков (α , %) и удельный тепловой эффект окисления (ΔH , кДж/моль) [9, 10]. Термограммы порошков регистрировали в одинаковых условиях: масса образца – 5 мг, скорость нагрева – 10 град/мин, максимальная температура нагрева – 1250 °С, атмосфера – воздух. В то же время ДТА использовали в качестве метода определения величины запасенной энергии путем вычитания из величины ΔH облученного порошка алюминия величины ΔH этого же порошка до облучения.

Результаты экспериментов

Параметры активности порошков являются тестом на их индивидуальную реакционную способность. В табл. 2 приведены 4 параметра активности исходных порошков алюминия перед облучением.

Таблица 2. Параметры активности исходных микропорошков алюминия (температура начала окисления ($t_{но}$, °С), максимальная скорость окисления (V_{max} , мг/мин), степень окисленности порошков (α , %) и удельный тепловой эффект окисления (ΔH , кДж/моль))

Table 2. Activity parameters of the initial aluminium micro-powders (oxidation start temperature (t_{os} , °C), maximal oxidation rate (V_{max} , mg/min), oxidation degree (α , %) and the specific thermal effect (ΔH , kJ/mol))

Вид порошка Type of powder	$t_{но}/t_{ос}$, °С	V_{max} , мг/мин/mg/min	α , %	ΔH , кДж/моль/kJ/mol
АСД-6 ASD-6	550	0,12	21,3	117,8
АСД-6М ASD-6M	530	0,14	23,3	121,2
АСД-8 ASD-8	525	0,18	46,3	159,7
АСД-10 ASD-10	515	0,16	50,9	231,9

Параметры активности микропорошков (табл. 2) отражают их характеристики (табл. 1): с повышением дисперсности порошков реакционная способность возрастает: снижается температура начала окисления с 550 до 515 °С, и возрастает удельный тепловой эффект со 117,8 до 231,9 кДж/г. В то же время максимальная скорость окисления достигала своего максимального значения для АСД-8, а для порошка АСД-10 снизилась до 0,16 мг/мин.

Температуру начала окисления определяли по температуре начала увеличения массы при нагревании порошков (ТГ): результаты измерений $t_{но}$ представлены в табл. 3.

Максимальное снижение температуры начала окисления ($\Delta t_{но max}$) всех исследуемых порошков наблюдали после воздействия дозой 1 Мрад.

Максимальную скорость окисления определяли по отношению $\Delta m/\Delta t$ на линейном участке зависимости массы к температуре, соответствующей

линейному участку увеличения скорости. Полученную величину делили на 10 и получали скорость окисления в мг/мин.

Таблица 3. Температура начала окисления ($t_{\text{но}}$, °C) микронных порошков алюминия до и после β -облучения

Table 3. Oxidation start temperature (t_{os} , °C) of aluminum micron powders before and after β -radiation exposure

Вид порошка Type of powder	$t_{\text{но}}/t_{\text{ос}}, ^\circ\text{C}$				$\Delta t_{\text{но}} \text{ max (доза)}$ $\Delta t_{\text{ос}} \text{ max (exposure)}$
	Доза β -облучения, Мрад β -radiation exposure, Mrad				
	0	1	2	4	
АСД-6 ASD-6	550	345	515	475	205 (1 Мрад)/(1 Mrad)
АСД-6М ASD-6M	530	390	560	490	140 (1 Мрад)/(1 Mrad)
АСД-8 ASD-8	525	425	475	448	100 (1 Мрад)/(1 Mrad)
АСД-10 ASD-10	515	430	430	460	85 (1 Мрад)/(1 Mrad)

Таблица 4. Максимальная скорость окисления (V_{max} , мг/мин) микронных порошков алюминия до и после β -облучения

Table 4. Maximal oxidation rate (V_{max} , mg/min) of aluminum micron powders before and after β -radiation exposure

Вид порошка Type of powder	$V_{\max}$, мг/мин/mg/min				$\Delta V_{\max}$, мг/мин (доза) mg/min (exposure)
	Доза β -облучения, Мрад β -radiation exposure, Mrad				
	0	1	2	4	
АСД-6 ASD-6	0,12	0,08	0,17	0,10	0,05 (2 Мрад)/(2 Mrad)
АСД-6М ASD-6M	0,14	0,18	0,23	0,12	0,09 (2 Мрад)/(2 Mrad)
АСД-8 ASD-8	0,18	0,15	0,37	0,20	0,19 (2 Мрад)/(2 Mrad)
АСД-10 ASD-10	0,16	0,25	0,19	0,19	0,09 (1 Мрад)/(1 Mrad)

Максимальное увеличение максимальной скорости окисления (ΔV_{max}) наблюдали после облучения дозой 2 Мрад за исключением порошка АСД-10, для которого максимум скорости наблюдали после облучения дозой 1 Мрад. Увеличение V_{max} происходило при окислении порошка АСД-8 практически в 2 раза с 0,18 до 0,37 мг/мин после облучения дозой 2 Мрад (табл. 4).

После β -облучения степень окисленности с увеличением дозы изменялась неоднозначно: максимальных значений α достигала после облучения дозой 2 Мрад, но α порошка АСД-10 после облучения снизилась для всех доз облучения. Результаты расчетов α после β -облучения приведены в табл. 5, $\Delta\alpha_{\text{max}}$ рассчитывали как разность между максимальной величиной α после облучения и исходной α для порошков до их облучения.

До облучения исходные порошки (табл. 1) характеризовались явно выраженной зависимостью повышения α с ростом дисперсности порошков, но уже после облучения дозой 1 Мрад эта закономер-

ность нарушалась (табл. 5). После облучения порошка АСД-10 всеми дозами происходило снижение α : максимально в 4 раза после β -облучения дозой 1 Мрад.

Таблица 5. Степень окисленности (α , %) микронных порошков алюминия до и после β -облучения

Table 5. Oxidation degree (α , %) of aluminum micron powders before and after β -radiation exposure

Вид порошка Type of powder	α , % (до/up to 1400 °C)				$\Delta\alpha_{\text{max}}$, % (доза)/(exposure)
	Доза β -облучения, Мрад β -radiation exposure, Mrad				
	0	1	2	4	
АСД-6 ASD-6	21,3	18,9	25,0	21,9	3,7 (2 Мрад)/(2 Mrad)
АСД-6М ASD-6M	23,3	17,8	42,2	21,1	18,9 (2 Мрад)/(2 Mrad)
АСД-8 ASD-8	40,3	26,1	44,4	30,3	-4,1 (2 Мрад)/(2 Mrad)
АСД-10 ASD-10	50,9	12,5	38,6	29,6	-12,3 (2 Мрад)/(2 Mrad)

Процесс окисления порошкообразного алюминия сопровождается выделением тепловой энергии (837 кДж/моль) и протекает в режиме саморазогрева – теплового взрыва [11]. Величины удельных тепловых эффектов, рассчитанные по данным дифференциального термического анализа, приведены в табл. 6.

Таблица 6. Удельный тепловой эффект окисления (ΔH , кДж/моль) микронных порошков алюминия до и после их β -облучения

Table 6. Specific heat effect of oxidation (ΔH , kJ/mol) of aluminum micron powders before and after β -radiation exposure

Вид порошка Type of powder	ΔH , кДж/моль/kJ/mol				ΔH_{max} , кДж/моль (доза) kJ/mol (exposure)
	Доза β -облучения, Мрад β -radiation exposure, Mrad				
	0	1	2	4	
АСД-6 ASD-6	117,8	160,1	291,7	230,2	173,9 (2 Мрад)/(2 Mrad)
АСД-6М ASD-6M	121,2	136,2	170,6	178,5	57,3 (4 Мрад)/(4 Mrad)
АСД-8 ASD-8	159,7	261,6	339,2	255,6	179,5 (2 Мрад)/(2 Mrad)
АСД-10 ASD-10	231,9	309,3	420,5	298,8	188,6 (2 Мрад)/(2 Mrad)

Во всех экспериментах β -облучение привело к повышению удельного теплового эффекта окисления исследуемых порошков: максимальное повышение теплового эффекта (ΔH_{max}) наблюдалось после облучения дозой 2 Мрад, исключение составил образец порошка АСД-6М, для которого максимум ΔH наблюдался после облучения дозой 4 Мрад. Таким образом, максимальная запасенная энергия по величине превысила стандартную теплоту плавления после β -облучения в 5,4 (АСД-6М) и в 17,8 раз (АСД-10).

Обсуждение результатов

Микропорошки алюминия АСД-6, АСД-6М, АСД-8 и АСД-10 представляют собой композит, в структуре которого имеется фаза металла и рентгенаморфная фаза оксидов и гидроксидов [12–14]. Облучение микропорошков потоком ускоренных электронов действует на обе фазы. После облучения реакционная способность порошков металлов повышалась (табл. 3): температура начала окисления для всех изучаемых порошков снижалась (1 Мрад). Вероятной причиной снижения является генерирование дефектов в оксидно-гидроксидной оболочке потоком β -частиц [15]. Максимально $t_{\text{но}}$ после облучения снизилась на 205 °С, т. е. реакционная способность порошков алюминия возросла. Облучение порошков алюминия потоком β -частиц привело в целом к повышению V_{max} максимально в 2 раза (табл. 4), что коррелирует с понижением термической устойчивости оксидно-гидроксидной оболочки на поверхности частиц алюминия (табл. 3). При нагревании порошков алюминия наряду с окислением протекают процессы спекания и слияния капель жидкого алюминия [16, 17], что снижает дисперсность и степень окисленности порошка [18]. Действительно, наиболее дисперсный и более склонный к спеканию порошок АСД-10 характеризуется снижением α после облучения (табл. 5). Наиболее значительным действием β -облучения является увеличение удельного теплового эффекта окисления, в 5,4–17,8 раз превышающего стандартное значение теплоты плавления алюминия, и это обусловлено наличием запасенной энергии [19, 20].

При нагревании запасенная энергия проявляется в форме дополнительного энергосвечения и стимулирует процессы спекания [21], горения [22], химические реакции [21] и др. Следовательно, β -облучение способствует формированию наноструктур [23], активирует микропорошки алюминия, что перспективно для применения в процессах 3D-печати, в порошковой металлургии [24], при горении [25], в химических реакциях [26], при изготовлении специальной керамики [27] и других процессах.

Выводы

1. Облучение микропорошков алюминия АСД-6, АСД-6М, АСД-8, АСД-10 потоком ускоренных β -частиц приводило к повышению их реакционной способности: снижалась температура начала окисления максимально на 205 °С (АСД-6, 1 Мрад), увеличивалась максимальная скорость окисления максимально в 2 раза (АСД-8, 2 Мрад), степень окисленности максимально увеличивалась на 81,1 % (АСД-6М, 2 Мрад), и повышался удельный тепловой эффект окисления максимально на 81,3 % (АСД-10, 2 Мрад).
2. Облучение микропорошков алюминия АСД-6, АСД-6М, АСД-8 и АСД-10 потоком β -частиц приводило к повышению запасенной энергии максимально на 57,3–188,6 кДж/моль, что в 5,4–17,8 раз больше стандартной теплоты плавления алюминия.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, проект № 11.1928.2017/4.6, и Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 19-03-00160.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гордиенко П.С. Методика измерения запасенной энергии в облученных материалах. – Дмитровград: НИИАР им. В.И. Ленина (П-168), 1972. – 44 с.
2. Самойлов О.Б., Усынин Г.Б., Бахметьев А.М. Безопасность ядерных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 280 с.
3. Ушаков В.Я., Боев С.Г. Радиационное накопление зарядов в твердых диэлектриках и методы его диагностики. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 240 с.
4. Воробьев А.А., Завадовская Е.К., Головачевский Е.М. Запасенная энергия в щелочногалогенных кристаллах // Известия Томского политехнического института. – 1969. – Т. 170. – С. 8–24.
5. Fundamentals of the Interaction of Electron Beams with Matter / H. Svensson, P. Almond, A. Brahme, A. Dutreix, H.K. Leetz // Journal of the International Commission on Radiation Units and Measurements. – 1984. – V. 18. – Iss. 2. – P. 3–41.
6. Mills K.C., Däcker C.-Å. The Casting Powders Book. – Springer Int. Publ. AG, 2017. – 550 p.
7. Conditions of Millisecond Laser Ignition and Thermostability for Ammonium Perchlorate/Aluminum Mixtures / V.V. Medvedev, V.P. Tsipilev, A.A. Reshetov, A.P. Ilyin // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. – 2017. – V. 42. – Iss. 3. – P. 243–246.
8. Физический энциклопедический словарь / под ред. А.М. Прохорова. – М.: Советская энциклопедия, 1984. – С. 149–151.
9. Wendlandt W.W. Thermal Methods of Analysis. 2nd ed. – NY: John Wiley & Sons, 1974. – 524 p.
10. Characterization of Aluminum Powders I. Parameters of Reactivity of Aluminum Powders / A. Ilyin, A. Gromov, V. An, F. Faubert, C. de Izarra, A. Espagnacq, L. Brunet // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. – 2002. – V. 27. – Iss. 6. – P. 361–364.
11. Федоров А.В., Харламова Ю.В. Воспламенение частиц алюминия // Физика горения и взрыва. – 2003. – Т. 39. – № 5. – С. 65–68.
12. Heat release measurements on micron and nano-scale aluminum powders / A. Morgan, I. Wolf, E. Gulians et al. // Thermochimica Acta. – 2009. – V. 488. – P. 1–9.
13. Alexander M.R., Thompson G.E., Beamson G. Characterization of oxide/hydroxide surface of aluminium using x-ray photoelectron spectroscopy: a procedure for curve fitting the O 1s core level // Surface and Interface Analysis. – 2000. – V. 29. – Iss. 7. – P. 468–477.
14. Influence of Dispersivity of Micron-Sized Aluminium Powders on their Resistance to Water Vapor / S.V. Zmanovskiy, V.V. Smirnova, A.V. Korshunov, A.P. Ilyin // Key Engineering Materials. – 2017. – V. 712. – P. 251–255.
15. Beckstead M.W. A Summary of Aluminum Combustion. – Provo, Utah, USA: Brigham Young University, 2002. – 45 p.
16. Ивсенен В.А. Феноменология спекания. – М.: Металлургия, 1985. – 247 с.
17. Герузин Я.Е. Физика спекания. – М.: Наука, 1984. – 312 с.
18. Андиферов В.Н., Бобров Г.В., Дружинин Л.К. Порошковая металлургия и напыленные покрытия. – М.: Металлургия, 1987. – 792 с.
19. Ильин А.И., Крапошин В.С. Стеклообразные структуры в металлических сплавах, подвергнутых действию высокоэнерге-

- тических пучков // Поверхность. Физика, химия, механика. – 1985. – № 6. – С. 5–16.
20. Mostovshchikov A.V., Ilyin A.P., Egorov I.S. Effect of electron beam irradiation on the thermal properties of the aluminum nanopowder // Radiation Physics and Chemistry. – 2018. – V. 153. – P. 156–158.
21. Bing-She Xu, Shun-Ichiro Tanaka. Behavior and bonding mechanisms of aluminum nanoparticles by electron beam irradiation // Nanostructured Materials. – 1999. – V. 12. – P. 915–918.
22. Жуков Б.П. Энергетические конденсированные системы. Краткий энциклопедический словарь. – М.: Янус-К, 2000. – 596 с.
23. Electron-beam induced synthesis of nanostructures: a review / I.G. Gonzalez-Martinez, A. Bachmatiuk, V. Bezugly, J. Kunstmann, T. Gemming, Z. Liu, G. Guniberti, M.H. Rummeli // Nanoscale. – 2016. – V. 8. – P. 11340–11362.
24. Sergeev G.B., Klabunde K.J. Nanochemistry. 2nd ed. – Elsevier, 2013. – 372 p.
25. Brown L.E. A comparative study of fuels for on-board hydrogen production for fuel-cell-powered automobiles // International Journal on Hydrogen Energy. – 2001. – V. 26. – P. 381–397.
26. Сравнительная оценка различных методов гидролизного получения водорода / Л.И. Тунгусова, А.Л. Дмитриев, В.Г. Гришин, Н.С. Прохоров // Химическая промышленность. – 2003. – Т. 80. – № 9. – С. 14–18.
27. On the effects of powder morphology on the post-comminution ballistic strength of ceramics / G.J. Appleby-Thomas, D.C. Wood, A. Hameed, J. Painter, B. Fitzmaurice // International Journal of Impact Engineering. – 2017. – V. 100. – P. 46–55.

Поступила 14.02.2019 г.

Информация об авторах

Ильин А.П., доктор физико-математических наук, профессор отделения естественных наук Школы базовой инженерной подготовки Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Мостовщиков А.В., кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории СВЧ-технологий Инженерной школы ядерных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета, доцент кафедры физической электроники Факультета электронной техники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

Роот Л.О., кандидат технических наук, доцент отделения естественных наук Школы базовой инженерной подготовки Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Змановский С.В., кандидат технических наук, директор Центра инноваций ООО «СУАЛ ПМ».

Исмаилов Д.В., аспирант Казахского национального университета им. Аль-Фараби.

Рузиева Г.У., магистрант Казахского национального университета им. Аль-Фараби.

UDC 544.5

EFFECT OF BETA-RADIATION EXPOSURE ON THE PARAMETERS OF ALUMINUM MICROPOWDERS ACTIVITY

Alexander P. Ilyin¹,

ilyin@tpu.ru

Andrei V. Mostovshchikov^{1,2},

avmost@tpu.ru

Lyudmila O. Root¹,

tolbanova@mail.ru

Sergey V. Zmanovskiy³,

zmanovskiy@rusal.com

Daniyar V. Ismailov⁴,

Ismailov_Daniyar_V@bk.ru

Guzel U. Ruzieva⁴,

guzel.ruzieva@mail.ru

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

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

³ OOO SUAL PM,
2, Yuzhnaya street, Shelekhov, Russia.

⁴ Al-Farabi Kazakh National University,
71, Al-Farabi avenue, Almaty, 050040, Republic of Kazakhstan.

The relevance. Aluminum micropowders are the precursors in many industries, such as powder metallurgy, self-propagating high-temperature synthesis of new materials, hydrogen energy, pyrotechnics and rocket fuels. Improvement of characteristics of aluminum powders contributes to their quality. The known methods of aluminum powders activation by addition of rare-earth elements, vanadium compounds, silicon, boron and other elements into the aluminum mixtures composition lead to contamination of aluminum with impurities. β -radiation exposure of micropowders with the energy less than 8 MeV does not lead to induced radioactivity and activates aluminum micropowders at the same time.

The main aim of the paper was reception and explanation of experimental results on the activity parameters of aluminum micropowders after exposure, depending on the β -radiation dose.

Objects: micron-scaled aluminium powders ASD-6, ASD-6M, ASD-8, ASD-10 obtained by aluminium fusion sputtering.

Methods: differential thermal analysis, X-ray diffraction analysis, the method of aluminum micropowders exposure with β -radiation, the method of calculation of the activity parameters of aluminum powders.

Results. The quantitative indicators of the ASD-6, ASD-6M, ASD-8, ASD-10 aluminum micro-powders reactivity before and after exposure in the ELU-4 accelerator by 4-MeV β -radiation (i. e. the energy is significantly lower than the threshold of photonuclear reactions) were obtained in the work. The doses of powder samples exposure were 1, 2, 4 Mrad. After β -radiation exposure the oxidation start temperature decreased maximally to 205 °C; maximum oxidation rate increased by 0,19 mg/min (106 m%); the oxidation degree of the ASD-6M micropowder increased by 18,9 %, and of the ASD-10 minimally decreased by 12,3 %; the specific thermal effect of oxidation after all doses of β -radiation increased maximally for ASD-10 by 188,6 kJ/mol. Energy storage by micropowders after β -radiation is caused by the formation of a double electric layer in aluminum particles.

Key words:

Micropowders, aluminum, activity parameters, exposure, β -radiation, stored energy, heat of fusion.

This work was financially supported by The Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Project No. 11.1928.2017/4.6, and by the Russian Fund of Fundamental Investigations, Project No. 19-03-00160.

REFERENCES

- Gordienko P.S. *Metodika izmereniya zapasennoy energii v obluchennykh materialakh* [Methods for measuring of stored energy in irradiated materials]. Dimitrovgrad, NIAR im. V.I. Lenina (P-168) Publ., 1972. 44 p.
- Samoylov O.B., Usynin G.B., Bakhmetyev A.M. *Bezopasnost yadernykh energeticheskikh ustanovok* [Safety of nuclear power plants]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 280 p.
- Ushakov V.Ya., Boev S.G. *Radiatsionnoe nakoplenie zaryadov v tverdykh dielektrikakh i metody ego diagnostiki* [Radiation accumulation of charge in solid dielectrics and the methods of its diagnostics]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 240 p.
- Vorobyev A.A., Zavazovskaya E.K., Golovchanskiy E.M. *Zapassennaya energiya v shchelochnogaloidnykh kristallakh* [The stored energy in alkaline halide crystals]. *Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo instituta*, 1969, vol. 170, pp. 8–24.
- Svensson H., Almond P., Brahme A., Dutreix A., Leetz H.K. *Fundamentals of the Interaction of Electron Beams with Matter. Journal of the International Commission on Radiation Units and Measurements*, 1984, vol. 18, Iss. 2, pp. 3–41.
- Mills K.C., Däcker C.-Å. *The Casting Powders Book*. Springer Int. Publ. AG, 2017. 550 p.
- Medvedev V.V., Tsipilev V.P., Reshetov A.A., Ilyin A.P. Conditions of Millisecond Laser Ignition and Thermostability for Ammonium Perchlorate/Aluminum Mixtures. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2017, vol. 42, Iss. 3, pp. 243–246.
- Fizicheskii entsiklopedicheskiy slovar* [Physical Encyclopedic Dictionary]. Ed. by A.M. Prokhorov. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1984. pp. 149–151.
- Wendlandt W.W. *Thermal Methods of Analysis*. 2nd ed. NY, John Wiley & Sons, 1974. 524 p.
- Ilyin A., Gromov A., An V., Faubert F., de Izarra C., Espagnacq A., Brunet L. Characterization of Aluminum Powders I. Parameters of Reactivity of Aluminum Powders. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2002, vol. 27, Iss. 6, pp. 361–364.
- Fedorov A.V., Kharlamova Yu.V. *Vosplamnenie chastits alyuminiya* [Aluminium particles ignition]. *Fizika goreniya i vzryva*, 2003, vol. 39, no. 5, pp. 65–68.
- Morgan A., Wolf I., Gulians E. Heat release measurements on micron and nano-scale aluminum powders. *Thermochimica Acta*, 2009, vol. 488, pp. 1–9.
- Alexander M.R., Thompson G.E., Beamson G. Characterization of oxide/hydroxide surface of aluminium using x-ray photoelectron spectroscopy: a procedure for curve fitting the O 1s core level. *Surface and Interface Analysis*, 2000, vol. 29, Iss. 7, pp. 468–477.
- Zmanovskiy S.V., Smirnova V.V., Korshunov A.V., Ilyin A.P. Influence of Dispersivity of Micron-Sized Aluminium Powders on their Resistance to Water Vapor. *Key Engineering Materials*, 2017, vol. 712, pp. 251–255.
- Beckstead M.W. *A Summary of Aluminum Combustion*. Provo, Utah, USA, Brigham Young University, 2002. 45 p.
- Ivensen V.A. *Fenomenologiya spevaniya* [Phenomenology of sintering]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1985. 247 p.
- Geguzin Ya.E. *Fizika spevaniya* [Physics of sintering]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 312 p.
- Antsiferov V.N., Bobrov G.V., Druzhinin L.K. *Poroshkovaya metallurgiya i napylenye pokrytiya* [Powder metallurgy and sprayed coatings]. Moscow, Metallurgiya publ., 1987. 792 p.
- Ilyin A.I., Kraposhin V.S. *Stekloobraznye struktury v metallicheskiykh splavakh, podvergnutykh deystviyu vysokoenergeticheskikh puchkov* [Glasslike structures in metal alloys subjected to high-energy beams]. *Poverkhnost. Fizika, khimiya, mekhanika*, 1985, no. 6, pp. 5–16.
- Mostovshchikov A.V., Ilyin A.P., Egorov I.S., Effect of electron beam irradiation on the thermal properties of the aluminum nanopowder. *Radiation Physics and Chemistry*, 2018, vol. 153, pp. 156–158.
- Bing-She Xu, Shun-Ichiro Tanaka. Behavior and bonding mechanisms of aluminum nanoparticles by electron beam irradiation. *Nanostructured Materials*, 1999, vol. 12, pp. 915–918.
- Zhukov B.P. *Energeticheskie kondensirovannye sistemy. Kratkiy entsiklopedicheskiy slovar* [Energy condensed systems. A brief encyclopedic dictionary]. Moscow, Yanus-K Publ., 2000. 596 p.
- Gonzalez-Martinez I.G., Bachmatiuk A., Bezugly V., Kunstmann J., Gemming T., Liu Z., Guniberti G., Rummeli M.H. Electron-beam induced synthesis of nanostructures: a review. *Nanoscale*, 2016, vol. 8, pp. 11340–11362.
- Sergeev G.B., Klabunde K.J. *Nanochemistry*. 2nd ed. Elsevier, 2013. 372 p.
- Brown L.E. A comparative study of fuels for on-board hydrogen production for fuel-cell-powered automobiles. *International Journal on Hydrogen Energy*, 2001, vol. 26, pp. 381–397.
- Tungusova L.I., Dmitriev A.L., Grishin V.G., Prokhorov N.S. *Sravnitel'naya otsenka razlichnykh metodov gidroliznogo polucheniya vodoroda* [Comparative evaluation of various methods of hydrolyzing production of hydrogen]. *Khimicheskaya promyshlennost*, 2003, vol. 80, no. 9, pp. 14–18.
- Appleby-Thomas G.J., Wood D.C., Hameed A., Painter J., Fitzmaurice B. On the effects of powder morphology on the post-comminution ballistic strength of ceramics. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, vol. 100, pp. 46–55.

Received: 14 February 2019.

Information about the authors

Alexander P. Ilyin, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Andrei V. Mostovshchikov, Cand. Sc., senior researcher, National Research Tomsk Polytechnic University, associate professor, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.

Lyudmila O. Root, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Sergey V. Zmanovskiy, Cand. Sc., head of Innovation Centre of «SUAL PM».

Daniyar V. Ismailov, postgraduate student, Al-Farabi Kazakh National University.

Guzel U. Ruzieva, student, Al-Farabi Kazakh National University.

УДК 622.274

К ВОПРОСУ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДЗЕМНОГО ТУРИСТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА «ЦАРСТВО ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ»

Петров Андрей Николаевич¹,
petrow_andrei@mail.ru

Киселев Валерий Васильевич²,
helconst@mail.ru

Романова Елена Константиновна²,
helconst@mail.ru

Сивцева Алена Ивановна¹,
alyona_archibald@mail.ru

¹ Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова,
Россия, 677000, г. Якутск, ул. Белинского, 58.

² Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской Академии наук,
Россия, г. Якутск, ул. Ленина, 43.

Актуальность. Исследованиям теплового режима подземных сооружений различного назначения и разработке эффективных способов управления им в последние годы уделяется большое внимание. Это связано не только с интенсификацией освоения подземного пространства, но и с многообразием тепловых условий и степенью влияния температурного фактора на эффективность и безопасность строительства и эксплуатации подземных сооружений. Специфические условия криолитозоны, связанные в первую очередь с наличием многолетнемерзлых горных пород, предъявляют ряд дополнительных требований по безопасности при их строительстве и эксплуатации.

Объекты: штольни туристического комплекса «Царство вечной мерзлоты», расположенного на 5-м км Вилюйского тракта г. Якутска.

Цель: разработка мероприятий по обеспечению требуемого технического состояния, теплового режима и рекомендаций по креплению подземных горных выработок туристического комплекса, обеспечивающих устойчивость выработок и безопасные условия пребывания экскурсантов.

Методы: натурные исследования температурного режима, визуальное обследование горного склона и подземных горных выработок туристического комплекса, выбор рационального типа крепления, расчет параметров крепи, математическое моделирование и численные расчеты температурного режима.

Приведены результаты натурных исследований теплового режима подземных горных выработок туристического комплекса «Царство вечной мерзлоты» в зимний период эксплуатации, результаты визуального обследования горного склона, штолен и камер, и даны рекомендации по обеспечению устойчивости и креплению имеющихся зон вывалообразования. Выполнен расчет температурного режима комплекса «Царство вечной мерзлоты» и требуемой мощности холодильных машин с применением разработанного в лаборатории горной теплофизики Института горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской Академии наук программного комплекса MuseumCVM. Для сокращения энергозатрат на выработку искусственного холода в летний период рекомендовано проводить ежегодные осенние и весенние хладозарядки принудительной вентиляцией.

Ключевые слова:

Криолитозона, подземные горные выработки, многолетнемерзлые породы, температурный режим, горный массив, хладозарядка, глазировка, натурные наблюдения, крепление горных выработок, анкерная и рамная крепь, сопряжение горных выработок.

Введение

Произошедшие вывалы пород кровли в подземных горных выработках (ПГВ) туристического комплекса «Царство вечной мерзлоты» (ЦВМ) вынудили необходимость разработки превентивных мероприятий по предупреждению аварийных ситуаций. ЦВМ расположен в пригороде г. Якутска в основании Чочур-Муранской гряды в ранее пройденных в 80-х гг. прошлого века ПГВ ледника (подземного холодильника) для хранения замороженного белкового продовольствия. ПГВ были проведены проходческим комбайном избирательного действия типа ГПК.

В объемно-планировочном решении ЦВМ (рис. 1) состоит из 2 штолен, сбитых одной сбойкой, и 25 камер, в которых размещены ледовые скульптуры. Длина штольни № 1 составляет 102 м, штольни № 2 – 124 м, длина сбойки 21 м, сечение выработок неодинаковое и в среднем составляет – штолен 9,3 м², камер 10 м². Крепление ПГВ, за исключением устьевых частей штолен, не производилось. В зимний период ПГВ принудительно вентилируются холодным воздухом, нагнетаемым вентилятором, и их поверхности покрываются слоем ледяной глазировки толщиной 50 мм путем набрызга тонкораспыленной воды, обеспе-

чивая тем самым хладозарядку вмещающего горного массива (ГМ), требуемый уровень влажности и защиту от выветривания.

ГМ, вмещающий ПГВ комплекса, сложен мерзлыми многократно переслаивающимися мелкими и пылеватými песками мощностью от 2 до 10–15 м, а также такого же типа супесями, средними и тяжелыми суглинками с мощностью отдельных пропластков от 0,1 до 1–2 м.

Естественная температура пород составляет $-2,5...-3$ °С; суммарная влажность 15,1...20 %; объемный вес 1,83...2,12 г/см³, коэффициент пористости 0,45...0,87.

Механические свойства мерзлых пород: предел прочности на одноосное сжатие $-8,0...25,0$ кг/см²; предел прочности на растяжение $-1,5...4,5$ кг/см²; эквивалентное сцепление $-3,5...12,5$ кг/см².

По категории крепости (СНиП IV.5.82) породы относятся к группе мерзлых грунтов «В».

Теплофизические свойства мерзлых пород: объемная теплоемкость $-460...482$ ккал/м³ град; коэффициент теплопроводности $-1,26...2,69$ ккал/м ч град; коэффициент температуропроводности $-27,2...53,2 \cdot 10^{-4}$ м²/ч.

При оттаивании мерзлые дисперсные породы практически теряют прочностные свойства и характеризуются следующими скоростями теплового разрушения (по ИИГХИ-ПХВП-85): глина сильнопесчаная $-0,015...0,026$ м/ч; песчаные разности $-0,0018...0,0063$ м/ч.

На всех дверях тамбуров штолен установлены ширмы, сшитые из палаточной ткани, для ограничения поступления теплого воздуха в период посещения комплекса экскурсантами.

Глазировка ПГВ не производилась с 2014 г. В отсутствии крепи, в результате выветривания пород, в кровле некоторых ПГВ ЦВМ в 2014–2017 гг. произошло три вывала. Самый кру-

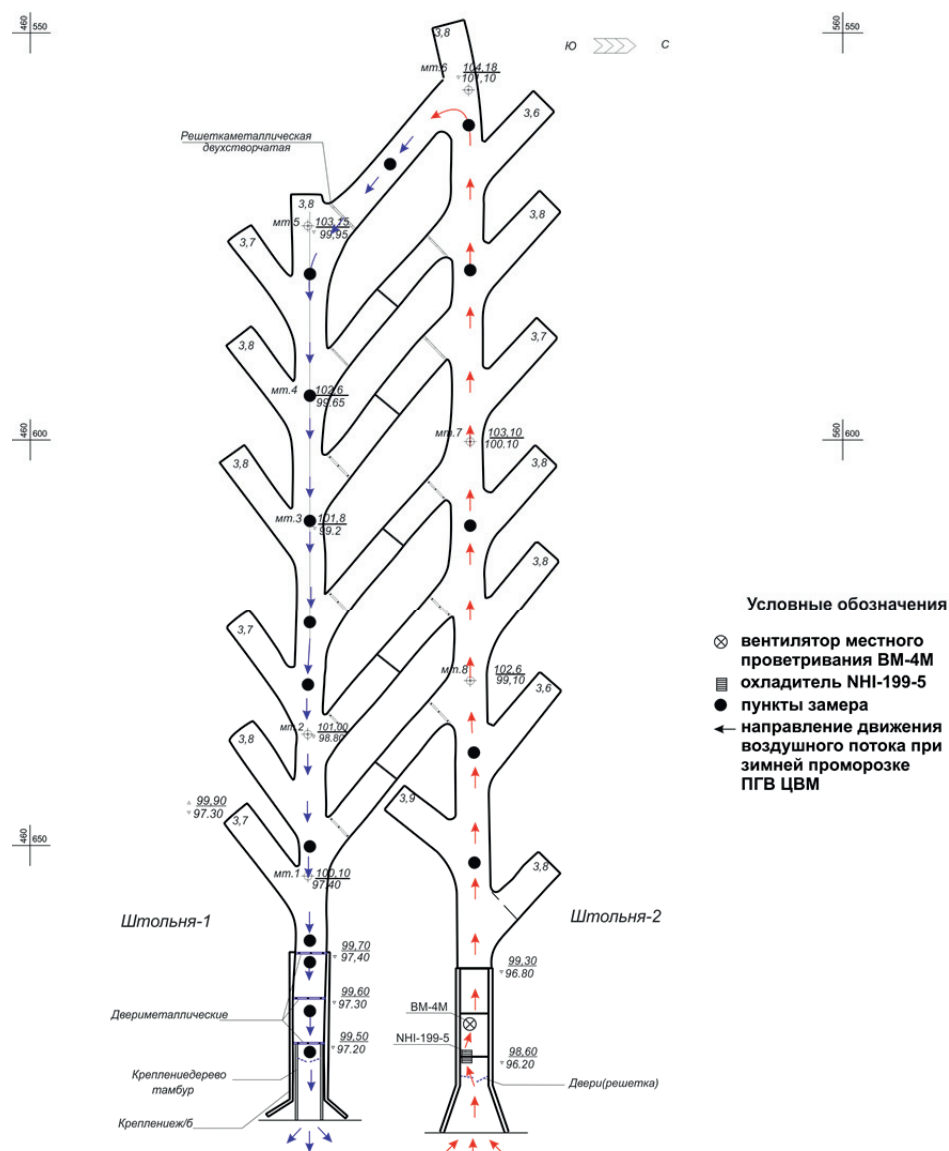


Рис. 1. Схема ПГВ ЦВМ. Приведены пункты замера температурных параметров

Fig. 1. Scheme of underground digging of «The Kingdom of the Eternal Frost». Points for measuring temperature parameters



Рис. 2. Вывал пород кровли в районе сопряжения штольни 1 и камеры 4 ЦВМ

Fig. 2. Rocks of the roof were excavated near the tunnel 1 and chamber 4 of «The Kingdom of the Eternal Frost»

пный из них (весом около 200 кг) произошел на сопряжении штольни № 1 с камерой № 4. В настоящее время в зоне вывала наблюдаются протяженные трещины (рис. 2).

Как известно, устойчивость ПГВ криолитозоны, пройденных в мерзлых дисперсных породах, во многом определяется их температурным режимом и интенсивностью массообменных процессов [1, 2].

Температурный режим ПГВ ЦВМ в течение года формируется в результате совместного действия многих факторов: сезонного изменения температуры и влажности атмосферного воздуха; солнечной радиации на поверхность склона и устьевые части штолен; скорости, дебета, температуры и влажности воздушного потока в период зимней хладозарядки; интенсивности воздухообмена в период открывания входных дверей тамбуров; теплопритоков от экскурсантов, осветительных приборов, отопляемого входного помещения; искусственного холода, вырабатываемого холодильными машинами в летний период.

Методика исследования температурного режима ЦВМ

Исследования температурного режима проводились в декабре 2017 г. и январе 2018 г. по методике [3, 4]. Замеры температуры воздушной среды осуществлялись прибором CENTER-314, контактного слоя пород – приборами Testo 845 и LeicaDistoD8. Пункты замеров располагались начиная от тамбуров и далее по длине обоих штолен (рис. 1).

Измерения производились при закрытых дверях тамбуров, включенных осветительных приборах, неработающей холодильной установке, отсутствии вентиляции и присутствии незначительного количества экскурсантов. Хладозарядка ПГВ не

осуществлялась. Температура наружного воздуха составляла -42°C .

Результаты проведенных наблюдений приведены на рис. 3. Обобщая их, можно сделать заключение, что, как и следовало ожидать, наиболее низкие температуры воздушной среды зафиксированы в тамбурах, а затем этот параметр постепенно повышается по длине ПГВ, достигая максимального значения в сбойке между штольнями.

Наиболее низкая температура контактного слоя пород зафиксирована в устье штольни-2 ($-8,7^{\circ}\text{C}$), она отличалась от температуры воздуха на 2°C . Затем этот показатель повышался по длине штольни и также незначительно отличался от температуры воздуха.

Замеры влажностных параметров воздушной среды не производились, но проведенные наблюдения позволяют сделать предположение, что в ПГВ происходят как конденсационные, так и испарительные процессы, причем последние явно преобладают. В результате этого происходит сублимация ледяной глазировки, ледовых скульптур и, не исключено, шлирового льда, а также активное иссушение (выветривание) приконтурного массива пород и его самопроизвольная дезинтеграция при отсутствии цементирующего льда (рис. 4).

Анализ результатов проведенных кратковременных наблюдений в определенной степени позволяет сделать следующие предварительные выводы.

Установившийся температурный режим в ПГВ ЦВМ можно считать оптимальным в плане обеспечения их устойчивости и комфортных условий экскурсантов. В то же время для предотвращения пластичных деформаций ледовых скульптур желательное обеспечение пониженных температур воздушной среды в пределах $-11...-12^{\circ}\text{C}$.

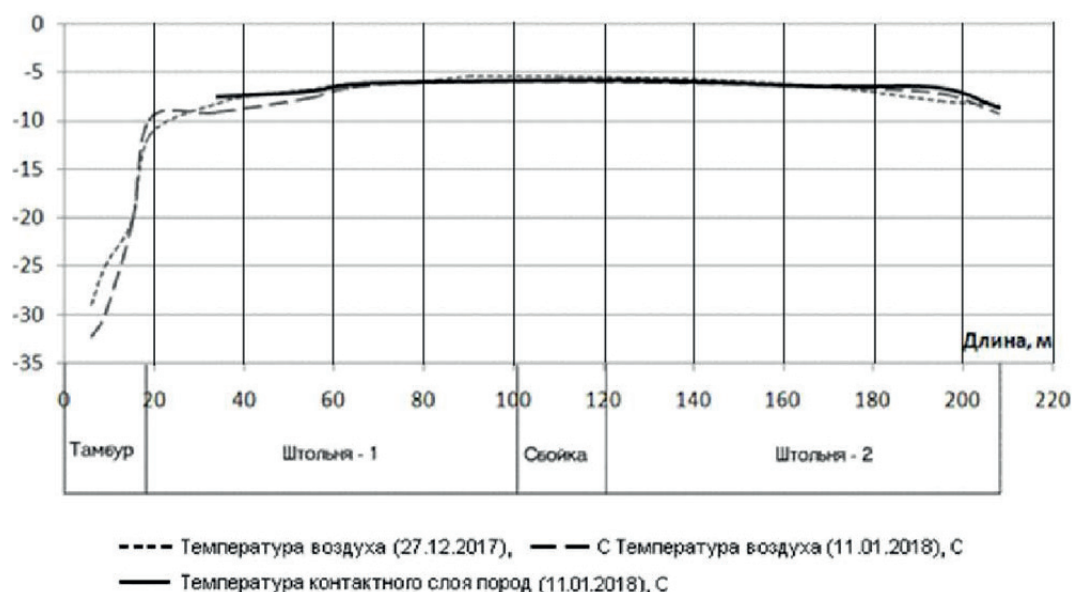


Рис. 3. Динамика значений температур воздуха и контактного слоя пород в выработках ЦВМ

Fig. 3. Dynamics of temperature values of air and contact layer of rocks in the workings of «The Kingdom of the Eternal Frost»

Проведенное обследование ПГВ с наличием изморози и толстого контактного слоя выветрелых пород не позволило выявить отслоения самыми простыми методами – звуковым и вибрационным [5, 6], так что не исключено, что кроме ранее обнаруженных обрушений кровли и видимых трещин с небольшим раскрытием, отдельные отслоения неразличимы и могут быть и в других местах, в настоящее время недоступных для обзора. Проведенными исследованиями с использованием георадара их не удалось обнаружить, так же, как и наличие ледяных шпиров.

Продолжительный период безремонтной эксплуатации ЦВМ, произошедшие обрушения кровли ПГВ при отсутствии крепи позволяют сделать предположение о возможном начавшемся нарушении стабильного состояния вмещающего ГМ, а также междукламерных целиков в геомеханиче-

ском плане, как это произошло, например, в подземном холодильнике АО «Якутэнерго» [7, 8].

По результатам проведенных исследований сделан вывод о необходимости стабилизации технического состояния подземного комплекса и проведения поэтапных масштабных ремонтных работ. В этих целях разработаны рекомендации по креплению и регулированию теплового режима ПГВ ЦВМ.

В первую очередь должны быть выполнены работы по снятию наиболее выветрелого приконтактного слоя пород с поверхностей ПГВ, закреплены сопряжения, имеющие повышенные пролеты и наиболее подверженные горному давлению. Также подлежат креплению выявленные зоны, склонные к вывалообразованию [9].

Расчеты крепления ПГВ были выполнены по известным методикам [10–14]. На их основе разработаны паспорта крепления.



Рис. 4. Выветрелый борт горной выработки ЦВМ с установленным температурным датчиком

Fig. 4. Weathered board of the mining of «The Kingdom of the Eternal Frost» with an established temperature sensor

Места крупных вывалов на сопряжении штольни № 1 и камеры № 2, камеры № 4, а также на сопряжении штольни № 2 и камеры № 12 рекомендуется крепить жесткой металлической рамной крепью. Материал крепи – двутавр № 10 и № 18 или спецпрофиль СВП-17. Соединить элементы крепи в стык методом электродуговой сварки. Затяжка кровли и бортов выработки должна производиться обрезной доской толщиной 50 мм. Забутовку закрепного пространства производить круглым лесом диаметром 15–20 см. Все остальные ПГВ ЦВМ должны быть закреплены анкерной крепью с затяжной сеткой Рабица.

Из существующих видов анкерных крепей для горнотехнических условий объекта рекомендуется выбрать беззамковые конструкции с активным радиальным распором закрепляемой части. Например, запрессовываемые в скважину фрикционные трубчатые анкера типа Split-Set и Swellex, закрепляемые расширяющимися составами. Их преимуществами являются: высокая скорость установки; надежность крепления и универсальность применения; нагружение анкера до рабочей нагрузки возможно сразу после его установки и равнопрочно с грузонесущим стержнем [15–23]. Наиболее подходящими для рассматриваемых условий являются фрикционные анкера системы «сплит-сет» (Split-Set).

При диаметре шпура 42 мм рекомендуется анкер Split-Set с диаметром трубки 47 мм. Согласно выполненным расчетам, анкера предлагается устанавливать по сетке 0,5×0,5 м.

Кровля выработок на закрепленных участках затягивается сеткой Рабица, прокладываемой под опорные плиты анкеров. Наиболее предпочтительна сетка Рабица в полимерном покрытии с ячейей

40×40 мм. Диаметр проволоки вместе с покрытием – 2,8–3 мм.

Все работы должны выполняться поэтапно в зимний период в соответствии с прилагаемыми инструкциями.

Обеспечение устойчивого круглогодичного отрицательного ТР ЦВМ в требуемых параметрах, так же как и подземных холодильников криолитозоны, должно осуществляться комбинированным способом с использованием как естественного, так и искусственного холода и базироваться на максимальном использовании как атмосферного, так и накопленного горными породами холода [9].

Выполнение мероприятий по регулированию температурного режима заключается в проведении ежегодной зимней хладозарядки принудительно нагнетаемым холодным атмосферным воздухом, а также в выработке искусственного холода холодильными установками в летний период для компенсации всех видов теплопритоков.

Для предотвращения деформаций ледовых скульптур в следствие текучести льда при температурах выше -10°C в ЦВМ в течение года желательно поддерживать температуру не выше $-11...-12^{\circ}\text{C}$.

Особое внимание должно быть уделено вопросам регулирования влажностного режима, т. к., как уже говорилось, он является определяющим в плане предотвращения выветривания шлирового льда и контактного слоя пород ПГВ с потерей их устойчивости. Результаты проведенных натурных наблюдений свидетельствуют, что толщина глазировки (50 мм), ежегодно наносимой на поверхности ПГВ, явно недостаточна. Согласно с номограммой, представленной на рис. 5, этот параметр дол-

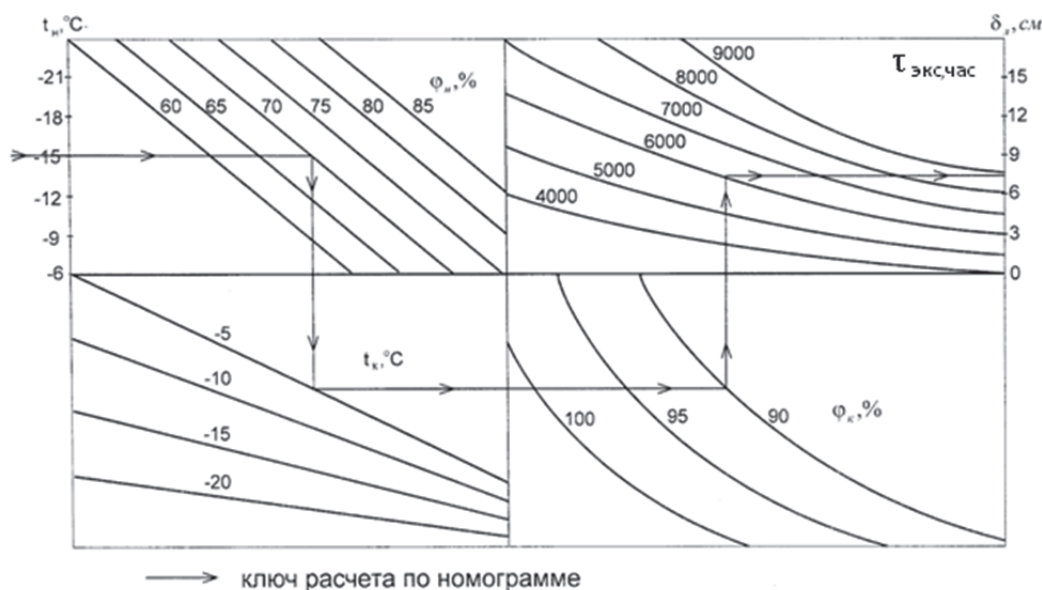


Рис. 5. Номограмма определения толщины ледяной глазировки в зависимости от начальных и конечных значений относительной влажности (φ_n и φ_k) и температуры воздуха (t_n , t_k)

Fig. 5. Nomogram of determination of ice glazing thickness depending on initial and final values of relative humidity (φ_n and φ_k) and air temperatures (t_n , t_k)

жен быть не менее 80 мм. Глазирровкой должны быть покрыты все, включая закрепленные, поверхности ПГВ, с её ежегодным возобновлением в зимний период.

Расчет температурного режима ЦВМ и требуемой мощности холодильных машин выполнен с применением разработанного в лаборатории горной теплофизики ИГДС СО РАН программного комплекса MuseumCVM [7]. Принцип работы программного комплекса основан на использовании разработанной трехмерной математической модели теплообменных процессов в штольне, позволяющей осуществить долгосрочный прогноз в зависимости от различных конструктивных и технологических параметров: геометрических размеров и глубины заложения штольни, угла откоса горного склона, теплофизических свойств вмещающих пород, режима эксплуатации (поточность туристов, количество электроламп), режима хладозарядки (время года, температура подаваемого воздуха, интенсивность вентиляции), режима использования холодильного оборудования.

Задача по расчету температурного режима штольни ЦВМ заключается в определении на каждом временном шаге: распределения температуры воздуха внутри штольни; распределения температуры в массиве горных пород вокруг штольни; тепловой нагрузки на холодильное оборудование; энергетических затрат на вентиляцию и на выработку искусственного холода, общих эксплуатационных энергозатрат.

При разработке математической модели тепловых процессов, происходящих внутри штольни и в ГМ, окружающем ее, приняты следующие упрощающие допущения:

1) воздух внутри выработки хорошо перемешивается; его температура усредняется во время вентиляции по поперечному сечению, а при отключенной вентиляции по всему объему;

2) теплопритоки в штольню поступают только от окружающего ГМ, электроламп и экскурсантов.

Программный комплекс разработан в среде программирования Visual Studio 2010 и работает в диалоговом режиме в качестве приложения к операционным системам Microsoft Windows.

Расчеты проведены для климатических условий г. Якутска. Исходные данные взяты из отчета результатов исследований, проведенных Центральной поисково-съемочной экспедицией ПГО «Якутскгеология» в 1989 г.

Расчеты были проведены при различных нижеперечисленных вариантах регулирования температурного режима ПГВ:

- естественный режим, при котором отсутствует регулирование температурного режима (без хладозарядки и использования холодильных установок);
- осенняя хладозарядка без использования искусственного холода;
- весенняя хладозарядка без использования искусственного холода;

- осенне-весенняя хладозарядка без использования искусственного холода;
- осенне-весенняя хладозарядка с использованием искусственного холода.

Поточность экскурсантов принимается в следующем количестве:

- летом 50 чел/сутки;
- зимой 20 чел/сутки;
- каждый экскурсант находится в ЦВМ в течение 1 часа.

В штольне установлены 25 электроламп мощностью по 40 Вт, которые включены в течение 8 часов в сутки. Хладозарядка атмосферным воздухом в весенний и осенний периоды проводится с интенсивностью $15 \text{ м}^3/\text{с}$ в течение 12 часов в сутки. Для сохранности ледовых фигур необходимо поддерживать температуру воздуха в штольне не выше $-8...-11^\circ\text{C}$.

Расчеты показали, что при всех вариантах регулирования ТР происходит снижение средней температуры воздуха в ЦВМ. При этом хладозарядка, проведенная только весной (с конца марта в течение 20 суток), недостаточна и не обеспечивает поддержания требуемой температуры хранения ледовых фигур как летом, так и зимой. А при осенней хладозарядке (с конца октября в течение 20 суток) только в зимние месяцы удастся поддерживать температуру ниже -8°C . Таким образом, для сокращения энергозатрат на выработку искусственного холода в летний период необходимо проведение ежегодных хладозарядок и осенью, и весной. В период экстремально низких температур хладозарядка нежелательна, во избежание морозобоины растрескивания приконтурного слоя пород ПГВ.

На рис. 6 представлена динамика изменения средней температуры воздуха в штольне при осенне-весенней хладозарядке и выработке искусственного холода на третьем году эксплуатации ЦВМ. Из приведенных графиков видно, что если поддержание температуры -8°C обеспечивается работой холодильных установок только в летнее время, то для поддержания температуры -11°C необходима их эксплуатация как летом, так и зимой.

Мощность холодильных установок ($N_{\text{хол}}$), необходимая для поддержания требуемой температуры воздуха в ПГВ ЦВМ, рассчитана по величине поступающих теплопритоков. В летний период в этих целях рекомендована холодильная установка, оснащенная компрессором BITZER Ecoline 4HE-18Y-40P, при выборе данного компрессора были учтены соотношения цены и качества. Техническая характеристика компрессора представлена в таблице.

Полугерметичный поршневой холодильный компрессор BITZER Ecoline 4HE-18Y-40P используется в холодильных установках, системах холодоснабжения, системах кондиционирования воздуха. Компрессоры серии Ecoline оптимизированы для работы с хладагентом R134a, также могут использоваться R404A, R407C, R507A, R22.

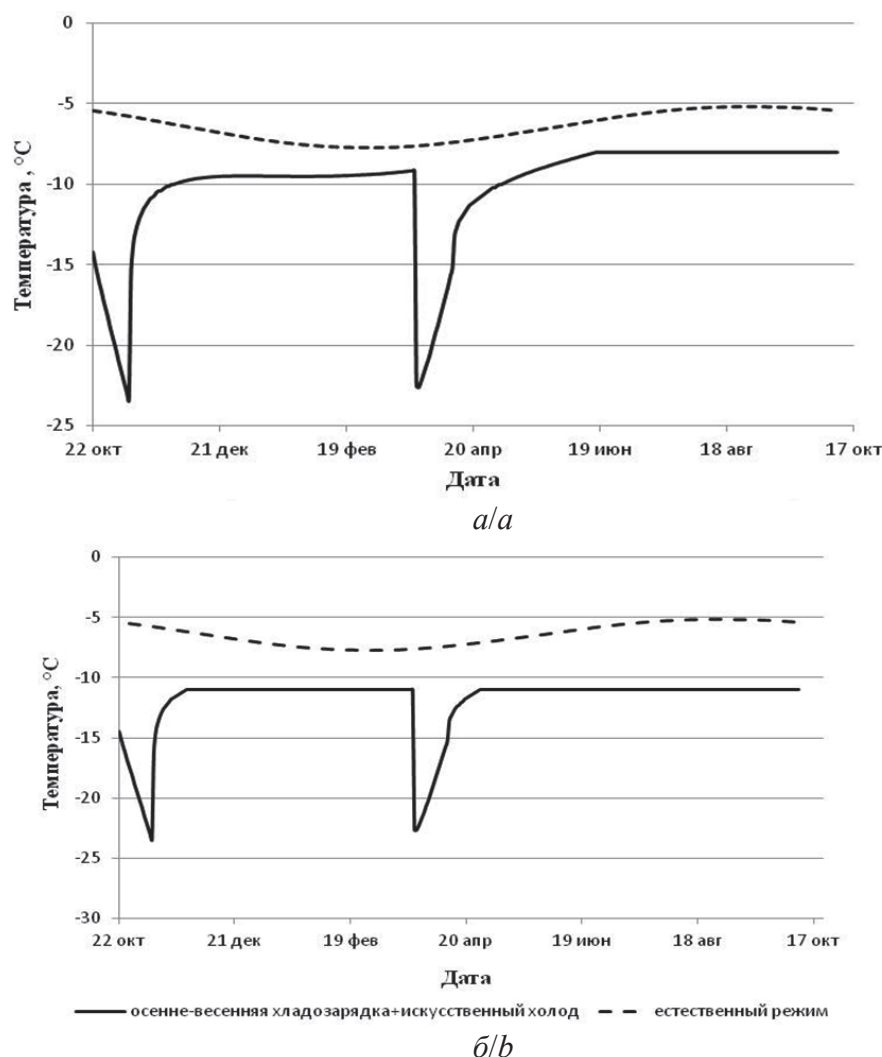


Рис. 6. Значения средних температур воздуха в штольне при осенне-весенней хладозарядке и выработке искусственного холода: а) -8°C ; б) -11°C (третий год эксплуатации ЦВМ)

Fig. 6. Mean air temperatures in the tunnel during autumn-spring cooling and artificial cooling: а) -8°C ; б) -11°C (3rd years of operation of The «Kingdom of the Eternal Frost»)

Таблица. Техническая характеристика компрессора BITZER Ecoline 4HE-18Y-40P

Table. Technical characteristic of the BITZER Ecoline 4HE-18Y-40P compressor

Вес нетто, кг/Net weight, kg	183
Холодопроизводительность (EN12900), кВт Cooling capacity (EN12900), kW	38,8
Диапазон холодопроизводительности (EN 12900), кВт Range of refrigerating capacity (EN 12900), kW	35–40
Максимальный ток двигателя Maximum motor current MCC, A	36,7
Электропотребление/Power consumption	$\Delta/\text{Y}220..240$ $\Delta/380..420$ $\text{Y}/3/50$
Количество цилиндров/Number of cylinders	4
Диапазон температур кипения/Boiling range	$0/-40^{\circ}\text{C}$
Нагнетательный патрубок/Discharge pipe	1 5/8"
Всасывающий патрубок/Suction pipe	2 1/8"
Уровень шума/Noise level, dBA	78
Аналог из старой версии/Analogue from the old version	4HC-18.2Y
Холодильный коэффициент/Refrigeration coefficient	2,3

Дальнейшая эксплуатация ЦВМ и регулирование температурного режима должны производиться в соответствии с инструкциями, разработанными ИГДС для подземных холодильников [5, 6].

Заключение

Для обеспечения долговременной безопасной эксплуатации ЦВМ необходим периодический геомеханический контроль за состоянием ГМ, вмещающего ПГВ, и смещениями их кровли по методике ВНИМИ [24, 25]. Инструментальные наблюдения позволят фиксировать смещения блоков, образование заколов и отслоений, интенсивность образования и роста трещин, что несомненно будет способствовать предотвращению аварийных ситуаций. Кроме этого, для оперативного контроля состояния приконтурного ГМ ПГВ, закрепленных анкерной крепью, может быть рекомендована установка серийно изготавливаемых глубинных реперов (РГ-1, РГ-2, РГ-3), снабженных цветовой

ми индикаторами, которые хорошо зарекомендовали себя на шахтах и рудниках. Положение цветных полос и скорости смещения индикаторов должно периодически контролироваться для выявления тенденций развития деформаций ГМ на ранней стадии.

В выявленных трещинах в ГМ для определения скорости их раскрытия могут быть установлены датчики, разработанные ИГДС. Для получения более полной информации о происходящих геомеханических процессах в породах кровли может быть также рекомендована установка акустических датчиков [7]. Контроль степени раскрытия трещин и роста интенсивности акустических импульсов,

проводимый совместно с измерениями смещений кровли, позволит в полной мере оценить геомеханическое состояние техногеннонарушенного ГМ, вмещающего ПГВ ЦВМ, разработать дополнительные превентивные мероприятия по предотвращению негативных процессов. Для сокращения энергозатрат на выработку искусственного холода в летний период рекомендовано проводить ежегодные осеннюю и весеннюю хладозарядки принудительной вентиляцией.

Таким образом, при тщательном и своевременном выполнении всех рекомендуемых мероприятий может быть обеспечена длительная безремонтная и безопасная эксплуатация ЦВМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Saied M. Aminossadati, Nayeemuddin M. Mohammed, Javad Shemshad. Distributed temperature measurements using optical fibre technology in an underground mine environment // Tunneling and Underground Space Technology. – 2010. – V. 25. – P. 220–229.
2. Melnikov P.I., Pavlov A.V. Study of permafrost in the U.S.S.R.: Scientific and practical problems // Cold Regions Science and Technology. 1982. V.6. – P. 163–171.
3. Дядькин Ю.Д. Основы горной теплофизики для шахт и рудников Севера. – М.: Недра, 1968. – 255 с.
4. Дядькин Ю.Д., Шувалов Ю.В. Тепловые съемки и тепловой расчет шахт и рудников. – Л.: Изд-во ЛГИ, 1997. – 88 с.
5. Инструкция по безопасным методам работы на подземных холодильниках объединения «Якутыбпром». – Якутск: Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1987. – 32 с.
6. Рекомендации по строительству, реконструкции и эксплуатации подземных холодильников в Якутской АССР. – Якутск: Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1982. – 49 с.
7. Курилко А.С. и др. Регулирование теплового режима подземных сооружений складского и специального назначения в условиях Севера. – Якутск: Изд-во Ин-та Мерзлотоведения СО РАН, 2011. – 246 с.
8. Курилко А.С., Хохолов Ю.А. Влияние режимов эксплуатации горных выработок на температурно-влажностное состояние вентиляционного воздуха и массива горных пород в условиях криолитозоны // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – S21. – С. 476–485.
9. Хохолов Ю.А., Курилко А.С., Киселев В.В., Романова Е.К. К вопросу повышения эффективности строительства и эксплуатации подземных сооружений криолитозоны различного назначения // Евразийское научное объединение. – 2018. – № 1 (35). – С. 65–67.
10. Территориальные строительные нормы 31–323–2002 Республики Саха (Якутия). Подземные объекты в горных выработках криолитозоны Якутии. – Якутск, 2002. – 24 с.
11. Шехурдин В.К. Задачник по горным работам, проведению и креплению выработок. – М.: Недра, 1985. – 240 с.
12. Строительные нормы и правила П-94–80. Подземные горные выработки. – М.: ФГУП ЦПП, 2004. – 28 с.
13. Гелескул М.Н., Хорин В.Н., Киселев Е.С., Бушуев Н.П. Справочник по креплению горных выработок. – М.: Недра, 1972. – 368 с.
14. Гребенюк В.А., Пыжьянова Я.С., Ерофеева И.Е. Справочник по горнорудному делу. – М.: Недра, 1983. – 816 с.
15. Kömürlü E., Kesimal A., Çolak Ü. Polyurea type thin sprayon liner coating to prevent rock bolt corrosion // Proceedings of the ISRM International Symposium – 8th Asian Rock Mechanics Symposium. – Sapporo, 2014. – P. 1389–1397.
16. Тимофеев П.В. Крепление горных выработок технологией Swellex // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 9. – С. 193–195.
17. Charlie C.L. Analysis of Inflatable Rock Bolts // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2016. – V. 49. – P. 273–289.
18. Dingxiang Zou. Ground Reinforcement and Support // Theory and Technology of Rock Excavation for Civil Engineering. – Singapore: Metallurgical Industrie Press, 2016. – P. 579–637.
19. Darling P. SME Mining Engineering Handbook. 3rd ed. – Englewood: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2011. – 1840 p.
20. Luo J., Haycocks C., Karmis M. Overview of U.S. rock bolting // Coal International. – 2001. – V. 249. – Iss. 1. – P. 30–33.
21. Wijk G. Mining improvement with Swellex // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. – 1985. – V. 22. – P. A22–A26.
22. Yan Xing, P.H.S.W. Kulatilake, L.A. Sandback. Effect of rock mass and discontinuity mechanical properties and delayed rock supporting on tunnel stability in an underground mine // Engineering geology. – 2018. – V. 238. – P. 62–75.
23. Hedensjö H. Swellex rock bolting system // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. – 1987. – V. 24. – P. A25–A27.
24. Методические указания по исследованию горного давления на угольных и сланцевых шахтах. – Л.: ВНИИМИ, 1970. – 302 с.
25. Строительные нормы и правила П-94–80. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. – М.: Минреинд России, 1997. – 187с.

Поступила 20.02.2019 г.

Информация об авторах

Петров А.Н., кандидат технических наук, заведующий кафедрой горного дела Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова.

Киселев В.В., кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории горной теплофизики Института горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской Академии наук.

Романова Е.К., кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории горной теплофизики Института горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской Академии наук.

Сивцева А.И., аспирант, старший преподаватель кафедры горного дела Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова.

UDC 622. 274

ON THE ISSUE OF SAFE OPERATION OF THE UNDERGROUND TRAVEL COMPLEX «THE KINGDOM OF ETERNAL FROST»

Andrey N. Petrov¹,
petrow_andrei@mail.ru

Valery V. Kiselev²,
helconst@mail.ru

Elena K. Romanova²,
helconst@mail.ru

Alena I. Sivtseva¹,
alyona_archibald@mail.ru

¹ M.K Ammosov North-Eastern Federal University,
58, Belinsky street, Yakutsk, 677000.

² N.V. Chersky Institute of Mining of the North Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
43, Lenin street, Yakutsk, 677000.

Relevance. Investigations of the thermal regime and development of effective ways of controlling it in underground structures of various purposes have received considerable attention in recent years. This is related not only to intensification of underground space development, but also to the variety of thermal conditions and the degree of influence of the temperature factor on the efficiency and safety of construction and operation of underground structures. As it is known from the mining practice in the North, the thawed rock mass, especially above the roof of the excavations, creates significant loads on the supports, sometimes exceeding permissible, which causes irreversible deformations, and sometimes leads to its collapse.

Objects: galleries of the tourist complex «The Kingdom of Eternal Frost» located on the 5th km of the Vilyuisk tract of Yakutsk.

The aim of the research is to develop the measures to ensure the required technical condition of the thermal regime complex and recommendations for securing underground mining workings providing safe conditions for tourists to stay.

Methods: studies of the temperature regime, visual inspection of the mining slope and underground mine workings of the tourist complex, selection of the type of fastening for the required conditions, calculation of the fastening parameters.

The paper introduces the results of the studies of the thermal regime of underground mine workings during winter operation period, the results of a visual survey of the mining slope and underground mine workings. The authors give recommendations to ensure the stability and anchoring of the zones for formation of underground mining excavations of the tourist complex «The Kingdom of Eternal Frost». The calculation of the temperature mode of the digital computer and the required power of the refrigerating machines was carried out using the MuseumCVM software package developed at the Laboratory of Mining Thermophysics of the Institute of Mining of the North named after N.V. Chersky. To reduce energy consumption for producing artificial cold in summer, it is recommended to hold annual refrigerated charge in autumn and spring.

Key words:

Cryolithozone, underground mining, permafrost, temperature regime, mountain massif, refrigeration, glazing, field observations, fastening of mine workings, anchor support, frame support, mating of mine workings.

REFERENCES

1. Saied M.Aminossadati, Nayeemuddin M.Mohammed, Javad Shemshad. Distributed temperature measurements using optical fibre technology in an underground mine environment. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2010, vol. 25, pp. 220–229.
2. Melnikov P.I., Pavlov A.V. Study of permafrost in the U.S.S.R.: Scientific and practical problems. *Cold Regions Science and Technology*, 1982, vol. 6, pp. 163–171.
3. Dyadkin Yu.D. *Osnovy gornoy teplofiziki dlya shakht i rudnikov Severa* [Basics of mining thermal physics for mines and mines of the North]. Moscow, Nedra Publ., 1968. 255 p.
4. Dyadkin Yu.D. *Teplovyie semki i teplovoy raschet shakht i rudnikov* [Thermal surveys and thermal calculation of mines and mines]. Leningrad, LGI Publ., 1997. 88 p.
5. *Instruktsiya po bezopasnym metodam raboty na podzemnykh kholodilnikakh obedineniya «Yakutrybprom»* [Instructions for safe working methods on underground refrigerators of the Yakutrybprom association]. Yakutsk, YAF SO AN SSSR Publ., 1987. 32 p.
6. *Rekomendatsii po stroitelstvu, rekonstruktsii i ekspluatatsii podzemnykh kholodilnikov v Yakutskoy ASSR* [Recommendations for construction, reconstruction and operation of underground refrigerators in the Yakut ASSR]. Yakutsk, YAF SO AN SSSR Publ., 1982. 49 p.
7. Kurilko A.S. *Regulirovanie teplovogo rezhima podzemnykh sooruzheniy skladskogo i spetsialnogo naznacheniya v usloviyakh Severa* [Regulation of thermal regime of underground storage facilities for special purposes in the North]. Yakutsk, Institute of Permafrost SO RAN Publ., 2011. 246 p.
8. Kurilko A.S., Khokholov Yu.A. Vliyaniye rezhimov ekspluatatsii gornykh vyrabotok na temperaturno-vlazhnostnoe sostoyaniye ventilyatsionnogo vozdukha i massiva gornykh porod v usloviyakh kriolitozony [Influence of excavation on the temperature and moisture condition of the ventilation air and massive of mountain rocks in cryolitezone]. *Mining informational and analytical bulletin*, 2016, no. S21, pp. 476–485.
9. Khokholov Yu.A., Kurilko A.S., Kiselev V.V., Romanova E.K. K voprosu povysheniya effektivnosti stroitelstva i ekspluatatsii

- podzemnykh sooruzheniy kriolitozony razlichnogo naznacheniya [On the issue of improving the efficiency of construction and operation of underground structures of permafrost for various purposes]. *Eurasian scientific association*, 2018, no. 1 (35), pp. 65–67.
10. *Territorialnye stroitelnye normy 31–323–2002 Respubliki Sakha (Yakutiya). Podzemnye obekty v gornyykh vyrabotkakh kriolitozony Yakutii* [Territorial building codes 31–323–2002 of the Republic of Sakha (Yakutia). Underground objects in cryolithozone mining]. Yakutsk, 2002. 24 p.
 11. Shekhurdin V.K. *Zadachnik po gornym rabotam, provedeniyu i krepleshiyu vyrabotok* [Tasks on mining, conducting and fixing workings]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 240 p.
 12. *Stroitelnye normy i pravila II-94–80. Podzemnye gornye vyrabotki* [Building Norms and Rules II-94–80. Underground mining]. Moscow, FGUP CPP Publ., 2004. 28 p.
 13. Geleskul M.N., Khorin V.N., Kiselev E.S., Bushuev N.P. *Spravochnik po krepleshiyu gornyykh vyrabotok* [Mining Mounting Guide]. Moscow, Nedra Publ., 1972. 368 p.
 14. Grebenyuk V.A., Pyzhanova Ya.S., Erofeeva I.E. *Spravochnik po gornorudnomu delu* [Mining handbook]. Moscow, Nedra Publ., 1983. 816 p.
 15. Kämürlü E., Kesimal A., Çolak Ü. Polyurea type thin sprayon liner coating to prevent rock bolt corrosion. *Proceedings of the ISRM International Symposium – 8th Asian Rock Mechanics Symposium*. Sapporo, 2014. pp. 1389–1397.
 16. Timofeev P.V. Krepleshiye gornyykh vyrabotok tekhnologiy Swellex [Fastening mining developments by the Swellex technology]. *Mining informational and analytical bulletin*, 2012, no. 9, pp. 193–195.
 17. Charlie C.L. Analysis of Inflatable Rock Bolts. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, vol. 49, pp. 273–289.
 18. Dingxiang Zou. Ground Reinforcement and Support. *Theory and Technology of Rock Excavation for Civil Engineering*. Singapore, Metallurgical Industrie Press, 2016. pp. 579–637.
 19. Darling P. *SME Mining Engineering Handbook*. 3rd ed. Englewood, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2011. 1840 p.
 20. Luo J., Haycocks C., Karmis M. Overview of U.S. rock bolting. *Coal International*, 2001, vol. 249, Iss. 1, pp. 30–33.
 21. Wijk G. Mining improvement with Swellex. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1985, vol. 22, pp. A22–A26.
 22. Yan Xing, Kulatilake P.H.S.W., Sandback L.A. Effect of rock mass and discontinuity mechanical properties and delayed rock supporting on tunnel stability in an underground mine. *Engineering geology*, 2018, vol. 238, pp. 62–75.
 23. Hedensjo H. Swellex rock bolting system. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1987, vol. 24, pp. A25–A27.
 24. *Metodicheskie ukazaniya po issledovaniyu gornogo davleniya na ugolnykh i slantsevykh shakhtakh* [Guidelines for the study of rock pressure in coal and shale mines]. Leningrad. VNIIMI Publ., 1970. 302 p.
 25. *Stroitelnye normy i pravila 11–02–96. Inzhenernye izyskaniya dlya stroitelstva. Osnovnye polozheniya* [Building codes 11–02–96. Engineering surveys for construction. Key Points]. Moscow, Minregion Rossii Publ., 1997. 187 p.

Received: 20 February 2019.

Information about the authors

Andrey N. Petrov, Cand. Sc., head of the Department of Mining, M.K Ammosov North-Eastern Federal University.

Valery V. Kiselev, Cand. Sc., senior researcher, Laboratory of Mountain Thermophysics, Institute of Mining of the North named after N.V. Chersky Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Elena K. Romanova, Cand. Sc, researcher of the Laboratory of Mining Thermophysics, Institute of Mining of the North named after N.V. Chersky Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Alena I. Sivtseva, graduate student, senior teacher, M.K Ammosov North-Eastern Federal University.

УДК 556.382(477.75)

НОВЫЙ ВЗГЛЯД НА ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ГОРОДА ФЕДЕРАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ СЕВАСТОПОЛЬ

Новиков Дмитрий Анатольевич^{1,2},

NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Черных Анатолий Витальевич¹,

ChernykhAV@ipgg.sbras.ru

Дульцев Федор Федорович¹,

DultsevFF@ipgg.sbras.ru

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

² Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1.

Актуальность исследования состоит в обобщении всех имеющихся гидрогеологических материалов (опубликованных и фондовых) по территории города федерального значения Севастополь и составлении в соответствии с существующими методическими рекомендациями схемы гидрогеологической стратификации и гидрогеологической карты нового поколения впервые за последние 50 лет. Изучаемая территория имеет богатую историю с античного времени и как следствие круглогодично является излюбленным местом в туристических маршрутах по Крымскому полуострову. Увеличивающийся поток туристов и удовлетворение текущих и перспективных потребностей Севастопольской городской агломерации в качественной питьевой воде является одной из первоочередных задач обеспечения социальной стабильности, охраны здоровья и увеличения продолжительности жизни населения (436 тыс. человек на 01.01.2018). В настоящее время на территории города для целей централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения используются 9 водозаборов (Орловский, Любимовский, Родниковский и другие). Большинство из них эксплуатируют водоносный комплекс миоценовых отложений. Если проанализировать ситуацию с подземным водоснабжением города Севастополя в целом, можно констатировать что утвержденные эксплуатационные запасы на действующих водозаборах используются в лучшем случае на 30–40 %, за исключением Инкерманского, где этот показатель достигает 90–93 %. Но вопрос с подземным водоснабжением и развитием действующих водозаборов не является простым. Ошибки при эксплуатации Орловского водозабора в 1980-е гг. уже привели к катастрофическим последствиям по изменению химического состава подземных вод эксплуатируемого водоносного горизонта. В этой связи вопрос о подземном водоснабжении необходимо начинать с создания современной гидрогеологической модели, что в первую очередь подразумевает актуализацию схемы гидрогеологической стратификации и гидрогеологической карты города Севастополя.

Цель работы: на основе детального анализа архивных, опубликованных и полевых исследований выявить особенности гидрогеологического строения города федерального значения Севастополь и составить в соответствии с существующими методическими рекомендациями схему гидрогеологической стратификации и гидрогеологическую карту нового поколения.

Методы. Используются методические приемы И.К. Зайцева, Б.Н. Архангельского, Е.Л. Баскова, М.С. Альтовского, А.С. Рябченко-ва, Н.В. Роговской, М.Р. Никитина, Б.Е. Антыпко и других, а также последние методические рекомендации МПР России и ВСЕГЕИ по составлению гидрогеологических карт и схем гидрогеологической стратификации, фондовые и опубликованные данные.

Результаты. Проведено обобщение гидрогеологических данных по территории города федерального значения Севастополь (включая результаты полевых работ авторского коллектива 2017–2018 гг.), актуализирована гидрогеологическая карта и составлена схема стратификации нового поколения. Приводятся сведения об основных водоносных комплексах и горизонтах в районе, а также краткая характеристика химического состава подземных вод. На исследуемой территории выделены два водоносных этажа (мезозойский и кайнозойский), объединяющие в себе 7 водоносных комплексов: 1) комплекс плиоценовых и четвертичных отложений – $8(N_2-aQ)$; 2) миоценовый – $8(N_1)$; 3) палеоценово-эоценовый – $8(P_1-P_2)$; 4) верхнемеловой – $8(K_2)$; 5) нижнемеловой – $8(K_1)$; 6) верхнеюрский – $8(J_3)$; 7) верхнетриасово-среднеюрский – $8(T_3-J_2)$. Установлено, что в пределах нижнего (мезозойского) водоносного этажа распространены трещинно-поровые, трещинно-карстовые, пластово-трещинные и напорные пластово-трещинные воды с величиной общей минерализации преимущественно до $1,5 \text{ г/дм}^3$, тогда как в верхнем (кайнозойском) водоносном этаже их минерализация варьирует от $0,4–0,5$ до $10,3 \text{ г/дм}^3$ (до 35 г/дм^3 в прибрежных районах). По химическому составу (по классификации С.А. Щукарева) воды весьма разнообразны и представлены 37 химическими типами от пресных гидрокарбонатных кальциевых до соленых хлоридных натриевых. Доминируют подземные воды гидрокарбонатного, гидрокарбонатно-хлоридного и хлоридного кальциевого и кальциево-натриевого типов с величиной общей минерализации, варьирующей в интервале от $0,16$ до $2,63 \text{ г/дм}^3$.

Ключевые слова:

Подземные воды, гидрогеологическая карта, гидрогеологическая стратификация, город федерального значения Севастополь, Крым.

Введение

В последние годы все больше исследований в мире проводится по оценке ресурсной базы, проблемам качества и загрязнения питьевых подзем-

ных вод в условиях изменяющегося климата. По самым оптимистичным прогнозам, среднегодовая температура на Земле вырастет к началу следующего столетия как минимум на два градуса

Цельсия вне зависимости от действий человека, что заставит климат планеты необратимым образом меняться. Волны жары, засухи и другие экстремальные погодные явления, а также рост уровня моря будут гораздо более опасными при повышении температур на два градуса и выше [1]. О.В. Парубец рассмотрены тенденции изменения температуры воздуха и количества атмосферных осадков на протяжении 80-летнего интервала времени в Крыму. Установлено, что температура воздуха и количество атмосферных осадков растут [2].

Работы учёных разных стран посвящены вопросам: оценки экологического состояния подземных вод в пределах территорий с разной степенью антропогенной нагрузки; водоснабжения городских агломераций; прогноза водопотребления в будущем и другим. Особенно широко они обсуждаются в странах Африки, Азии и Латинской Америки, где вопросы водоснабжения населения стоят наиболее остро. Так, следует отметить последние работы по мониторингу качества подземных вод городов Алжира, Камеруна, Бангладеш, Индии, Нигера, Израиля, Словении, США и других стран. Различным аспектам проблемы хозяйственно-питьевого водоснабжения населения городов, в том числе загрязнения, посвящены многочисленные работы по различным регионам мира [3–32].

Территория города федерального значения Севастополь имеет богатую историю с античного времени и как следствие круглогодично является излюбленным местом в туристических маршрутах по Крымскому полуострову. Увеличивающийся поток туристов и удовлетворение текущих и перспективных потребностей Севастопольской городской агломерации в качественной питьевой воде является одной из первостепенных задач обеспечения социальной стабильности, охраны здоровья и увеличения продолжительности жизни населения (436 тыс. человек на 01.01.2018). Научного обобщения гидрогеологических материалов по изучаемой территории не проводилось около 50 лет. С 1970-х гг. в запущены в эксплуатацию несколько водозаборов (Орловский, Родниковский и другие), накоплен большой объем фактического материала по результатам геологоразведочных работ на подземные воды. Авторским коллективом с 2017 г. проводятся экспедиционные работы. В настоящей статье представлены результаты исследований по гидрогеологии города Севастополя, выполненные в соответствии с последними методическими рекомендациями МПР России и ВСЕГЕИ по составлению гидрогеологических карт и схем гидрогеологической стратификации [33–36].

Гидрогеологическая стратификация и районирование лежит в основе любых гидрогеологических исследований. Разработке теоретических основ гидрогеологической стратификации посвящены многочисленные работы Н.И. Толстихина, А.М. Овчинникова, Г.Н. Каменского, М.К. Кучина, Ф.П. Саваренского, М.С. Гуревича, К. Кейльгака, Н.К. Игнатовича, П.Ф. Швецова, И.К. Зайце-

ва, Н.А. Маринова, А.С. Рябченкова, Е.В. Пиннера, А.А. Карцева, В.Н. Корценштейна, Б.Ф. Маврицкого, А.А. Розина, П.П. Климентова, У. Рихтера, В.А. Кирюхина, О.В. Равдоникас, Н.В. Роговской, А. Турнера, К.П. Караванова, Л.А. Островского, С.Л. Шварцева, В.Б. Торговановой, Н.М. Кругликова, С.Г. Бейрома, Ю.К. Смоленцева, В.В. Нелюбина, Б.П. Ставицкого, В.М. Матусевича, П.А. Удодова, А.Д. Назарова, Ю.П. Гаттенбергера, Н.Ф. Чистяковой и многих других.

Объект, материалы и методы исследований

В соответствии с принятым гидрогеологическим районированием Крыма, составленным Е.А. Ришес [37, 38], и картой подземных вод: L-(36), (37), составленной во ВСЕГЕИ в 1983 г. под редакцией И.Н. Павловца [39], территория г. Севастополя расположена в пределах двух гидрогеологических структур: Альминского артезианского бассейна Равнинно-Крымского артезианского бассейна и гидрогеологической складчатой области мегаантиклинория Горного Крыма. В границах Равнинно-Крымского артезианского бассейна выделено Альминское месторождение подземных вод, в пределах гидрогеологической складчатой области мегаантиклинория Горного Крыма – Западно-Крымское месторождение подземных вод. В этой связи необходимо было обобщить большой комплекс геологических, гидрогеологических и гидрогеохимических данных (опубликованных и фондовых), в первую очередь результаты картирования разного времени, выполненного специалистами ведущих научных и производственных организаций СССР, Украины и России [40–50], а также результаты полевых работ 2017–2018 гг. В гидрогеологической стратификации при расчленении разрезов выделяются следующие основные гидрогеологические подразделения: водоносные и водоупорные горизонты, водоносные комплексы, ярусы и этажи [34]. Наиболее мелкой таксономической единицей является водоносный горизонт. Водоносный горизонт – относительно выдержанная по площади и в разрезе насыщенная гравитационной водой одно- или разновозрастная толща горных пород, представляющая собой в гидродинамическом отношении единое целое [51]. При выделении водоносных горизонтов необходимо учитывать, что их мощность не должна превышать мощность стратиграфических ярусов, реже отделов.

Составление гидрогеологической карты и схемы гидрогеологической стратификации нового поколения велось в несколько этапов: 1) обобщение имеющихся гидрогеологических материалов по гидродинамическим, гидрогеохимическим и геотермическим особенностям водоносных горизонтов; 2) обобщение результатов полевых работ на территории Севастопольской городской агломерации, проведенных в 2017–2018 гг. (маршрутные наблюдения, результаты гидрогеохимического опробования скважин и родников); 3) составление схемы гидрогеологической стратификации разре-

за и 4) актуализация гидрогеологической карты. Основными критериями выделения водоносных, водоупорных и относительно водоупорных толщ в разрезе являются литологический и минералогический составы пород и их физические свойства. В качестве непосредственных показателей установления изолирующих свойств водоупорных толщ следует опираться на показатели гранулометрического состава, пористости, проницаемости. Информационный банк данных включает записи по более чем 300 скважинам на подземные воды и 37 родникам.

Результаты и их обсуждение

В гидрогеологической стратификации юго-западной части Крымского полуострова, включая территорию города Севастополь, приведенной в Гидрогеологии СССР под ред. А.В. Сидоренко [37], было выделено 8 подразделений (сверху вниз): водоносный комплекс средне-верхнеплиоценовых отложений, водоносный комплекс сарматских, мэотических и понтических отложений, водоносный горизонт среднемиоценовых отложений, водоносный комплекс палеоценовых и эоценовых отложений, водоносный комплекс верхнемеловых отложений, водоносный комплекс нижнемеловых отложений, водоносная зона трещиноватости верхнеюрских отложений и водоупорные отложения таврической серии и средней юры. Согласно стратификации 2006 г., выполненной специалистами Министерства экологии и природных ресурсов Украины [52], в гидрогеологическом разрезе было выделено 6 водоносных горизонтов и 4 комплекса (сверху вниз): водоносный комплекс плиоценовых континентальных и эоплейстоценовых аллювиальных отложений, водоносный горизонт средне-верхнесарматских отложений, водоносный горизонт среднемиоценовых отложений, водоносный горизонт эоценовых отложений, водоносный горизонт палеоценовых отложений, локальный водоносный комплекс трещиноватости верхнемеловых отложений, водоносный комплекс нижнемеловых отложений, водоносный горизонт верхнеюрских отложений, локальный водоносный горизонт зон трещиноватости пород средней юры и локальный водоносный горизонт экзогенной трещиноватости пород таврической серии. Имеющиеся различия сведены на рис. 1.

Согласно действующим нормативным документам, ни одна из представленных ранее схем не соответствует современным требованиям по составлению схем гидрогеологической стратификации, не соблюден таксономический ряд выделяемых подразделений [34]. В предлагаемой актуализированной схеме гидрогеологической стратификации региона выделены водоупорные горизонты на основе фациально-литологического состава пород и более подробно представлен верхний гидрогеологический этаж, а именно гидрогеологические подразделения плиоцен-миоценовых отложений. Все уточнения и детализирование гидрогеологическо-

го разреза проводилось на основе фациально-литологического состава горных пород, определяющего наличие в геологическом разрезе водоносных и водоупорных гидрогеологических тел и характер их взаимоотношения, а также характер гидравлической связи между смежными подразделениями, содержащими подземные воды.

На территории исследования в границах фанерозоя выделяются два водоносных этажа: верхний – кайнозойский, который является зоной активного водообмена, и нижний, мезозойский – затрудненного водообмена. Представленное описание основных гидрогеологических подразделений проведено в соответствии и имеющимся информационным банком данных и опубликованными и фондовыми материалами [37, 38, 53–65].

Анализ опубликованных данных и имеющегося фактического материала позволил выделить семь водоносных комплексов (сверху вниз): 1) комплекс плиоценовых и четвертичных отложений, 2) миоценовый, 3) палеоценово-эоценовый, 4) верхнемеловой, 5) нижнемеловой, 6) верхнеюрский и 7) верхнетриасово-среднеюрский.

Перечисленные комплексы были разделены на водоносные и водоупорные горизонты (рис. 2), описание областей их распространения приведено ниже в соответствии с составленной гидрогеологической картой (рис. 3) [66].

Водоносный комплекс плиоценовых и четвертичных отложений ($8(N_2-aQ)$) распространен на северо-западе и севере исследуемого региона, а также в долинах рек Черная, Бельбек и Кача. Изучен множеством скважин: № 5752, 1037, 1515, 1195, 1195а, 501, 601, 1895, 19–1, 19–3, 38м, 1789, 52н, 87м, 1067, 1053. Его мощность составляет 100–120 м. Комплекс включает в себя водоносный горизонт четвертичных отложений (aQ), водоносный горизонт средне-верхнеплиоценовых отложений ($2(N_2^{2-3})$) и нижнеплиоценовый водоупорный горизонт ($4(N_2^1)$). Водоносный горизонт четвертичных отложений представлен отложениями гравия, галечника, песка с прослоями суглинков и глин. На территории Севастополя воды этого горизонта эксплуатируют Бельбекский (расположен в 4 км от с. Верхнесадовое) и Инкерманский (расположен в Инкерманской долине, между п. Сахарная Головка и с. Штурмовое) водозаборы. Горизонт безнапорный, глубина залегания уровней подземных вод изменяется от 12 до 24 м. На незначительных участках горизонт переходит в напорный, когда он перекрыт сверху толщей суглинков или глин мощностью до 2,5–3,5 м. Удельные дебиты скважин варьируют в широком интервале от 0,1 до 36 л/с. Водопроницаемость составляет 34–4680 м²/сут, при доминировании значений от 500 до 1000 м²/сут. Область питания совпадает с областью его распространения. В долине реки Кача горизонт четвертичных отложений образует единый напорный водоносный горизонт с известняками сарматского возраста. Воды по химическому составу относятся к гидрокарбонатному кальциевому типу с величи-

Гидрогеологическая стратификация Гидрогеология СССР. Том VIII. Крым, 1970г.	Гидрогеологическая стратификация Министерство экологии и природных ресурсов Украины, 2006г.	Гидрогеологическая стратификация (авторская редакция)		
		Водоносный/водоупорный горизонт	Водоносный комплекс	Этаж
		Водоносный горизонт четвертичных отложений		
водоносный комплекс средне-верхнеплиоценовых отложений	водоносный комплекс плиоценовых континентальных и эолейстоценовых алювиальных отложений	водоносный горизонт средне-верхнеплиоценовых отложений	водоносный комплекс плиоценовых и четвертичных отложений	
		нижнеплиоценовый водоупорный горизонт		
водоносный комплекс сарматских, мэотических и понтических отложений	водоносный горизонт средне-верхнесарматских отложений	водоносный горизонт верхнесарматских, мэотических и понтических отложений		
		водоносный горизонт среднесарматских отложений	водоносный комплекс миоценовых отложений	
		водоупорный горизонт нижнесарматских отложений		
водоносный горизонт среднемиоценовых отложений	водоносный горизонт среднемиоценовых отложений	водоносный горизонт среднемиоценовых отложений		
водоносный комплекс палеоценовых и эоценовых отложений	водоносный горизонт эоценовых отложений	водоупорный горизонт верхнепалеоценовых отложений		
	водоносный горизонт палеоценовых отложений	водоносный горизонт нижнепалеоценовых отложений	водоносный комплекс палеоценовых и эоценовых отложений	
водоносный комплекс верхнемеловых отложений	локальный водоносный комплекс трещиноватости верхнемеловых отложений	водоупорный горизонт сантон-маастрихтских отложений		
		водоносный горизонт верхнетурон-коньякских отложений	водоносный комплекс верхнемеловых отложений	
		водоупорный горизонт нижнетуронских отложений		
		водоносный горизонт сеноманских отложений		
водоносный комплекс нижнемеловых отложений	водоносный комплекс нижнемеловых отложений	водоупорный горизонт альбских отложений	водоносный комплекс нижнемеловых отложений	
		водоносный горизонт берриас-аптских отложений		
водоносная зона трещиноватости верхнеюрских отложений	водоносный комплекс верхнеюрских отложений	водоносный горизонт средне-верхнетитонских отложений		
		нижнетитонский водоупорный горизонт	водоносный комплекс верхнеюрских отложений	
		водоносный горизонт средневерхнеоксфордско-кимериджских отложений		
водоупорные отложения таврической серии и средней юры	локальный водоносный горизонт зон трещиноватости пород средней юры	локальный водоносный горизонт зон трещиноватости пород средней юры		
	локальный водоносный горизонт зоны экзогенной трещиноватости пород таврической серии	локальный водоносный горизонт зоны экзогенной трещиноватости пород таврической серии	водоносный комплекс верхнетриасово-среднеюрских отложений	

Рис. 1. Сравнительная схема гидрогеологической стратификации города федерального значения Севастополь

Fig. 1. Comparative scheme of hydrogeological stratification scheme of the city of federal significance Sevastopol

ной общей минерализации 0,5–1,0 г/дм³. Водоносный горизонт средне-верхнеплиоценовых отложений представлен линзами песков и галечников в толще песчаных глин верхнетаврской (андреевской) подсыты. На исследуемой территории централизованно не эксплуатируется. Имеются от-

дельные скважины в частных домовладениях. Горизонт напорно-безднапорный. Безднапорный на участках, где он первый от поверхности земли, и напорный на территории развития глин, отделяющих его от горизонта четвертичных отложений. Глубина залегания уровней подземных вод изме-

няется от 7,1 до 60 м. Удельные дебиты скважин варьируют в интервале от 0,001 до 1,5 л/с. Значения водопроницаемости колеблются от 0,77 до 148 м²/сут. Минерализация подземных вод колеблется от 0,4 до 10,3 г/дм³, состав сульфатный, гидрокарбонатно-сульфатный кальциевый, вдоль морского побережья хлоридный и сульфатно-хлоридный натриевый. Нижнеплиоценовый водоупорный горизонт представлен глинами нижнетаврской (учкуйской) подсытки.

Водоносный комплекс миоценовых отложений (8(N₁)) мощностью до 400 м распространен на востоке и юго-востоке Севастопольской городской агломерации (рис. 3) и представлен водоносными горизонтами верхнесарматских, мэотических и понтических отложений (2(N_{1s3}-N_{1m}-N_{1p})), среднесарматских отложений (2(N_{1s2})), среднемиоценовых отложений (2(N₁³)), а также водоупорным горизонтом нижнесарматских отложений (4(N_{1s1})) (рис. 1). Комплекс вскрывают скважины № 1037, 1515, 1195, 1195а, 1501, 601, 1895, 5752, 19–1, 19–3. Водоносный горизонт верхнесарматских, мэотических и понтических отложений сложен кавернозными известняками, гравелитами, песчаниками и песками херсонской свиты. На исследуемой территории воды этого горизонта эксплуатирует Орловский водозабор (расположен в с. Орловка). Горизонт напорный, глубина залегания уровней подземных вод изменяется от 55 до 120 м. Мощность водоносного горизонта составляет 52–73 м. Величина напора варьирует от 19 до 37,8 м. Удельные дебиты скважин достигают 64,0–91,1 л/с, а водопроницаемость составляет 1000–6000 м²/сут. Как отмечалось выше, в долине реки Кача он имеет гидравлическую взаимосвязь с горизонтом аллювиальных четвертичных отложений. Минерализация горизонта не превышает 1 г/дм³, но по приближению к морю растет до 32 г/дм³. Воды гидрокарбонатно-сульфатные, гидрокарбонатные, гидрокарбонатно-хлоридные кальциево-натриевые, а в засоленных участках и на побережье хлоридные натриевые. Водоносный горизонт среднесарматских отложений сложен известняками с прослоями песков, песчаников, глин и конгломератов бесарабской свиты. Водоносный горизонт повсеместно напорный, напоры подземных вод изменяется от 46 до 235 м, возрастая с запада на восток. Удельные дебиты скважин изменяются от 0,14 до 23,2 л/с, а водопроницаемость составляет от 27 до 2960 м²/сут (преобладающие значения 50–250 м²/сут). Наиболее высокая водообильность отмечена на западе описываемого участка. Питание за счет инфильтрации атмосферных осадков горизонт получает в предгорных районах – в местах выхода среднесарматских отложений на дневную поверхность. Воды гидрокарбонатные, гидрокарбонатно-сульфатные, хлоридные кальциевые и кальциево-натриевые с минерализацией на большей части распространения горизонта от 1,0 до 1,5 г/дм³ и до хлоридных натриевых с минерализацией 10,0–46,8 г/дм³ в прибрежных районах

[67]. Водоупорный горизонт нижнесарматских отложений представлен глинами с редким прослоем мергелей и алевролитов краснопереконской свиты мощностью до 90 м. Водоносный горизонт среднемиоценовых отложений сложен переслаиванием песчаников, карбонатных песков, глин, известняков и гравелитов брикивского, спанидеолитового, сартаганского, веселеняского слоев и мекензиевской толщи. На территории Севастопольской городской агломерации воды этого горизонта эксплуатируют четыре водозабора: Водограй (Гагаринский район, Фиолентовское шоссе), Делегардовский (г. Севастополь, ул. Делегатская, д. 2), Любимовский (в р-не с. Любимовка) и Царьхлебский (г. Севастополь, ул. Токарева, д. 2В). Водоносный горизонт имеет преимущественно напорный режим. Он безнапорный в областях выхода его отложений на дневную поверхность в пределах Герасимовского полуострова, где работают водозаборы Водограй и Делегардовский, где уровни подземных вод изменяются от 40 до 72 м, и в предгорных районах. Величина напора увеличивается по мере погружения водовмещающих пород и достигает более 250 м. Глубина пьезометрических уровней варьирует от нескольких метров выше дневной поверхности до 108 м ниже. Водообильность пород изменяется как по площади, так и в разрезе. Водопроницаемость составляет 54,9–2291 м²/сут (преобладающие значения 100–200 м²/сут). Удельные дебиты скважин охватывают диапазон от 0,26 до 20,8 л/с. Движение подземных вод происходит от области питания в предгорных районах на запад, север и северо-восток. Источником питания служат атмосферные осадки и фильтрация из рек – на небольших участках в предгорных районах. Разгрузка подземных вод осуществляется в акватории Черного моря. Воды горизонта гидрокарбонатные кальциевые, хлоридно-гидрокарбонатные кальциевые и натриево-кальциевые, хлоридные натриевые с минерализацией преимущественно до 1 г/дм³. От предгорий в западном направлении происходит закономерный рост величины общей минерализации подземных вод от 0,3 до 4,7–10,0 г/дм³ в прибрежных районах и смена химического типа с гидрокарбонатного кальциевого на хлоридный натриевый.

Водоносный комплекс палеоценовых и эоценовых отложений (8(P₁-P₂)) развит в Севастопольской бухте и на северо-западе исследуемой территории. Изучен скважиной № 38м. Его мощность может достигать 400 м. Комплекс представлен водоупорным горизонтом верхнепалеоцен-эоценовых отложений (4(P₂²-P₂)) и водоносным горизонтом нижнепалеоценовых отложений (2(P₁¹)). Водоупорный горизонт верхнепалеоцен-эоценовых отложений сложен мергелями и глинами качинской, новопавловской, кумской и альминской свит. Водоносный горизонт нижнепалеоценовых отложений приурочен к трещиноватым закарстованным известнякам и песчаникам белокаменной свиты. Водоносный горизонт напорно-безнапорный, уровни подземных вод в

скважинах изменяются от 3,3 до 83 м. Мощность нижнепалеоценовых известняков может достигать 70 м. Степень обводненности горизонта крайне неравномерная, наибольшая (удельные дебиты 0,5–2,0 л/с) – в районах, примыкающих к области питания в предгорных районах. Севернее, в районе города Бахчисарай, удельные дебиты ряда скважин достигают 35 л/с при понижении до 20 м. Питание осуществляется также за счет инфильтрации атмосферных осадков в предгорных районах. Минерализация вод составляет 0,4–0,5 г/дм³, состав гидрокарбонатный кальциевый.

Водоносный комплекс верхнемеловых отложений ($8(K_2)$) распространен в восточной части изучаемого района и включает в себя водоупорный горизонт сантон-маастрихтских отложений ($4(K_{st}-K_2m)$), водоносный горизонт верхнетурон-коньякских отложений ($2(K_2t_2-K_2k)$), водоупорный горизонт нижнетуронских отложений ($4(K_2t_1)$) и водоносный горизонт сеноманских отложений ($2(K_2s)$). Комплекс вскрыт скважиной № 38м. Мощность комплекса до 950 м. Водоупорный горизонт сантон-маастрихтских отложений представлен мергелями, песковатыми мергелями с алевритистыми конкрециями и карбонатными глинами кудринской, бешковской и старосельской свит. Водоносные горизонты сеноманских и верхнетурон-коньякских отложений представлены трещиноватыми известняками и мергелями с пропластками песчаников белогорской и прохладненской свит. Водоупорный горизонт нижнетуронских отложений сложен мергелями мендерской свиты. Водоносный комплекс приурочен к зонам экзогенной трещиноватости пород и к зонам тектонических нарушений. Водоносные горизонты комплекса имеют напорно-безнапорный режим фильтрации. Дебиты источников составляют 0,1–0,5 л/с, скважин – 0,1–0,6 л/с. Водопроницаемость известняков комплекса невысока и изменяется в интервале от 0,09 до 25,9 м²/сут. Питание водоносного комплекса осуществляется атмосферными осадками, а в случае его перекрытия – за счет межпластовых перетоков из вышележащих водоносных горизонтов. Доминируют воды гидрокарбонатного кальциевого состава с величиной общей минерализации 0,4–0,5 г/дм³. В погруженных частях Альминского бассейна в северо-западной части изучаемого региона минерализация подземных вод растет до 10–40 г/дм³, а химический тип изменяется на хлоридный натриевый.

Водоносный комплекс нижнемеловых отложений ($8(K_1)$) распространен в южной части территории исследования и включает в себя водоносный горизонт берриас-аптских отложений ($2(K_{1b}-K_{1a})$) и водоупорный горизонт альбских отложений ($4(K_{1al})$). Комплекс вскрывают скважины № 105н, 100н, 87м. Мощность комплекса может достигать 1400 м (рис. 4). Водоносный горизонт берриас-аптских отложений включает в себя породы свиты Бечку, кучкинской, новобобровской, ширококовской и балаклавской толщ. Водоносными порода-

ми этих свит являются трещиноватые и слаботрещиноватые песчаники и известняки, галечники с конгломератами бериас-готеривского возраста, готерив-баремские песчаники и конгломераты. Водоносный горизонт имеет безнапорный режим в областях выхода его отложений на дневную поверхность в пределах Байдарской долины и центральной части региона исследования и переходит в напорный режим при погружении. Водообильность пород изменяется как по площади, так и в разрезе. Удельные дебиты источников составляют 0,1–0,2 л/с. Мощность обводненных зон составляет до 75 м. Статические уровни подземных вод изменяются от 70 до 114 м. Питание осуществляется также за счет атмосферных осадков и межпластовых перетоков из ниже залегающих верхнеюрских карстующихся известняков. Естественная разгрузка подземных вод осуществляется в акватории Черного моря и посредством восходящих и нисходящих источников в материковой части. Воды гидрокарбонатные кальциево-натриевые, минерализация не превышает 1 г/дм³. Водоупорный горизонт альбских отложений включает в себя глины, аргиллиты и алевролиты чоргунской и канаринской толщ.

Водоносный комплекс верхнеюрских отложений ($8(J_3)$) присутствует на юге исследуемой территории и включает в себя водоносный горизонт средне-верхнетитонских отложений ($2(J_3tt_{2-3})$), нижнетитонский водоупорный горизонт ($4(J_3tt_1)$) и водоносный горизонт средневерхнеоксфордско-кимериджских отложений ($2(J_3o_{2-3}-J_3km)$) (рис. 3, 4). Изучен скважинами № 105н, 52н, 100н, 87м. Его мощность достигает 2000 м. Водоносный горизонт средне-верхнетитонских отложений представлен двумя свитами – калафатларской и байдарской. Калафатларская свита сложена полимиктовыми конгломератами с глыбами известняков яйлинской свиты. Цемент глинисто-карбонатный, тип цементации – базально-поровый. Байдарская свита представлена разными типами известняков: брекчеподобными, пелитоморфными, органогенными и коралловыми.

Нижнетитонский водоупорный горизонт состоит из отложений деймень-деринской свиты, которая, в свою очередь, разделяется на две подсвиты. Нижняя сложена флишеподобным переслаиванием серых алевролитовых глин и коричнево-серых обломочных известняков. Верхняя посвита представлена серыми алевритистыми глинами с конкрециями сидеритов и прослойками обломочных известняков. Водоносный горизонт средневерхнеоксфордско-кимериджских отложений включает в себя яйлинскую и сохуроченскую свиты. Яйлинская свита разделяется на две подсвиты. Нижняя представлена коричнево-серыми известняками с прослоями алевролитовых известняков, линзами песчаников и алевролитов. Верхняя подсвита состоит из коричнево-серых известняков, с пачками песчаных и глинистых известняков и мергелей. Сухореченская свита в целом предста-

Эратема	Система	Отдел	Ярус	Свита	Литография	Гидрогеологические подразделения								
						Водоносный горизонт		Водоносный комплекс		Водоносный этаж				
Kz	Q	Q				aQ	В/н г. четвертичных отложений	Водоносный комплекс плиоценовых и четвертичных отложений	8(N ₂ -aQ)	Верхний	1(KZ)			
				2(N ₂ ²⁻³)	В/н г. средне-верхнеплиоценовых отложений									
	N	N ₂	таврская		4(N ₂ ¹)	Нижнеплиоценовый в/п г.	Водоносный комплекс миоценовых отложений	8(N ₁)						
			херсонская		2(N ₂ ^s -N ₂ ^m -N ₂ ^p)	В/н г. верхнесарматских, мзотических и понтических отложений								
			бесарабская		2(N ₂ ^s ₂)	В/н г. среднесарматских отложений								
			краснопереловская		4(N ₂ ^s ₃)	В/п г. нижнесарматских отложений								
			брикивский, спаниодонтеловый, саргаганский и веселанский объединенные слои		2(N ₁ ^z)	В/н г. среднемиоценовых отложений								
			мехенивская толща											
			брикивский слой											
			P	P ₂	b	новонаваловская, кумская и альминская объединенные свиты						4(P ₂ ² -P ₂)	В/п г. верхнепалеоцен-зоценовых отложений	Водоносный комплекс палеоценовых и зоценовых отложений
качинская		2(P ₁ ¹)				В/н г. нижнепалеоценовых отложений								
K	K ₂		t	белокаменная		2(P ₁ ¹)	В/н г. нижнепалеоценовых отложений	Водоносный комплекс верхнемеловых отложений	8(K ₂)					
			m	старосельская		4(K ₂ st -K ₂ ^m)	В/п г. сантон-маастрихтских отложений							
			km	бешковская		2(K ₂ ^t -K ₂ ^k)	В/н г. верхнетурон-коньякских отложений							
			st	кудлинская										
			k	прокладненская		4(K ₂ ^t)	В/п г. нижнетуронских отложений							
			t	мендерская		2(K ₂ ^s)	В/н г. сеноманских отложений							
			s	белогорская		4(K ₁ ^{al})	В/п г. альбских отложений			Водоносный комплекс нижнемеловых отложений	8(K ₁)			
			al	канаринская толща										
				чорунгская толща										
			a	балаклавская толща										
			br	широковская толща										
			g	новобобровская толща										
			v	кучинская толща										
			b	свита Бечку										
Mz	J ₃		байдарская		2(J ₃ ^{tt} ₂)	В/н г. средне-верхнетитонских отложений	Водоносный комплекс верхнеюрских отложений	8(J ₃)						
			калафатларская		4(J ₃ ^{tt})	Нижнетитонский в/п г.								
			деймен-деринская											
			сухореченская		2(J ₃ ^o ₂₋₃ -J ₃ ^{km})	В/н г. средневерхнеоксфордско-кимериджских отложений								
			яйлинская											
			J ₂		bt	айвасильская				2(J ₂)	Локальный в/н г. зон трещиноватости пород средней юры	Водоносный комплекс верхнетриасово-среднеюрских отложений	8(T ₃ -J ₂)	
					b	карадазская								
						мелаская								
			T	T ₃		таврическая				2(T ₃ -J ₁)	Локальный в/н г. зоны экзогенной трещиноватости пород таврической серии			

Известняки Туфы Гравелиты Алевролиты Песчаники Глины Мергели Глинистые известняки Андезитовые лавы

Рис. 2. Схема гидрогеологической стратификации города федерального значения Севастополь. В/н г. – водоносный горизонт, в/п г. – водоупорный горизонт

Fig. 2. Hydrogeological stratification scheme of the city of federal significance Sevastopol. B/n g. – water bearing formation; в/п г. – unpermeable layer

влена конгломератами с линзами грубозернистых песчаников и органогенных известняков.

Водоносный комплекс трещинно-карстовых вод имеет напорный режим в областях перекрытия его нижнемеловыми отложениями в Байдарской долине (рис. 3, 4) и центральных частях Севастопольской городской агломерации. В Байдарской долине, где работает Родниковский водозабор, величина напора меняется от 38,2 до 776,5 м, на остальной территории – от 11 до 192 м. Безнапорный режим для комплекса характерен в областях выхода его отложений на дневную поверхность в пределах Ай-Петринской яйлы Главной гряды Крымских гор. Водообильность верхнеюрских известняков весьма неравномерна. Дебиты скважин, полученные при откачках, изменяются от 0,2 до 50 л/с при понижениях уровня от 1,75 до 113 м. Удельные дебиты изменяются от тысячных долей до 11,0 л/с. Величина водопроницаемости достигает значений 685,7–845,0 м²/сут.

Особое значение имеет родник Скельский (основной) со среднегодовым многолетним расходом 1840 л/с. Установлено, что родник Скельский и скважины Родниковского водозабора представляют собой единую гидравлическую систему. Родник является примером естественно разгрузки указанной системы и его выход приурочен к наиболее обводненной ее части. Как показали результаты экспедиционных и аналитических работ 2018 г., эти водопункты имеют практически одинаковый химический состав, а величина их общей минерализации не превышает 0,3 г/дм³. Источником питания комплекса служат атмосферные осадки, а разгрузка подземных вод осуществляется в виде многочисленных источников, по трещинам в подрусловых отложениях р. Черной и с помощью субмаринных источников в акватории Черного моря вблизи с мысом Айя и в Балаклавской бухте. Воды данного комплекса пластово-трещинные, пресные, гидрокарбонатные кальциевые, кальциево-магниевого (Родниковский участок Западно-Крымского месторождения с величиной общей минерализации до 0,3 г/дм³), реже гидрокарбонатно-хлоридные, хлоридно-сульфатные с минерализацией до 1 г/дм³ [68–72].

Водоносный комплекс верхнетриасово-среднеюрских отложений (8(T₃-J₂)) присутствует на юге Севастопольской агломерации и включает в себя два локальных водоносных горизонта: зон трещиноватости пород средней юры (2(J₂)) и зоны экзогенной трещиноватости пород таврической серии (2(T₃-J₁)). На территории исследования комплекс имеет выходы на поверхность вдоль южного побережья рядом с м. Сарич и м. Айя. Мощность комплекса может достигать 2200 м. Локальный водоносный горизонт зоны трещиноватости пород средней юры (2(J₂)) представлен породами айвасильской, карадазской и мелаской свит. Карадазская свита разделена на три подсвиты. Нижняя сложена андезибазальтовыми и андезитовыми ла-

вами с прослойками туфов, средняя подсвита представлена аргиллитами и алевролитами с конкрециями сидеритов, верхняя состоит из литокристаллических андезитовых туфов с прослойками туфитов и песчаников. Мелаская свита также разделяется на три подсвиты. Нижняя сложена серыми песчаниками, карбонатными алевролитами и тонкоплиточными аргиллитами. Средняя подсвита состоит из алевролитов с линзами и конкрециями сидеритов с переслаивающимися пачками алевролитов и песчаников. Верхнюю слагают переслаивающиеся песчанико-алевролитовые и аргиллитовые слои с пачками туфов. Айвасильская свита подразделяется на три подсвиты. Нижняя подсвита состоит из полимиктовых песчаников с линзами гравелитов и пачками флишеподобно переслаивающихся песчаников, алевролитов и глин с конкрециями сидеритов. Средняя представлена флишеподобным переслаиванием песчаников, глин с конкрециями сидеритов и глинистыми известняками. Верхняя подсвита – загипсованными глинами с окремненными пачками песчано-аргиллитового флиша с конкрециями сидеритов. Водоносный горизонт имеет ограниченное распространение и крайне слабо изучен ввиду повышенной минерализации до 3,0 г/дм³ подземных вод. Удельные дебиты скважин могут достигать 0,2 л/с. Воды этого горизонта напорные, трещинно-карстовые и пластово-трещинные. По составу хлоридно-гидрокарбонатные натриевые с минерализацией 2,6–3,0 г/дм³. В пределах локального водоносного горизонта зоны экзогенной трещиноватости пород таврической серии (2(T₃-J₁)) выделяются крымская и эскординская свиты. Основной литолого-петрографический состав пород крымской свиты – песчаники, алевролиты, аргиллиты и сидериты. Эскординская свита разделяется на две подсвиты. Нижняя подсвита по составу схожа с породами крымской свиты, но с включениями аргиллита с линзами серых и рыжих известняков. Верхняя подсвита сложена светло-серыми и желтыми кварцитоподобными и аркозовыми песчаниками, полимиктовыми конгломератами с жилками аргиллитов и алевролитов и линзами известняков. Водоносный горизонт также имеет ограниченное распространение и слабо изучен с гидрогеологической точки зрения. Воды этого горизонта трещинно-поровые, напорные с удельными дебитами скважин до 1,15 л/с. Севернее изучаемого региона в Бахчисарайском районе водоносный горизонт разгружается в виде известного источника радоновых вод «Аджи-Су» с среднегодовым удельным дебитом 0,15 л/с. Воды источника хлоридные натриево-кальциевые с минерализацией 4,06–5,52 г/дм³, в составе водорастворенных газов (ВРГ) присутствуют: азот, метан, сероводород, гелий, а также радон. Содержания «традиционных» микрокомпонентов составляют (мг/дм³): I – 0,4–1,8; B – 2,6–5,1; Br – 1,6–5,3; F – 0,3–0,7.

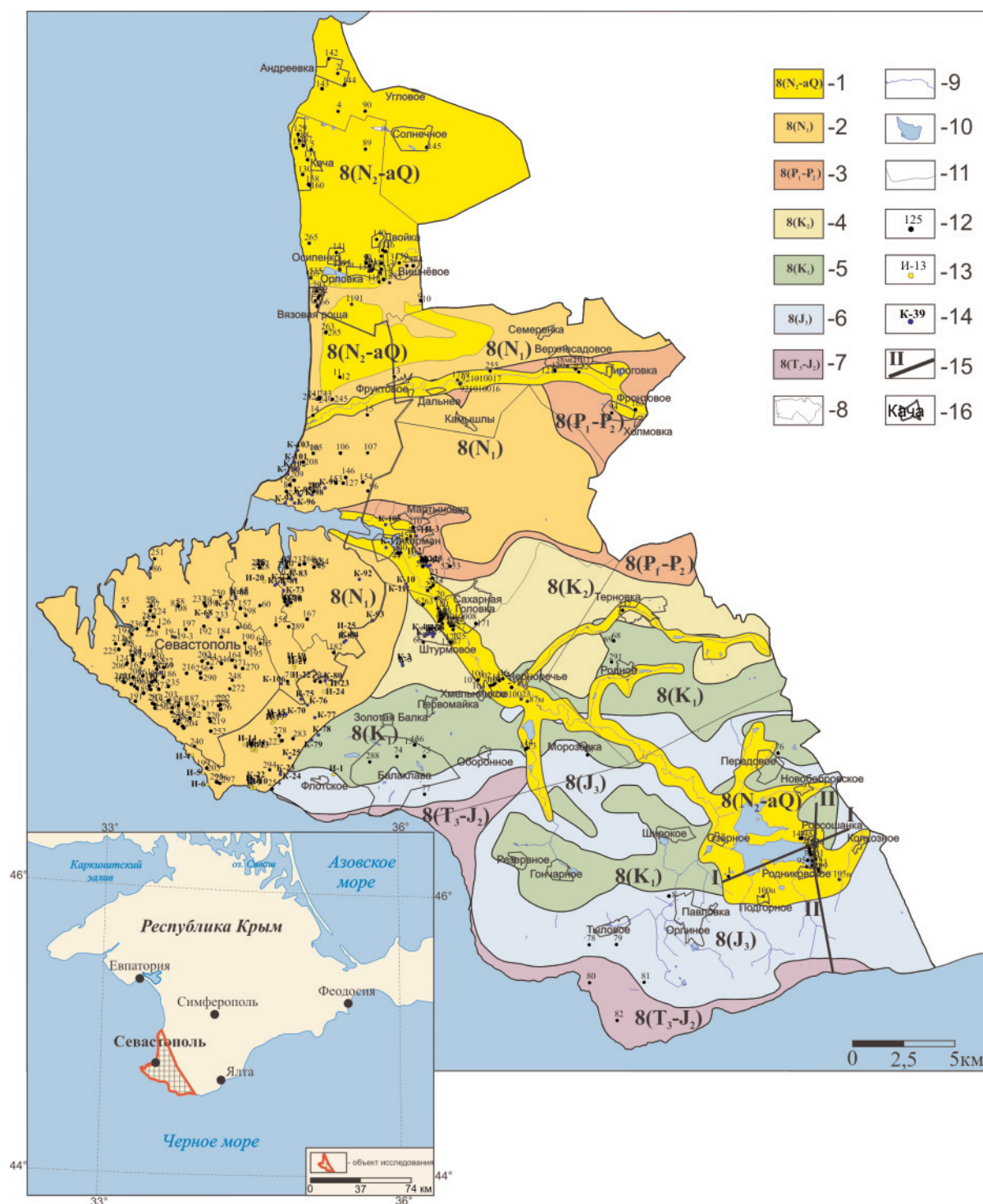


Рис. 3. Гидрогеологическая карта территории Севастопольской городской агломерации. Водоносный комплекс: 1 – плиоценовых и четвертичных отложений, 2 – миоценовых отложений, 3 – палеоцен-эоценовых отложений, 4 – верхнемеловых отложений, 5 – нижнемеловых отложений, 6 – верхнеюрских отложений, 7 – верхнетриасово-среднеюрских отложений; 8 – административные границы районов; 9 – речная сеть; 10 – озера, водохранилища; 11 – границы гидрогеологических комплексов; 12 – скважины; 13 – источники; 14 – колодцы; 15 – линии гидрогеологических разрезов; 16 – населенные пункты

Fig. 3. Hydrogeological map of Sevastopol city agglomeration territory. Aquiferous complex: 1 – Pliocene and Quaternary sediments, 2 – Miocene sediments, 3 – Paleocene-Eocene sediments, 4 – Upper Cretaceous sediments, 5 – Lower Cretaceous sediments, 6 – Upper Jurassic sediments, 7 – Upper Triassic-Middle Jurassic sediments; 8 – administrative boundaries of the districts; 9 – river network; 10 – lakes, reservoirs; 11 – boundaries of hydrogeological complexes; 12 – boreholes; 13 – sources; 14 – wells; 15 – lines of hydrogeological sections; 16 – localities

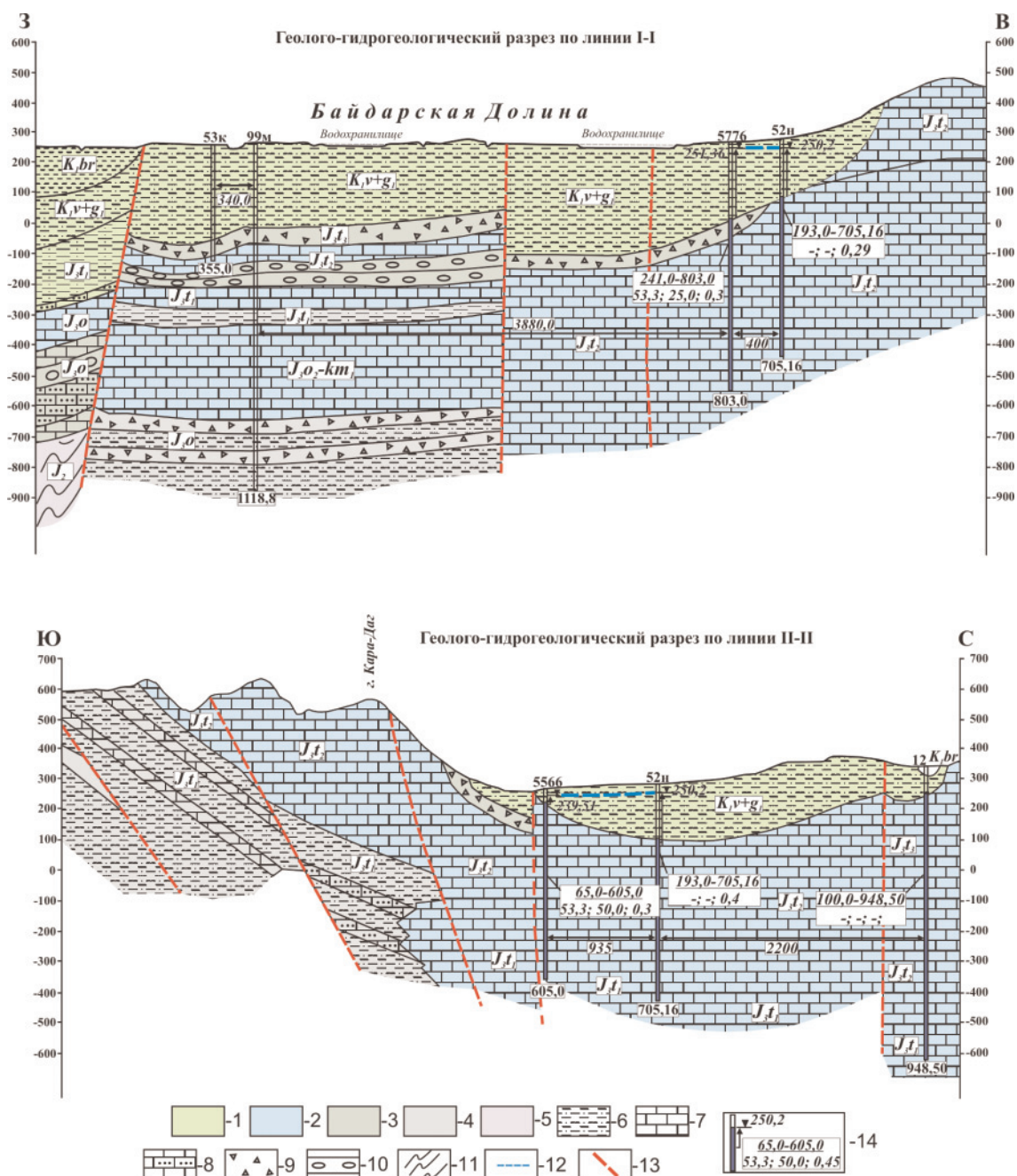


Рис. 4. Гидрогеологические разрезы по линиям I-I, II-II. 1 – водоупорные и слабопроницаемые (практически безводные) отложения нижнего мела; 2 – водоносный горизонт в карбонатной толще верхней юры. Массивные и грубослоистые известняки различной степени трещиноватости и закарстованности; 3 – водоносный горизонт в карбонатной толще верхней юры. Переслаивание слоистых и тонкослоистых известняков, песчаников, аргиллитов; глыбовые известняки, конгломераты, брекчи, трещиноватые, слабозакарстованные; 4 – водоупорные и слабопроницаемые (практически безводные) отложения верхней юры; 5 – водоупорные и слабопроницаемые (практически безводные) отложения средней юры; 6 – аргиллиты, алевролиты, глины; 7 – известняки; 8 – песчаники; 9 – брекчи; 10 – конгломераты; 11 – флиш; 12 – предполагаемое положение уровня подземных вод в верхнеюрских отложениях; 13 – предполагаемые разрывные нарушения; 14 – абсолютная отметка уровня воды, м; в квадрате – числитель: интервал опробования, знаменатель: дебит, л/с; понижение, м; минерализация, г/дм³

Fig. 4. Hydrogeological sections along the lines I-I, II-II. 1 – impermeable and weakly permeable (practically waterless) sediments of the Lower Cretaceous; 2 – aquifer in the carbonate layer of the Upper Jurassic. Massive and coarse-shaped limestones of varying degrees of fracturing and cartilage; 3 – aquifer in the carbonate layer of the Upper Jurassic. Overlapping of layered and thin-layer limestones, sandstones, argillites; slab limestones, conglomerates, breccia, fractured, weakly arched; 4 – impermeable and weakly permeable (practically waterless) deposits of the Upper Jurassic; 5 – impermeable and weakly permeable (practically waterless) deposits of the Middle Jurassic; 6 – argillites, siltstones, clay; 7 – limestone; 8 – sandstone; 9 – breccia; 10 – conglomerates; 11 – flush; 12 – the proposed position of the groundwater level in Upper Jurassic deposits; 13 – the proposed faults; 14 – absolute mark of water level, m; in the square – the numerator: interval of testing, denominator: debit, l/sec; lowering, m; mineralization, g/dm³

Заключение

Резюмируя вышесказанное, следует отметить, что в соответствии с действующими нормативными документами, ни одна из представленных ранее схем не соответствовала современным требованиям по составлению схем гидрогеологической стратификации и не соблюден таксономический ряд выделяемых подразделений [34]. В предлагаемой нами актуализированной схеме гидрогеологической стратификации региона выделены водоупорные горизонты на основе фациально-литологического состава пород и более подробно представлен верхний гидрогеологический этаж, а именно гидрогеологические подразделения плиоцен-миоценовых отложений. Все уточнения и детализирование гидрогеологического разреза проводилось на основе фациально-литологического состава горных пород, определяющего наличие в геологическом разрезе водоносных и водоупорных гидрогеологических тел и характер их взаимоотношения, а также характера гидравлической связи между смежными подразделениями, содержащими подземные воды. В соответствии с ней на территории Севастопольской городской агломерации выделяется два водоносного этажа: мезозойский и кайнозойский. В пределах нижнего (мезозойского) водоносного этажа развиты 4 водоносных комплекса: верхне-триасовых, верхнеюрских, нижнемеловых и верхнемеловых отложений. Подземные воды в их границах трещинно-поровые, трещинно-карстовые, пластово-трещинные и напорные пластово-трещинные с величиной общей минерализации преимущественно до 1,5 г/дм³ и разнообразным химическим составом от гидрокарбонатных кальциевых до хлоридных натриевых. Верхний (кайнозойский) водоносный этаж представлен водоносными комплексами палеоценово-эоценовых, миоценовых, плиоценовых и четвертичных отложений. Минерализация подземных вод этих комплексов колеблется в широком диапазоне и составляет от 0,4–0,5 до 10,3 г/дм³ (до 35 г/дм³ в прибрежных районах), по составу также пестрые от

пресных гидрокарбонатных кальциевых до солевых хлоридных натриевых.

В настоящее время на территории города для целей централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения используются 9 водозаборов (Орловский, Любимовский, Родниковский и другие). Большинство из них эксплуатируют водоносный комплекс миоценовых отложений. Если проанализировать ситуацию с подземным водоснабжением города Севастополя в целом, можно констатировать, что утвержденные эксплуатационные запасы на действующих водозаборах используются в лучшем случае на 30–40 %, за исключением Инкерманского, где этот показатель достигает 90–93 %. Но вопрос с подземным водоснабжением и развитием действующих водозаборов не является простым. Ошибки при эксплуатации Орловского водозабора в 1980-е гг. уже привели к катастрофическим последствиям по изменению химического состава подземных вод эксплуатируемого водоносного горизонта. Характер существующих гидрогеохимических аномалий указывает на подток морских вод за счет сформированной депрессионной воронки при интенсивном водоотборе. Сокращение отбора подземных вод на водозаборе с 1988 г. в среднем на 24 тыс. м³/сутки благоприятно сказывается на гидродинамическом режиме водоносного горизонта в сарматских отложениях. В настоящее время водоотбор на водозаборе достигает 7,76–8,91 тыс. м³/сут. После ограничения водоотбора фиксируется подъем уровня по всем наблюдательным скважинам [73]. Необходимо в дальнейшем проводить перераспределение нагрузок на отдельные скважины водозабора и дифференциацию водоотбора с целью улучшения гидродинамического и гидрохимического режима эксплуатируемого водоносного горизонта, но этот вопрос требует детальных исследований.

Исследование проводилось при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и города Севастополь в рамках научного проекта № 18-45-920032 p_a.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Less than 2 °C warming by 2100 unlikely / A.E. Raftery, A. Zimmer, D.M.V. Frierson, R. Startz, P. Liu // *Nature Climate Change*. – 2017. – V. 7 – P. 637–641.
2. Парубец О.В. Изменение климата в Крыму // *Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. Серия: География*. – 2009. – Т. 22 (61). – № 2. – С. 88–96.
3. Groundwater beneath the urban area of Khan Younis City, southern Gaza Strip (Palestine): assessment for multi-domestic purposes / M.S. Abu Jabal, I. Abustan, M.R. Rozaimy, H. El Najjar // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2017. – V. 10. – P. 257–272.
4. Aloni A., Brenner A. Use of Cotton as a Carbon Source for Denitrification in Biofilters for Groundwater Remediation // *Water*. – 2017. – V. 9. – P. 714–725.
5. Arora A.S. Urban stormwater – greywater management system for sustainable urban water management at sub-watershed level // *E3S Web of Conferences* 22. – 2017. – 7 p.
6. Asadi P., Ataie-Ashtiani B., Beheshti A. Vulnerability assessment of urban groundwater resources to nitrate: the case study of Mashhad, Iran // *Environmental Earth Sciences*. – 2017. – V. 76. – P. 41–56.
7. Mass balance of emerging contaminants in the water cycle of a highly urbanized and industrialized area of Italy / S. Castiglioni, E. Davoli, F. Riva, M. Palmiotto, P. Camporini, A. Manenti, E. Zuccato // *Water Research*. – 2018. – V. 131. – P. 287–298.
8. Arsenic in groundwater of the Kolkata Municipal Corporation (KMC), India: Critical review and modes of mitigation / D. Chakraborti, B. Das, M.M. Rahman, B. Nayak, A. Pal, M.K. Sengupta, S. Ahamed, Md.A. Hossain, U.K. Chowdhury, B. Kumar Biswas, K.C. Saha, R.N. Dutta // *Chemosphere*. – 2017. – V. 180. – P. 437–447.
9. Hydrochemical characteristics and the impact of anthropogenic activity on groundwater quality in suburban area of Urmia city, Iran / M. Chitsazan, N. Aghazadeh, Y. Mirzaee, Y. Golestan // *Environment, Development and Sustainability*. – 2017. – V. 21. – № 1. – P. 1–21.

10. Spatial analysis and health risk assessment of heavy metals concentration in drinking water resources / R.A. Fallahzadeh, M.T. Ghaneian, M. Miri, M.M. Dashti // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2017. – V. 24. – P. 24790–24802.
11. Source apportionment of pollution in groundwater source area using factor analysis and positive matrix factorization methods / X. Guo, R. Zuo, D. Shan, Y. Cao, J. Wang, Y. Teng, Q. Fu, B. Zheng // *Human and Ecological Risk Assessment: an International Journal*. – 2017. – V. 23. – № 6. – P. 1417–1436.
12. Jangam C., Pujari P. Impact of on-site sanitation systems on groundwater sources in a coastal aquifer in Chennai, India // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2017. – V. 26. – № 3. – P. 1–10.
13. Combined hydrogeological and nitrate modelling to manage water resources of the Middle Soummam Aquifer, Northeast of Algeria / F. Kessasra, M. Mesbah, Z. Khemissa, N. Bouab, S. Khaled-Khodja, H. Lamari // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2017. – V. 10. – P. 368–388.
14. Lasagna M., De Luca D.A. Evaluation of sources and fate of nitrates in the western Po plain groundwater (Italy) using nitrogen and boron isotopes // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2017. – V. 26. – № 3. – P. 1–16.
15. Lins-de-Barros F.M. Integrated coastal vulnerability assessment: A methodology for coastal cities management integrating socioeconomic, physical and environmental dimensions – Case study of Região dos Lagos, Rio de Janeiro, Brazil // *Ocean & Coastal Management*. – 2017. – V. 149. – P. 1–11.
16. Nitrate – nitrogen contamination in groundwater: Spatiotemporal variation and driving factors under cropland in Shandong Province, China / J. Liu, L.H. Jiang, C.J. Zhang, P. Li, T.K. Zhao // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. – 2017. – V. 82. – 012059.
17. Rapid decadal evolution in the groundwater arsenic content of Kolkata, India and its correlation with the practices of her dwellers / A. Malakar, S. Islam, Md.A. Ali, S. Ray // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2016. – V. 188. – P. 584–595.
18. Passive sampling as a tool for identifying micro-organic compounds in groundwater / N. Mali, S. Cerar, A. Koroša, P. Auersperger // *Science of the Total Environment*. – 2017. – V. 593–594. – P. 722–734.
19. Occurrence of chemical contaminants in peri – urban agricultural irrigation waters and assessment of their phytotoxicity and crop productivity / A. Margenat, V. Matamoros, S. Diez, N. Cañameras, J. Comas, J.M. Bayona // *Science of the Total Environment*. – 2017. – V. 599–600. – P. 1140–1148.
20. Impact of wastewater on groundwater resources in Sana'a basin, Yemen / K.A. Mergem, A. Jilali, A.A. Alnedhary, H.E. Halouani, K. Dssouli // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2016. – V. 9. – № 268. – P. 1–14.
21. Impact of urbanization coupled with drought situations on groundwater quality in shallow (basalt) and deeper (granite) aquifers with special reference to fluoride in Nanded – Waghala Municipal Corporation, Nanded District, Maharashtra (India) / M. Pandith, R.D. Kaplay, S.S. Potdar, H. Sangnor, A.D. Rao // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2017. – V. 189. – P. 428–442.
22. Hydrogeochemical and isotopic signature of surface and groundwater in a highly industrialized sector of the Río de la Plata coastal plain (Argentina) / L. Santucci, E. Carol, G. Borzi, M.G. García // *Marine Pollution Bulletin*. – 2017. – V. 120. – P. 387–395.
23. Selvakumar S., Chandrasekar N., Kumar G. Hydrogeochemical characteristics and groundwater contamination in the rapid urban development areas of Coimbatore, India // *Water Resources and Industry*. – 2017. – V. 17. – P. 26–33.
24. Geochemical Characteristics and Evaluation of Minor and Trace Elements Pollution in Groundwater of Tuticorin City, Tamil Nadu, India using Geospatial Techniques / S. Selvam, S. Venkatraman, P. Sivasubramanian, S.Y. Chung, C. Singaraja // *Journal Geological Society of India*. – 2017. – V. 90. – P. 62–68.
25. Spatial and seasonal variations of surface and groundwater quality in a fast-growing city: Lubango, Angola / M.M.V.G. Silva, E.M.C. Gomes, M. Isaias, J.M.M. Azevedo, B. Zeferino // *Environmental Earth Sciences*. – 2017. – № 76. – P. 790–807.
26. Evaluation of groundwater quality and health risks from contamination in the north edge of the Loess Plateau, Yulin City, Northwest China / H. Su, W. Kang, Y. Xu, J. Wang // *Environmental Earth Sciences*. – 2017. – V. 76. – P. 467–488.
27. Hydrogeological effects of dredging navigable canals through lagoon shallows. A case study in Venice / P. Teatini, G. Isotton, S. Nardean, M. Ferronato, A. Mazzia, C. Da Lio, L. Zaggia, D. Bellafiore, M. Zecchin, L. Baradello, F. Cellone, F. Corami, A. Gambaro, G. Libralato, E. Morabito, A.V. Ghirardini, R. Broglia, S. Zaghi, L. Tosi // *Hydrology and Earth System Sciences*. – 2017. – V. 21. – P. 5627–5646.
28. Weaver J.W., Murray A.R., Kremer F.V. Estimation of the proximity of private domestic wells to underground storage tanks: Oklahoma pilot study // *Science of the Total Environment*. – 2017. – V. 609. – P. 1589–1599.
29. Hydrochemical profiles in urban groundwater systems: New insights into contaminant sources and pathways in the subsurface from legacy and emerging contaminants / D. White, D.J. Lapworth, M.E. Stuart, P.J. Williams // *Science of the Total Environment*. – 2016. – V. 562. – P. 962–973.
30. Wilson D.C. Potential urban runoff impacts and contaminant distributions in shoreline and reservoir environments of Lake Havasu, southwestern United States // *Science of the Total Environment*. – 2018. – V. 621. – P. 95–107.
31. Wyman D.A., Koretsky C.M. Effects of road salt deicers on an urban groundwater – fed kettle lake // *Applied Geochemistry*. – 2018. – V. 89. – P. 265–272.
32. Assessing Risks at a Former Chemical Facility, Nanjing City, China: An Early Test of the New Remediation Guidelines for Waste Sites in China / Y. Zhang, S. Ye, J. Wu, R.G. Stahl Jr. // *Water*. – 2017. – V. 9. – P. 657–672.
33. Методическое письмо по подготовке схем гидрогеологической стратификации. – М.: Министерство природных ресурсов Российской Федерации, 1999. – 17 с.
34. Методические рекомендации по составлению карт гидрогеологического районирования масштаба 1:2500000, схем гидрогеологической стратификации и классификаторов объектов гидрогеологического районирования и стратификации. – М.: МПР России, 2004. – 29 с.
35. Методическое руководство по составлению и подготовке к изданию листов Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:200000 (второго издания). Версия 1.2. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2015. – 163 с.
36. Методическое руководство по составлению и подготовке к изданию листов Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:200000 (второе издание). Версия 1.3. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2017. – 173 с.
37. Гидрогеология СССР. Т. VIII. Крым / гл. ред. академик А.В. Сидоренко. – М.: Изд-во «Недра», 1970. – 364 с.
38. Гидрогеология СССР. Т. VIII. Крым / гл. ред. академик А.В. Сидоренко. – М.: Изд-во «Недра», 1971. – 55 с.
39. Карта подземных вод: L-(36), (37). Государственная геологическая карта СССР (Симферополь). Карта подземных вод, масштаб: 1:1000000 / под ред. И.Н. Павловец. – СПб.: ФГБУ «ВСЕГЕИ», 1983.
40. Геологическая карта: L-36-XXXIV, XXXV. Геологическая карта СССР. Серия Крымская, масштаб: 1:200000, серия: Крымская / под ред. М.В. Муратова. – Днепропетровск: МГРИ им. С. Орджоникидзе, трест Днепрогеология, 1965. – 1 с.

41. Геологическая карта: L-37-XIX, XXV. Государственная геологическая карта СССР. Серия Крымская, масштаб: 1:200000, серия: Крымская / под ред. М.В. Муратова. – Днепропетровск: трест Днепрогеология, трест Крымнефтегазразведка, 1971. – 1 с.
42. Геологическая карта: L-36-XXIX. Геологическая карта СССР. Серия Крымская, масштаб: 1:200000, серия: Крымская / под ред. М.А. Калацук. – Киев: ЦКЛ треста «Киевгеология», 1973. – 1 с.
43. Геологическая карта: Геологическая карта Горного Крыма, масштаб: 1:200000 / под ред. Н.Е. Деренюк. – М.: Н.Е. МинГео СССР, 1984. – 1 с.
44. Геологическая карта: L-(36), (37). Государственная геологическая карта СССР (Симферополь), масштаб: 1:1000000 / под ред. Д.Ф. Володина, П.Н. Сторчак. – Киев: Центральная тематическая экспедиция Министерства геологии Украинской ССР, 1986. – 1 с.
45. Геологическая карта: Геологическая карта Горного и Предгорного Крыма, масштаб: 1:200000 / под ред. В.В. Юдина. – Симферополь: Научно-производственный центр Союзкарта, 2009. – 1 с.
46. Карта домеловых отложений: L-(36), (37). Государственная геологическая карта СССР (Симферополь). Карта домеловых образований, масштаб: 1:1000000 / под ред. П.Н. Сторчак. – СПб: ФГБУ «ВСЕГЕИ», 1983. – 1 с.
47. Карта дочетвертичных образований: L-(36), (37). Государственная геологическая карта СССР (Симферополь). Карта дочетвертичных образований, масштаб: 1:1000000 / под ред. П.Н. Сторчак. – СПб: ФГБУ «ВСЕГЕИ», 1983. – 1 с.
48. Карта полезных ископаемых: L-37-XIX, XXV. Карта полезных ископаемых СССР. Серия Крымская, масштаб: 1:200000, серия: Крымская / под ред. М.В. Муратова. – Днепропетровск: трест Днепрогеология, трест Крымнефтегазразведка, 1971. – 1 с.
49. Карта полезных ископаемых: L-(36), (37). Государственная геологическая карта СССР (Симферополь). Карта полезных ископаемых, масштаб: 1:1000000 / под ред. П.Н. Сторчак. – СПб: ФГБУ «ВСЕГЕИ», 1983. – 1 с.
50. Карта четвертичных отложений: L-(36), (37). Государственная геологическая карта СССР (Симферополь). Карта четвертичных отложений, масштаб: 1:1000000 / под ред. П.Н. Сторчак. – СПб: ФГБУ «ВСЕГЕИ», 1983. – 1 с.
51. Шварцев С.И. Общая гидрогеология. – М.: Недра, 1996. – 423 с.
52. Геологическая карта Украины: Крымская серия: L-36-XXVIII, L-36-XXXIV, масштаб: 1:200000 / под ред. С.В. Билецкого. – Киев: ГТСФП «Южногеоцентр», 2006. – 1 с.
53. Геология и нефтегазоносность степного и предгорного Крыма / Г.Х. Дикенштейн, Н.В. Безносков, Л.М. Голубничая, В.А. Загоруйко, А.Е. Каменецкий, А.М. Моксякова, А.П. Ослоповский, О.В. Снегирева, В.Г. Хельквист, Е.К. Шуцкая. – М.: Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горно-топливной литературы, 1958. – 75 с.
54. Материалы по геологии и нефтегазоносности юга СССР / под ред. М.Д. Мирзоевой. – Л.: ГОСГЕОЛТЕХИЗДАТ, 1963. – 252 с.
55. Понизовский А.М. Соляные ресурсы Крыма. Симферополь. – Симферополь: Изд-во «Крым», 1965. – 83 с.
56. Доленко Г.Н., Парыняк А.И., Копач И.П. Структурно-тектонические этапы нефтегазоносности Крымской нефтегазоносной провинции // Республиканский межведомственный сборник. – Киев: Наукова думка, 1967. – С. 5–16.
57. Геология СССР. Т. VIII. Крым. Ч. I. Геологическое описание / гл. ред. академик А.В. Сидоренко. – М.: Изд-во «Недра», 1969. – 582 с.
58. Геология СССР. Т. VIII. Крым. Полезные ископаемые / гл. ред. академик А.В. Сидоренко. – М.: Изд-во «Недра», 1974. – 210 с.
59. Чекунов А.В., Веселов А.А., Гилькман А.И. Геологическое строение и история развития Причерноморского прогиба. – Киев: Наукова думка, 1976. – 164 с.
60. Инженерная геология СССР. В восьми томах. Кавказ, Крым, Карпаты / гл. ред. Е.М. Сергеев, Г.А. Голодковская. – М.: Изд-во Московского университета, 1978. – 360 с.
61. Казанцев Ю.В. Тектоника Крыма. – М.: Изд-во «Наука», 1982. – 112 с.
62. Структурная геология Крыма / Ю.В. Казанцев, Т.Т. Казанцева, М.Ю. Аржавитина, П.В. Аржавитин, Н.И. Бехер, А.А. Терехов, С.В. Попович. – Уфа: БНЦ УрО АН СССР, 1989. – 156 с.
63. Тихоненков Ю.Э. Индексация объектов гидрогеологической стратификации // Разведка и охрана недр. – 2006. – № 2. – С. 47–50.
64. Клюкин А.А. Экзогеодинамика Крыма. – Симферополь: Таврия, 2007. – 320 с.
65. Юдин В.В. Геодинамика Крыма. – Симферополь: ДИАИПИ, 2011. – 335 с.
66. Новиков Д.А., Черных А.В., Дульцев Ф.Ф. Новая схема гидрогеологической стратификации города федерального значения Севастополь // Подземные воды Востока России: Материалы Всероссийского совещания по подземным водам Востока России (XXII Совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока с международным участием). – Новосибирск: ИНГТ СО РАН, 2018. – С. 346–351.
67. Мартакова Е.Я., Попов В.Ф., Краснов Е.В. Отчет «О поисково-разведочных работах на воду для целей водоснабжения г. Севастополя и Ю.Б. Крыма». – Днепропетровск: Севастопольская гидрогеологическая партия, Крымская комплексная геологическая экспедиция, трест Днепрогеология, Главгеология, 1959. – 166 с.
68. Новиков Д.А., Черных А.В., Дульцев Ф.Ф. Особенности гидрогеологии верхнеюрских отложений юго-западных районов Крымского полуострова // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. – 2018. – Т. 4 (70). – № 4. – С. 268–288.
69. Новиков Д.А., Черных А.В., Дульцев Ф.Ф. Особенности гидрогеологии верхнеюрских отложений юго-западных районов Крымского полуострова // Изучение и использование естественных и искусственных подземных пространств и закарстованных территорий: материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Симферополь, 2018. – С. 105–109.
70. Geochemistry of natural waters of the Baydar valley (Crimean Peninsula) / L.A. Nichkova, D.A. Novikov, A.V. Chernykh, F.F. Dultsev, G.A. Sigora, T.Yu. Khomenko // E3S Web of Conferences. – 2019. – V. 98. – P. 01036.
71. Distribution of the stable isotopes ($\delta^{18}\text{O}$, δD and $\delta^{13}\text{C}$) in natural waters of the Baydar valley (Crimean Peninsula) / D.A. Novikov, L.A. Nichkova, A.V. Chernykh, F.F. Dultsev, A.N. Pyryaev, G.A. Sigora, T.Yu. Khomenko // E3S Web of Conferences. – 2019. – V. 98. – P. 01038–01038.
72. Novikov D.A., Chernykh A.V., Dultsev F.F. Groundwater quality assessment of Upper Jurassic sediments in the southwestern districts of the Crimean Peninsula for drinking and agricultural water supply // Ecology and Industry of Russia. – 2019. – V. 23. – Iss. 4. – P. 52–57.
73. Гидрогеология и гидрогеохимия Крымского полуострова в свете проблемы питьевого водоснабжения / Д.А. Новиков, А.В. Черных, Ф.Ф. Дульцев, К.В. Сесь // Подземные воды Востока России: Материалы Всероссийского совещания по подземным водам Востока России (XXII Совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока с международным участием). – Новосибирск: ИНГТ СО РАН, 2018. – С. 339–346.

Поступила 20.11.2018 г.

Информация об авторах

Новиков Д.А., кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук; доцент кафедр геологии месторождений нефти и газа и общей и региональной геологии Новосибирского национального исследовательского государственного университета.

Черных А.В., младший научный сотрудник лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук.

Дульцев Ф.Ф., младший научный сотрудник лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук.

UDC 556.382(477.75)

NEW LOOK AT HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS OF THE FEDERAL CITY OF SEVASTOPOL

Dmitry A. Novikov^{1,2},

NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Anatoliy V. Chernykh¹,

ChernykhAV@ipgg.sbras.ru

Fedor F. Dultsev¹,

DultsevFF@ipgg.sbras.ru

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 3, Koptug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

² Novosibirsk State University, 1, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russia.

The relevance of the work consists in compilation of all available hydrogeological materials (published and fund) on the territory of the city of federal significance Sevastopol and drawing up in accordance with existing methodological recommendations the new generation scheme of hydrogeological stratification and a hydrogeological map for the first time in the last 50 years. The studied territory has a rich history from ancient times and as a consequence, year-round it is a favorite place in the tourist routes along the Crimean peninsula. The increasing flow of tourists and satisfaction of the current and future needs of the Sevastopol urban agglomeration in quality drinking water is one of the primary tasks of ensuring social stability, protecting health and increasing the life expectancy of the population (436 thousand people as of 01.01.2018). Currently, 9 water intakes (Orlovsky, Lyubimov, Rodnikovskiy and others) are used in the city for the purposes of centralized household and drinking water supply. Most of them exploit the water-bearing complex of Miocene sediments. If one analyzes the situation with the underground water supply of the city of Sevastopol as a whole, it can be stated that the approved operational reserves at operating water intakes are at best 30–40 %, with the exception of Inkerman water intake, where this figure reaches 90–93 %. But the issue of underground water supply and development of existing water intakes is not simple. Errors in the operation of the Orlovsky water intake in the 1980s have already led to disastrous consequences for the change in chemical composition of groundwater in the exploited aquifer. In this regard, the issue of underground water supply must begin with the creation of a modern hydrogeological model, which first of all implies the actualization of the hydrogeological stratification scheme and the hydrogeological map of the city of Sevastopol.

The aim of the research is to reveal the features of the hydrogeological structure of the city of federal significance of Sevastopol on the basis of a detailed analysis of archival, published and field research, and to compile, in accordance with existing methodological recommendations, a new generation scheme of hydrogeological stratification and a hydrogeological map.

Methods. The methods of I.K. Zaitsev, B.N. Arkhangelsky, E.L. Baskov, M.S. Altovsk, A.S. Ryabchenkov, N.V. Rogovskaya, M.R. Nikitin, B.E. Antypko and others researchers, the latest methodological recommendations of the Ministry of Natural Resources of Russia and VSEGEI on the compilation of hydrogeological maps and schemes of hydrogeological stratification, fund and published data were used.

Results. The hydrogeological data on the territory of the city of federal significance Sevastopol is summarized and a hydrogeological map and stratification scheme were compiled. The data on the main aquifers and horizons in the region are presented. A brief description of their chemical composition is given. Two water-bearing structural stage (Mesozoic and Cenozoic) are distinguished in the region of investigation. They include 7 aquifers: 1) complex of Pliocene and Quaternary deposits – 8(N₂-aQ); 2); Miocene – 8(N₁); 3) 3) Paleocene-Eocene – 8(P₁-P₂); 4) Upper Cretaceous – 8(K₂); 5) Lower Cretaceous – 8(K₁); 6) Upper Jurassic – 8(J₃); 7) the Upper Triassic–Middle Jurassic – 8(T₃-J₂). It is established that fractured-porous, fissured-karstic, fractured and pressure-fractured waters with total mineralization up to 1,5 g/dm³ are common in the lower (Mesozoic) aquifers, whereas in the upper (Cenozoic) aquifers mineralization varies from 0,4–0,5 to 10,3 g/dm³ (up to 35 g/dm³ in coastal areas). According to the chemical composition (within Shchukarev's classification) water composition is very diverse and there are 37 chemical types of water from fresh Ca-HCO₃ to saline Na-Cl. The composition is dominated by ground waters of hydrocarbonate, hydrocarbonate chloride and chloride calcium and calcium-sodium types with total mineralization ranging from 0,16 to 2,63 g/dm³. Salinity of most groundwaters does not exceed 0,6 g/dm³.

Key words:

Groundwater, hydrogeological map, hydrogeological stratification, Sevastopol city, Crimea.

The research was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research and Sevastopol within the research project no. 18–45–920032 p_a.

REFERENCES

1. Raftery A.E., Zimmer A., Frierson D.M.V., Startz R., Liu P. Less than 2 °C warming by 2100 unlikely. *Nature Climate Change*, 2017, vol. 7, pp. 637–641.
2. Parubets O.V. Climate change in the Crimea. *Scientific Notes of the Crimean Federal V.I. Vernadsky University. Geography. Geology*, 2009, vol. 22 (61), no. 2, pp. 88–96. In Rus.
3. Abu Jabal M.S., Abustan I., Rozaimy M.R., El Najar H. Groundwater beneath the urban area of Khan Younis City, southern Gaza Strip (Palestine): assessment for multi-domestic purposes. *Arabian Journal of Geosciences*, 2017, vol. 10, pp. 257–272.
4. Aloni A., Brenner A. Use of Cotton as a Carbon Source for Denitrification in Biofilters for Groundwater Remediation. *Water*, 2017, vol. 9, pp. 714–725.

5. Arora A.S. Urban stormwater – greywater management system for sustainable urban water management at sub-watershed level. *E3S Web of Conferences* 22, 2017. 7 p.
6. Asadi P., Ataie-Ashtiani B., Beheshti A. Vulnerability assessment of urban groundwater resources to nitrate: the case study of Mashhad, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 2017, vol. 76, pp. 41–56.
7. Castiglioni S., Davoli E., Riva F., Palmiotto M., Camporini P., Manenti A., Zuccato E. Mass balance of emerging contaminants in the water cycle of a highly urbanized and industrialized area of Italy. *Water Research*, 2018, vol. 131, pp. 287–298.
8. Chakraborti D., Das B., Rahman M.M., Nayak B., Pal A., Sengupta M.K., Ahamed S., Hossain Md.A., Chowdhury U.K., Kumar Biswas B., Saha K.C., Dutta R.N. Arsenic in groundwater of the Kolkata Municipal Corporation (KMC), India: Critical review and modes of mitigation. *Chemosphere*, 2017, vol. 180, pp. 437–447.
9. Chitsazan M., Aghazadeh N., Mirzaee Y., Golestan Y. Hydrochemical characteristics and the impact of anthropogenic activity on groundwater quality in suburban area of Urmia city, Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 2017, vol. 21, no. 1, pp. 1–21.
10. Fallahzadeh R.A., Ghaneian M.T., Miri M., Dashti M.M. Spatial analysis and health risk assessment of heavy metals concentration in drinking water resources. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, vol. 24, pp. 24790–24802.
11. Guo X., Zuo R., Shan D., Cao Y., Wang J., Teng Y., Fu Q., Zheng B. Source apportionment of pollution in groundwater source area using factor analysis and positive matrix factorization methods. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2017, vol. 23, no. 6, pp. 1417–1436.
12. Jangam C., Pujari P. Impact of on-site sanitation systems on groundwater sources in a coastal aquifer in Chennai, India. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, vol. 26, no. 3, pp. 1–10.
13. Kessasra F., Mesbah M., Khemissa Z., Bouab N., Khaled-Khodja S., Lamari H. Combined hydrogeological and nitrate modelling to manage water resources of the Middle Soummam Aquifer, Northeast of Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 2017, vol. 10, pp. 368–388.
14. Lasagna M., De Luca D.A. Evaluation of sources and fate of nitrates in the western Po plain groundwater (Italy) using nitrogen and boron isotopes. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, vol. 26, no. 3, pp. 1–16.
15. Lins-de-Barros F.M. Integrated coastal vulnerability assessment: A methodology for coastal cities management integrating socio-economic, physical and environmental dimensions – Case study of Regiao dos Lagos, Rio de Janeiro, Brazil. *Ocean & Coastal Management*, 2017, vol. 149, pp. 1–11.
16. Liu J., Jiang L.H., Zhang C.J., Li P., Zhao T.K. Nitrate-nitrogen contamination in groundwater: Spatiotemporal variation and driving factors under cropland in Shandong Province, China. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2017, vol. 82, 012059.
17. Malakar A., Islam S., Ali Md.A., Ray S. Rapid decadal evolution in the groundwater arsenic content of Kolkata, India and its correlation with the practices of her dwellers. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, vol. 188, pp. 584–595.
18. Mali N., Cerar S., Koroša A., Auersperger P. Passive sampling as a tool for identifying micro – organic compounds in groundwater. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 593–594, pp. 722–734.
19. Margenat A., Matamoros vol., Díez S., Cañameras N., Comas J., Bayona J.M. Occurrence of chemical contaminants in peri-urban agricultural irrigation waters and assessment of their phytotoxicity and crop productivity. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 599–600, pp. 1140–1148.
20. Merghem K.A., Jilali A., Alnedhary A.A., Halouani H.E., Dssouli K. Impact of wastewater on groundwater resources in Sana'a basin, Yemen. *Arabian Journal of Geosciences*, 2016, vol. 9, no. 268, pp. 1–14.
21. Pandith M., Kaplay R.D., Potdar S.S., Sangnor H., Rao A.D. Impact of urbanization coupled with drought situations on groundwater quality in shallow (basalt) and deeper (granite) aquifers with special reference to fluoride in Nanded – Waghala Municipal Corporation, Nanded District, Maharashtra (India). *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, vol. 189, pp. 428–442.
22. Santucci L., Carol E., Borzi G., Garcia M.G. Hydrogeochemical and isotopic signature of surface and groundwater in a highly industrialized sector of the Rio de la Plata coastal plain (Argentina). *Marine Pollution Bulletin*, 2017, vol. 120, pp. 387–395.
23. Selvakumar S., Chandrasekar N., Kumar G. Hydrogeochemical characteristics and groundwater contamination in the rapid urban development areas of Coimbatore, India. *Water Resources and Industry*, 2017, vol. 17, pp. 26–33.
24. Selvam S., Venkatramanan S., Sivasubramanian P., Chung S.Y., Singaraja C. Geochemical Characteristics and Evaluation of Minor and Trace Elements Pollution in Groundwater of Tuticorin City, Tamil Nadu, India using Geospatial Techniques. *Journal Geological Society of India*, 2017, vol. 90, pp. 62–68.
25. Silva M.M.V.G., Gomes E.M.C., Isaías M., Azevedo J.M.M., Zeferrino B. Spatial and seasonal variations of surface and groundwater quality in a fast-growing city: Lubango, Angola. *Environmental Earth Sciences*, 2017, no. 76, pp. 790–807.
26. Su H., Kang W., Xu Y., Wang J. Evaluation of groundwater quality and health risks from contamination in the north edge of the Loess Plateau, Yulin City, Northwest China. *Environmental Earth Sciences*, 2017, vol. 76, pp. 467–488.
27. Teatini P., Isotton G., Nardean S., Ferronato M., Mazzia A., Da Lio C., Zaggia L., Bellafiore D., Zecchin M., Baradello L., Cellone F., Corami F., Gambaro A., Libralato G., Morabito E., Ghirardini A.V., Broglia R., Zaghi S., Tosi L. Hydrogeological effects of dredging navigable canals through lagoon shallows. A case study in Venice. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, vol. 21, pp. 5627–5646.
28. Weaver J.W., Murray A.R., Kremer F.V. Estimation of the proximity of private domestic wells to underground storage tanks: Oklahoma pilot study. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 609, pp. 1589–1599.
29. White D., Lapworth D.J., Stuart M.E., Williams P.J. Hydrochemical profiles in urban groundwater systems: New insights into contaminant sources and pathways in the subsurface from legacy and emerging contaminants. *Science of the Total Environment*, 2016, vol. 562, pp. 962–973.
30. Wilson D.C. Potential urban runoff impacts and contaminant distributions in shoreline and reservoir environments of Lake Havasu, southwestern United States. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 621, pp. 95–107.
31. Wyman D.A., Koretsky C.M. Effects of road salt deicers on an urban groundwater – fed kettle lake. *Applied Geochemistry*, 2018, vol. 89, pp. 265–272.
32. Zhang Y., Ye S., Wu J., Stahl Jr. R.G. Assessing Risks at a Former Chemical Facility, Nanjing City, China: An Early Test of the New Remediation Guidelines for Waste Sites in China. *Water*, 2017, vol. 9, pp. 657–672.
33. *Metodicheskoe pismo po podgotovke skhem gidrogeologicheskoy stratifikatsii* [Methodical letter on the preparation of schemes of hydrogeological stratification]. Moscow, Ministry of Natural Resources of the Russian Federation, 1999. 10 p.
34. *Metodicheskie rekomendatsii po sostavleniyu kart gidrogeologicheskogo rayonirovaniya masshtaba 1:2500000, skhem gidrogeologicheskoy stratifikatsii i klassifikatorov obyektov gidrogeolo-*

- gicheskogo rayonirovaniya i stratifikatsii* [Methodological recommendations for compiling maps of hydrogeological zoning at a scale of 1: 2,500,000, schemes of hydrogeological stratification and classifiers of objects of hydrogeological zoning and stratification]. Moscow, Ministry of Natural Resources of the Russian Federation, 2004. 29 p.
35. *Metodicheskoe rukovodstvo po sostavleniyu i podgotovke k izdaniyu listov Gosudarstvennoy geologicheskoy karty Rossiyskoy Federatsii masshtaba 1:200000 (vtorogo izdaniya). Versiya 1.2.* [Methodological guidelines for compiling and preparing for publication of sheets of the State Geological Map of the Russian Federation 1: 200000 scale (second edition). Version 1.2.]. St. Petersburg, VSEGEI Cartographic Factory, 2015. 163 p.
 36. *Metodicheskoe rukovodstvo po sostavleniyu i podgotovke k izdaniyu listov Gosudarstvennoy geologicheskoy karty Rossiyskoy Federatsii masshtaba 1:200 000 (vtoroye izdaniye). Versiya 1.3.* [Methodological guidelines for compiling and preparing for publication of the State Geological Map of the Russian Federation at a scale of 1: 200 000 (second edition). Version 1.3.]. St. Petersburg, VSEGEI Cartographic Factory, 2017. 173 p.
 37. *Gidrogeologiya SSSR. T. VIII. Krym* [Hydrogeology of the USSR. Vol. VIII. Crimea]. Ed. by A.V. Sidorenko. Moscow, Nedra Publ., 1970. 364 p.
 38. *Gidrogeologiya SSSR. T. VIII. Krym* [Hydrogeology of the USSR. Vol. VIII. Crimea]. Ed. by A.V. Sidorenko. Moscow, Nedra Publ., 1971. 55 p.
 39. *Karta podzemnykh vod: L-(36), (37). Gosudarstvennaya geologicheskaya karta SSSR (Simferopol). Karta podzemnykh vod, masshtab: 1:1000000* [Map of groundwater: L-(36), (37). State Geological Map of the USSR (Simferopol). Map of groundwater, scale: 1:1000000]. Ed. by I.N. Pavlovets. St-Petersburg, VSEGEI Publ., 1983. 1 p.
 40. *Geologicheskaya karta: L-36-XXXIV, XXXV. Geologicheskaya karta SSSR. Seriya Krymskaya, masshtab: 1:200000, seriya: Krymskaya* [Geological map: L-36-XXXIV, XXXV. Geological map of the USSR. Crimean series, scale 1:200000, Serie: Crimean]. Ed. by M.V. Muratov. Dnepropetrovsk, S. Ordzhonikidze MGRI, trust Dneprogeology Publ., 1965. 1 p.
 41. *Geologicheskaya karta: L-37-XIX, XXV. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta SSSR. Seriya Krymskaya, masshtab: 1:200000, seriya: Krymskaya* [Geological map: L-37-XIX, XXV. State geological map of the USSR. Crimean series, scale 1:200000, series: Crimean]. Ed. by M.V. Muratov. Dnepropetrovsk, Trest Dneprogeologiya, trest Krymneftegazrazvedka Publ., 1971. 1 p.
 42. *Geologicheskaya karta: L-36-XXIX. Geologicheskaya karta SSSR. Seriya Krymskaya, masshtab: 1:200000, seriya: Krymskaya* [Geological map: L-36-XXIX. Geological map of the USSR. Crimean series, scale 1:200000, series: Crimean]. Ed. by M.A. Kalatsuk. Kiev, CCL Trust Kievgeologiya Publ., 1973. 1 p.
 43. *Geologicheskaya karta: Geologicheskaya karta Gornogo Kryma, masshtab: 1:20000* [Geological map: Geological map of the Mountainous Crimea, scale 1:20000]. Ed. by N.E. Derenyuk. Moscow, Mingeo USSR Publ., 1984. 1 p.
 44. *Geologicheskaya karta: L-(36), (37). Gosudarstvennaya geologicheskaya karta SSSR (Simferopol), masshtab: 1:1000000* [Geological map: L-(36), (37). State Geological Map of the USSR (Simferopol), scale 1:1000000]. Eds. D.F. Volodin, P.N. Storchak. Kiev, Central thematic expedition of the Ministry of Geology of the Ukrainian SSR Publ., 1986. 1 p.
 45. *Geologicheskaya karta: Geologicheskaya karta Gornogo i Predgornogo Kryma, masshtab: 1:200000* [Geological map: Geological map of the Mountainous and Foothill Crimea, scale 1:200000]. Ed. by V.V. Yudin. Simferopol, Research and Production Center of Soyuzkart Publ., 2009. 1 p.
 46. *Karta domelovykh otlozheniy: L-(36), (37). Gosudarstvennaya geologicheskaya karta SSSR (Simferopol). Karta domelovykh obrazovaniy, masshtab: 1:1000000* [Map of the pre-Cretaceous deposits: L-(36), (37). State Geological Map of the USSR (Simferopol). Map of pre-Cretaceous formations, scale 1:1000000]. Ed. by P.N. Storchak. St-Petersburg, FGBU VSEGEI Publ., 1983. 1 p.
 47. *Karta dochetvertichnykh obrazovaniy: L-(36), (37). Gosudarstvennaya geologicheskaya karta SSSR (Simferopol). Karta dochetvertichnykh obrazovaniy, masshtab: 1:1000000* [Map of pre-Quaternary formations: L-(36), (37). State Geological Map of the USSR (Simferopol). Map of pre-Quaternary formations, scale 1:1000000]. Ed. by P.N. Storchak. St-Petersburg, FGBU VSEGEI Publ., 1983. 1 p.
 48. *Karta poleznykh iskopayemykh: L-37-XIX, XXV. Karta poleznykh iskopayemykh SSSR. Seriya Krymskaya, masshtab: 1:200000, seriya: Krymskaya* [Mineral Map: L-37-XIX, XXV. Map of minerals of the USSR. Crimean series, scale 1:200000, Serie: Crimean]. Ed. by M.V. Muratov. Dnepropetrovsk, Trust Dneprogeology, trust Krimneftegazrazvedka Publ., 1971. 1 p.
 49. *Karta poleznykh iskopayemykh: L-(36), (37). Gosudarstvennaya geologicheskaya karta SSSR (Simferopol). Karta poleznykh iskopayemykh, masshtab: 1:1000000* [Mineral Map: L-(36), (37). State Geological Map of the USSR (Simferopol). Map of minerals, scale 1:1000000]. Ed. by P.N. Storchak. St-Petersburg, FSBB VSEGEI Publ., 1983. 1 p.
 50. *Karta chetvertichnykh otlozheniy: L-(36), (37). Gosudarstvennaya geologicheskaya karta SSSR (Simferopol). Karta chetvertichnykh otlozheniy, masshtab: 1:1000000* [Map of Quaternary deposits: L-(36), (37). State Geological Map of the USSR (Simferopol). Map of Quaternary deposits, scale 1:1000000]. Ed. by P.N. Storchak. St-Petersburg, FGBU VSEGEI Publ., 1983. 1 p.
 51. Shvartsev S.L. *Obshaya gidrogeologiya* [General hydrogeology]. Moscow, Nedra Publ., 1996. 423 p.
 52. *Geologicheskaya karta Ukrainy: Krymskaya seria: L-36-XXVIII, L-36-XXXIV, masshtab: 1:200000* [Geological map of Ukraine: series: Crimean: L-36-XXVIII, L-36-XXXIV, scale 1:2000000]. Ed. by S.V. Biletskiy. Kiev, SGSFP Yushnogeocentr Publ., 2006. 1 p.
 53. Dikenshteyn G.Kh., Beznosov N.V., Golubnichaya L.M., Zagoruyko V.A., Kamenetskiy A.E., Moksyakova A.M., Oslopovskiy A.P., Snegireva O.V., Khelkvist V.G., Shutskeya E.K. *Geologiya i neftegazonosnost stepnogo i predgornogo Kryma* [Geology and oil and gas content of the steppe and foothill Crimea]. Moscow, State Scientific and Technical Publishing House of Oil and Mining and Fuel Literature, 1958. 75 p.
 54. *Materialy po geologii i neftegazonosnosti yuga SSSR* [Materials on geology and oil and gas potential of the south of the USSR]. Ed. by M.D. Mirzoeva. Leningrad, Gosgeoltekhizdat Publ., 1963. 252 p.
 55. Ponizovskiy A.M. *Solyanye resursy Kryma. Simferopol* [The salt resources of the Crimea. Simferopol]. Simferopol, Crimea Publ. house, 1965. 83 p.
 56. Dolenko G.N., Parylyak A.I., Kopach I.P. *Strukturno-tektonicheskiye etazhi neftegazonosnosti Krymskoy neftegazonosnoy provintsii* [Structural-tectonic floors of oil and gas content of the Crimean oil and gas province]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1967. P. 5–16.
 57. *Geologiya SSSR. T. VIII. Krym. Ch. I Geologicheskoye opisanie* [Geology of the USSR. Vol. VIII. Crimea. P. I Geological Description]. Ed. by A.V. Sidorenko. Moscow, Nedra Publ., 1969. 582 p.
 58. *Geologiya SSSR. T. VIII. Krym. Poleznye iskopayemye* [Geology of the USSR. Vol. VIII. Crimea. Minerals]. Ed. by A.V. Sidorenko. Moscow, Nedra Publ., 1974. 210 p.
 59. Chekunov A.V., Veselov A.A., Gilman A.I. *Geologicheskoe stroenie i istoriya razvitiya Prichernomorskogo progiba* [Geological structure and history of development of the Black Sea trough]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1976. 164 p.
 60. Sergeev E.M., Golodkovskaya G.A. *Inzhenernaya geologiya SSSR. Kavkaz, Krym, Karpaty* [Engineering geology of the USSR. Caucasus, Crimea, Carpathians]. Moscow, Publ. house of Moscow University, 1978. 360 p.

61. Kazantsev Yu.V. *Tektonika Kryma* [Tectonics of the Crimea]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 112 p.
62. Kazantsev Yu.V., Kazantseva T.T., Arzhavina M.Yu., Arzhavina P.V., Bekher N.I., Terekhov A.A., Popovich S.V. *Strukturnaya geologiya Kryma* [Structural geology of the Crimea]. Ufa, BNC UrO AN SSSR Publ., 1989. 156 p.
63. Tikhonenkov Yu.E. Indexing of Hydrogeological Stratification Objects. *Prospect and protection of mineral resources*, 2006, no. 2, pp. 47–50. In Rus.
64. Klyukin A.A. *Ekzogeodinamika Kryma* [Exogeodynamics of the Crimea]. Simferopol, Tavria Publ., 2007. 320 p.
65. Yudin V.V. *Geodinamika Kryma* [Geodynamics of the Crimea]. Simferopol, DIAYPI Publ., 2011. 35 p.
66. Novikov D.A., Chernykh A.V., Dultsev F.F. Novaya skhema gidrogeologicheskoy stratifikatsii goroda federalnogo znacheniya Sevastopol [New scheme of hydrogeological stratification of the city of federal significance Sevastopol]. *Podzemnye vody Vostoka Rossii. Materialy Vserossiyskogo soveshchaniya po podzemnym vodam Vostoka Rossii (XXII Soveshchaniye po podzemnym vodam Sibiri i Dalnego Vostoka s mezhdunarodnym uchastiyem)* [Underground waters of the East of Russia. Materials of the All-Russian meeting on the underground waters of the East of Russia (XXII Meeting on underground waters of Siberia and the Far East with international participation)]. Novosibirsk, IPGG SB RAS, 2018. pp. 346–351.
67. Martakova E.Ya., Popov V.F., Krasnov E.V. *Otchet «O poiskovo-razvedochnykh rabotakh na vodu dlya tseley vodosnabzheniya g. Sevastopolya i Yu.B. Kryma»* [The report «On exploration for water for the purposes of water supply in Sevastopol and S.C. Crimea»]. Dnepropetrovsk, Sevastopolskaya gidrogeologicheskaya partiya, Krymskaya kompleksnaya geologicheskaya ekspeditsiya, trest Dneprogeologiya, Glavgeologiya Publ., 1959. 166 p.
68. Novikov D.A., Chernykh A.V., Dultsev F.F. Features of hydrogeology of the Upper Jurassic deposits of the southwestern regions of the Crimean peninsula. *Scientific notes of the Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky. Geography. Geology*, 2018, vol. 4 (70), no. 4, pp. 268–288. In Rus.
69. Novikov D.A., Chernykh A.V., Dultsev F.F. *Osobennosti gidrogeologii verkhneyurskikh otlozheniy yugo-zapadnykh rayonov Krymskogo poluostrova* [Features of hydrogeology of the Upper Jurassic deposits of the southwestern regions of the Crimean peninsula]. *Izucheniye i ispolzovanie estestvennykh i iskusstvennykh podzemnykh prostranstv i zakarstovannykh territoriy. Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Study and use of natural and artificial underground spaces and karst territories. Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference]. Simferopol, 2018. pp. 105–109.
70. Nishkova L.A., Novikov D.A., Chernykh A.V., Dultsev F.F., Sigora G.A., Khomenko T.Yu. Geochemistry of natural waters of the Baydar valley (Crimean Peninsula). *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 98, pp. 01036.
71. Novikov D.A., Nishkova L.A., Chernykh A.V., Dultsev F.F., Pyryaev A.N., Sigora G.A., Khomenko T.Yu. Distribution of the stable isotopes ($\delta^{18}O$, δD и $\delta^{13}C$) in natural waters of the Baydar valley (Crimean Peninsula). *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 98, pp. 01038.
72. Novikov D.A., Chernykh A.V., Dultsev F.F. Groundwater quality assessment of Upper Jurassic sediments in the southwestern districts of the Crimean Peninsula for drinking and agricultural water supply. *Ecology and Industry of Russia*, 2019, vol. 23, Iss. 4, pp. 52–57.
73. Novikov D.A., Chernykh A.V., Dultsev F.F., Ses K.V. Gidrogeologiya i gidrogeokhimiya Krymskogo poluostrova v svete problemy pit'yevogo vodosnabzheniya [Hydrogeology and hydrogeochemistry of the Crimean peninsula in the light of the problem of drinking water supply]. *Podzemnye vody Vostoka Rossii: Materialy Vserossiyskogo soveshchaniya po podzemnym vodam Vostoka Rossii (XXII Soveshchanie po podzemnym vodam Sibiri i Dalnego Vostoka s mezhdunarodnym uchastiyem)* [Underground waters of the East of Russia: Materials of the All-Russian meeting on the underground waters of the East of Russia (XXII Meeting on underground waters of Siberia and the Far East with international participation)]. Novosibirsk, IPGG SB RAS, 2018. pp. 339–346.

Received: 20 November 2018.

Information about the authors

Dmitry A. Novikov, Cand. Sc., head of the laboratory of sedimentary basins hydrogeology of Siberia, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; associate professor, Novosibirsk State University.

Anatoliy V. Chernykh, junior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

Fedor F. Dultsev, junior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

УДК 544.526.2

ЭКСИЛАМПЫ КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ИСТОЧНИК УФ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ФОТОХИМИЧЕСКОГО ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ МЫШЬЯКСОДЕРЖАЩИХ ВОД

Цыбикова Бэлэгма Амоголоновна¹,
belegmats@mail.ru

Батоева Агния Александровна¹,
abat@binm.ru

¹ Байкальский институт природопользования СО РАН,
Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью решения проблемы поступления в водные объекты токсичных веществ, в том числе соединений мышьяка, путем поиска и разработки эффективных фотохимических методов очистки и обезвреживания мышьяксодержащих растворов с использованием экологически чистых окислителей и современных безртутных источников УФ-излучения.

Цель: изучить возможности использования эксилампы для обезвреживания As-содержащих вод и установить закономерности фотохимической активации окисления мышьяка пероксидом водорода с использованием безртутного источника квазимонохроматического излучения KCl-эксилампы.

Объекты: модельные водные растворы мышьяка (III) с концентрацией $2,7 \text{ мкмоль} \cdot \text{л}^{-1}$ ($\sim 0,2 \text{ мг/л}$), приготовленные на дистиллированной (УЭП=2 мкСм/см, pH 5,8) и водопроводной воде.

Методы: спектрофотометрическое определение ионов мышьяка (III); контроль pH потенциометрическим методом, съемка электронных спектров поглощения растворов реагирующих веществ; поглощенная мощность излучения эксилампы, определенная методом химической актинометрии с атразином; оценка доз УФ-излучения.

Результаты. Установлена принципиальная возможность использования безртутного источника квазимонохроматического излучения KCl-эксилампы (222 нм) для фотохимического окисления As(III) комбинированной системой {УФ/ H_2O_2 }. Изучены основные закономерности фотохимического окисления мышьяка (III) с использованием безртутного источника УФ-излучения – KCl-эксилампы (222 нм). Проведены сравнительные исследования эффективности прямого фотолиза и комбинированного окисления мышьяка (III) в водном растворе ультрафиолетовым излучением KCl-эксилампы в присутствии пероксида водорода. По эффективности окисления As(III) рассмотренные окислительные системы можно выстроить в ряд: {УФ/ H_2O_2 } > { H_2O_2 } > {УФ}. При комбинированной обработке {УФ/ H_2O_2 } наблюдается существенная интенсификация процесса окисления, через 10 минут остаточная концентрация мышьяка в растворе – ниже ПДК (0,01 мг/л). Также рассмотрено влияние гидрокарбонат-ионов, наиболее характерных анионов природных «водных матриц», на скорость реакции окисления As(III). Предложен ион-радикальный механизм фотохимического окисления мышьяка в комбинированной окислительной системе {УФ/ H_2O_2 } с использованием УФ-излучения KCl эксилампы.

Ключевые слова:

Мышьяк, пероксид водорода, безртутный источник УФ-излучения, KCl-эксилампа, гидрокарбонаты, комбинированные окислительные процессы.

Введение

В последнее десятилетие мировое сообщество обеспокоено проблемой поступления в водные объекты токсичных веществ, в том числе соединений мышьяка [1, 2]. Поступление данного загрязнителя в окружающую среду обусловлено как естественными (выветривание минералов и геотермальные процессы) [3–5], так и антропогенными факторами (сельское хозяйство, электроника, производство красителей, добыча и переработка упорных золото-, мышьяксодержащих руд). Учитывая опасные последствия для организма, которые, в зависимости от уровня воздействия, могут выражаться в кожных поражениях, периферической невропатии, диабете, сердечно-сосудистых и онкологических заболеваниях [6], очевидна необходимость глубокой очистки токсичных мышьяксодержащих вод.

Для очистки природных, сточных вод и технологических растворов от мышьяка применяется множество методов, наиболее широко известными

из которых являются методы адсорбции/соосаждения и окислительные методы [7–9].

В качестве адсорбционных материалов широко применяют активированные угли, смолы, гели, сорбенты на основе Si, модифицированные гидроксидами металлов (Fe^{2+} , Fe^{3+}), TiO_2 , Fe^0 (ZVI), а также шлаки, угли, полученные из сельскохозяйственных отходов, биосорбенты, гетиты и др. [7, 10, 11]. Основными достоинствами сорбционных методов являются: доступность и относительная дешевизна сорбентов, простота технологических схем процессов. Однако они не лишены недостатков, главными из которых являются: ограниченная сорбционная емкость сорбентов, требующая многократного разбавления высококонцентрированных растворов, необходимость дальнейшей регенерации сорбентов и дополнительного обезвреживания и утилизации большого количества образующихся высокотоксичных и высококонцентрированных элюатов. А также проблема по утилизации отработанного сорбционного материала.

Из окислительных методов для обезвреживания различных As-содержащих растворов чаще всего применяются те, в которых в качестве реагента окислителя используют оксид марганца (MnO_4^-), соединения «активного» хлора (Cl_2 или OCl^-), основными недостатками которых являются: токсичность самого реагента и повышение солесодержания очищенной воды. Более безопасны, на наш взгляд, методы с применением экологически безопасных окислителей – кислорода воздуха и пероксида водорода (прежде всего вследствие отсутствия вторичного загрязнения воды продуктами восстановления реагентов). При этом методы обладают существенным недостатком, к которому относится высокая длительность процесса обработки. Так, период полупревращения процесса окисления As (III) кислородом достигает от 1 до 3 лет [12], а медленное окисление мышьяка под действием пероксида водорода [13] даже при многократном избытке окислителя свидетельствует в пользу применения комбинированных окислительных процессов, так называемых «*Advanced Oxidation Processes*» (АОР) [14–16]. Суть АОР процессов заключается в жидкофазном цепном окислении загрязняющих веществ (поллютантов) генерированными *in situ* высокореакционноспособными активными формами кислорода (АФК) – гидроксильными радикалами, синглетным кислородом и другими. Среди АОР методов, интенсивно развивающихся в последнее время, наиболее перспективны фотоактивированные окислительные процессы [17].

В технологиях очистки и обезвреживания воды в качестве источников УФ излучения традиционно используются ртутные газоразрядные лампы разного давления, основным и весомым недостатком которых является высокое содержание металлической ртути (от 10 мг в лампах низкого давления и до 600 мг в лампах высокого давления) [16, 17]. В настоящее время все большее распространение получает новый класс современных безртутных источников УФ излучения (газоразрядные эксимерные и эксиплексные лампы (эксилампы), LED лампы и др.) [18]. Главные достоинства эксиламп заключаются в том, что до 80 % и более общей мощности излучения сосредоточено в узкой полосе излучения [19], они отличаются высокой энергией фотона (3,5–10 эВ) и не содержат ртути. Известны исследования по комбинированной деградации токсичных хлорорганических загрязнителей УФ излучением KrCl- (222 нм) и XeBr- (283 нм) эксиламп в присутствии пероксида водорода, свидетельствующие о высокой эффективности окислительных процессов с использованием эксиламп по сравнению с аналогичными процессами с использованием ртутных ламп, вследствие значительного повышения интенсивности генерации АФК [20–22]. Известны немногочисленные исследования по применению ультрафиолетового облучения (УФ) в сочетании с окислителями для обезврежи-

вания поллютантов неорганической природы [17, 23], в том числе As-содержащих растворов [24].

Цель данной работы: исследовать возможности использования эксиламп для обезвреживания мышьяк-содержащих вод и установить закономерности фотохимической активации окисления мышьяка пероксидом водорода с использованием современного безртутного источника квазимонохроматического излучения KrCl-эксилампы

Материалы и методика эксперимента

Объектом исследования являлись модельные водные растворы мышьяка (III) с концентрацией $2,7 \text{ мкмоль} \cdot \text{л}^{-1}$ ($\sim 0,2 \text{ мг/л}$), приготовленные на дистиллированной (УЭП=2 мкСм/см, pH 5,8) и водопроводной воде (табл. 1). Содержание ионов мышьяка (III) контролировали спектрофотометрическим методом с молибдатом аммония [25]. Величину pH контролировали на иономере pH-150 М. Электронные спектры поглощения водных растворов реагирующих веществ снимали на спектрофотометре UV-VIS Agilent 8453. В работе использовали реактивы: Na_3AsO_3 (ч.д.а), H_2O_2 (30%-й раствор), ЗАО «Химреактивснаб». Окислитель H_2O_2 вводили в реакционную смесь одновременно, при стехиометрическом молярном соотношении $[H_2O_2] - [As^{3+}]$, равном 1. Для корректировки pH растворов использовали 0,1 N растворы NaOH или H_2SO_4 .

Таблица 1. Характеристика водопроводной воды

Table 1. Characteristics of tap water

Показатель/Characteristics	Значение/Value
pH	$7,10 \pm 0,2$
Удельная электрическая проводимость, мкСм/см Specific electrical conductivity, $\mu S/cm$	236 ± 7
Общий органический углерод, мг/л Total organic carbon, mg/L	$3,3 \pm 0,9$
Жесткость, мг-экв/л/Stiffness, meq/L	$2,60 \pm 0,39$
Гидрокарбонаты, мг/л/Hydrocarbonates, mg/L	134 ± 16
Аммоний, мг/л/Ammonium, mg/L	$< 0,05$
Нитриты, мг/л/Nitrite, mg/L	$< 0,1$
Нитраты, мг/л/Nitrates, mg/L	$4,81 \pm 0,63$
Натрий, мг/л/Sodium, mg/L	$9,32 \pm 1,59$
Магний, мг/л/Magnesium, mg/L	$9,73 \pm 0,20$
Кальций, мг/л/Calcium, mg/L	$36,07 \pm 0,76$
Хлориды, мг/л/Chlorides, mg/L	$0,30 \pm 0,04$
Сульфаты, мг/л/Sulphates, mg/L	$16,58 \pm 2,16$
Железо (II), мг/л/Iron (II), mg/L	n/o/not detected

Исследования основных кинетических закономерностей фотохимического окисления As(III) проводили на лабораторной установке, которая включала последовательно расположенные по направлению движения обрабатываемой воды термостатированную емкость (усреднитель), перистальтический насос и проточный фотореактор, состоящий из трех последовательно соединенных кварцевых трубок (внешний диаметр 14 мм, внутрен-

ний диаметр 11 мм, длина трубки 100 мм), максимально приближенных к УФ-источнику ($h=5$ мм), и отражателя, выполненного из алюминиевого листа (рис. 1). Объем обрабатываемого раствора составлял 0,3 л, скорость циркуляции раствора – 0,5 л/мин, температура 25 ± 2 °С. Источник УФ-излучения – KrCl-эксилампа, излучающая при 222 нм, с полушириной спектральной полосы – 2–15 нм (ООО «Эксилампы», Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск). Поглощенная мощность излучения эксилампы, определенная методом химической актинометрии с атразином [20], составила 0,55 мВт/см². Дозы УФ-излучения определяли как произведение продолжительности облучения и интенсивности поглощенного излучения в объеме, рассчитанной с использованием интегрированной формы закона Бугера–Ламберта–Бера [26]. Потребляемую мощность электрической энергии выбранного источника контролировали с помощью измерителя Voltcraft EM-3000.

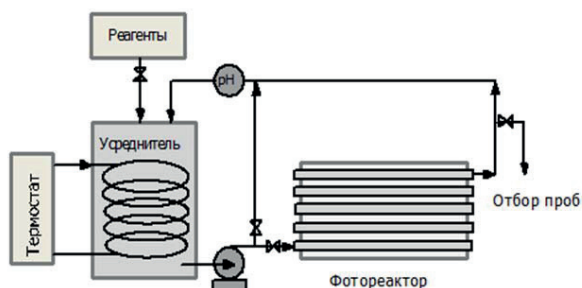


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Fig. 1. Schematic representation of the experimental setup

Результаты и их обсуждение

Предварительно оценена фотохимическая активность As(III) при прямом фотолизе. Известно, что в результате протекания первичных фотохимических процессов (фотодиссоциации, фотоактивации, внутримолекулярного окисления и фотовосстановления) при прямом фотолизе в системе генерируются высокоактивные частицы с неспаренным электроном – радикалы, участвующие во вторичных процессах окисления и деструкции загрязнителей:



Необходимо отметить, что скорость генерирования $\cdot\text{OH}$ радикалов определяется в основном свойствами источника УФ-излучения и присутствием реагентов – окислителей, являющихся прекурсорами АФК. Так, характер кинетической кривой прямого фотолиза при облучении KrCl-эксилампой (рис. 2) по сравнению с кинетической кривой, полученной с ртутной УФ-С лампой (254 нм) в аналогичных условиях [27], значительно отличается: процесс окисления As(III) под действием эксилам-

пы почти в 20 раз быстрее (начальные скорости реакции окисления As(III), рассчитанные по уравнению $W_o = dC_{\text{As}^{3+}}/dt$, составили 0,80 мкмоль·л⁻¹·мин⁻¹ и 0,04 мкмоль·л⁻¹·мин⁻¹, соответственно), а эффективность процесса через 5 минут обработки достигает 36,5 % по сравнению с 9 % при УФ-С фотолизе. При этом стоит отметить, что, несмотря на высокую степень окисления, дальнейшее увеличение продолжительности УФ обработки не приводит к существенному росту эффективности процесса, через 30 минут эффективность составила лишь 43 %, что обуславливает целесообразность применения комбинированной окислительной системы.

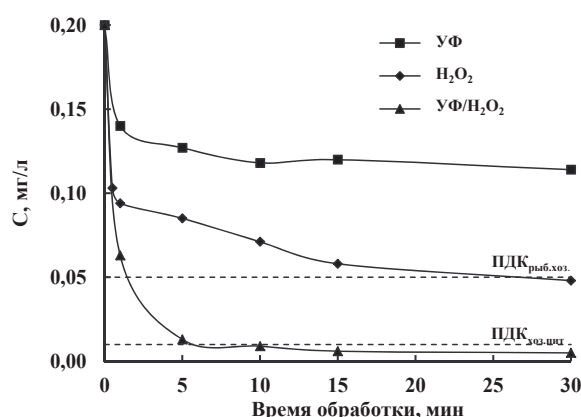


Рис. 2. Сравнительные эксперименты по окислению As(III). $[\text{As}^{3+}]_0 = 2,7$ мкмоль/л, $[\text{H}_2\text{O}_2] = 2,7$ мкмоль/л, pH 5,8

Fig. 2. Comparative experiments on As (III) oxidation. $[\text{As}^{3+}]_0 = 2,7$ μM, $[\text{H}_2\text{O}_2] = 2,7$ μM, pH 5,8

При этом следует отметить, что при окислении As(III) в темновом процессе («dark»), описываемом брутто-реакцией [15]:



несмотря на достаточно высокую начальную скорость окисления, равную 1,41 мкмоль·л⁻¹·мин⁻¹, наблюдалась дезактивация реакционной смеси в течении первых 15 минут, а дальнейшая обработка не приводила к значимому увеличению эффективности процесса (76 % через 30 минут обработки).

При облучении растворов As(III) в присутствии пероксида водорода в комбинированной окислительной системе {УФ/H₂O₂} наблюдается существенная интенсификация процесса окисления As(III), начальная скорость окисления увеличилась в 2,3 раза по сравнению с прямым фотолизом и составила 1,82 мкмоль·л⁻¹·мин⁻¹. Важно отметить, что в комбинированной системе {УФ/H₂O₂} уже через 10 мин экспозиции остаточная концентрация As(III) в растворе составила 0,009 мг/л, что соответствует нормам ПДК (0,01 мг/л) [28, 29]. По эффективности, скорости процесса окисления As(III) рассмотренные окислительные системы можно выстроить в ряд: {УФ/H₂O₂} > {H₂O₂} > {УФ}.

Дана сравнительная оценка удельной энергоэффективности процессов фотохимического окисле-

ния As(III) в различных комбинированных системах с использованием разных источников излучения (полученных результатов в сравнении с литературными данными) (табл. 2) по количеству окисленного вещества в расчете на единицу затраченной электрической энергии путем расчета удельной конверсии (Y) по представленной формуле:

$$((C_0 - C) \times V \times 1000) / (W \times \tau \times 60), \text{ мкг/кДж},$$

где C_0 – начальная концентрация мышьяка (III), мкг/л; C – концентрация мышьяка (III) после обработки, мкг/л; V – объем обрабатываемого раствора, мл; W – потребляемая мощность, Вт; τ – продолжительность процесса, мин.

Таблица 2. Сравнение различных источников УФ излучения при окислении As(III)

Table 2. Comparison of various sources of UV radiation during As(III) oxidation

Окислительная система Oxidizing system	P, W	τ , мин / min	Эффективность окисления Oxidation efficiency Ψ , %	W_0 , мкмоль·л ⁻¹ ·мин ⁻¹ μM/(L·min)	Y, мкг/кДж mkg/kJ
US/UV-254 [27]	48	60	95,5	0,04	1,67
UV-Xe/TiO ₂ [30]	300	150	80	2,90	1,0
UV-Xe/TiO ₂ /Ag/air [30]	300	60	80	6,67	2,47
UV-222/H ₂ O ₂ *	30	10	95,5	1,82	3,20

*результаты данной работы / results of this research.

При использовании широкополосного источника – ксеноновой лампы – в комбинированных системах UV-Xe/TiO₂/Ag/air и UV-Xe/TiO₂, несмотря на высокие значения начальных скоростей фотоокисления As(III) при значительной продолжительности обработки 60 и 150 мин, соответственно, эффективность окисления достигает лишь 80 %. [30]. Окисление As(III) в комбинированной окислительной системе US/UV-254 с использованием ртутной лампы также менее эффективно, при этом через 60 минут обработки конверсия достигает 95,5 % [27]. Рассмотренная нами окислительная система UV-222/H₂O₂ с применением безртутной KrCl-эксилампы по эффективности и удельной конверсии является предпочтительной.

По удельной конверсии рассмотренные комбинированные окислительные системы с различными источниками УФ излучения можно выстроить в ряд UV-222/H₂O₂ > UV-Xe/TiO₂/Ag/air > US/UV-254/H₂O₂ > UV-Xe/TiO₂.

С точки зрения энергоэффективности и экологической безопасности оптимальным источником является безртутная KrCl-эксилампа. При этом важно отметить, что коэффициент молярной экстинкции пероксида водорода резко повышается в коротковолновой области спектра и составляет при 222 нм $1,12 \cdot 10^5$ л·моль⁻¹·см⁻¹, следовательно, его фотоактивация будет происходить быстрее, вследствие чего и скорость генерации гидроксильных радикалов будет выше (рис. 3).

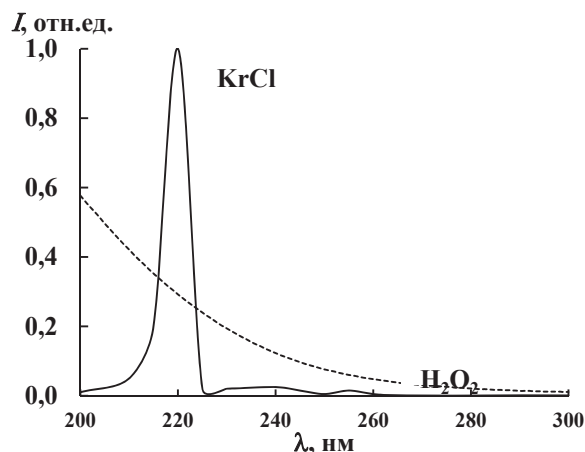
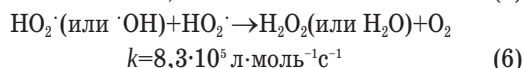
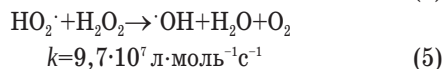
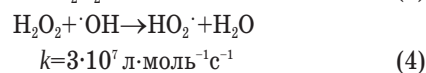


Рис. 3. Спектры поглощения пероксида водорода и излучения KrCl-эксилампы

Fig. 3. Absorption spectra of hydrogen peroxide and KrCl excilamp radiation

Значительное увеличение скорости окисления As(III) в комбинированной окислительной системе {УФ/H₂O₂} является прямым следствием участия АФК и обусловлено фотоактивацией пероксида водорода с его диспропорционированием по известному радикально-цепному механизму Габера–Вейса с образованием неселективных высокореакционно-способных гидроксильных радикалов [31, 32]:



Влияние pH среды на процесс окисления As(III)

Показатель кислотности среды является одним из ключевых параметров при реализации фотоактивированных окислительных процессов. Результаты экспериментальной серии по обработке As-содержащих модельных растворов при различных значениях pH показали, что в кислой среде (pH 3) при прямом фотоллизе окисление As(III) протекает медленно, начальная скорость составила $0,068$ мкмоль·л⁻¹·мин⁻¹, и при дозе УФ излучения, равной 1 Дж/см², окисляется лишь 18 % вещества. (рис. 4). При этом процесс в интервале 5,8–9 протекает быстрее в (11,3–14,6) раза, значения начальных скоростей составляли $0,77$ – $0,99$ мкмоль·л⁻¹·мин⁻¹, а доза УФ-излучения 1 Дж/см² соответствовала уже 43–48,5 % окисленного вещества. При этом в присутствии H₂O₂ процесс окисления As(III) значительно ускоряется при pH 3 $W_0 = 1,77$ мкмоль·л⁻¹·мин⁻¹, а при 5,8–9,0 – (1,85–2,17) мкмоль·л⁻¹·мин⁻¹. Важно отметить, что при достаточно высокой скорости и эффективности комбинированного процесса (76 %) при pH 3 наблюдали дезактивацию реакционной смеси уже в первые 5 мин, что объясняется влия-

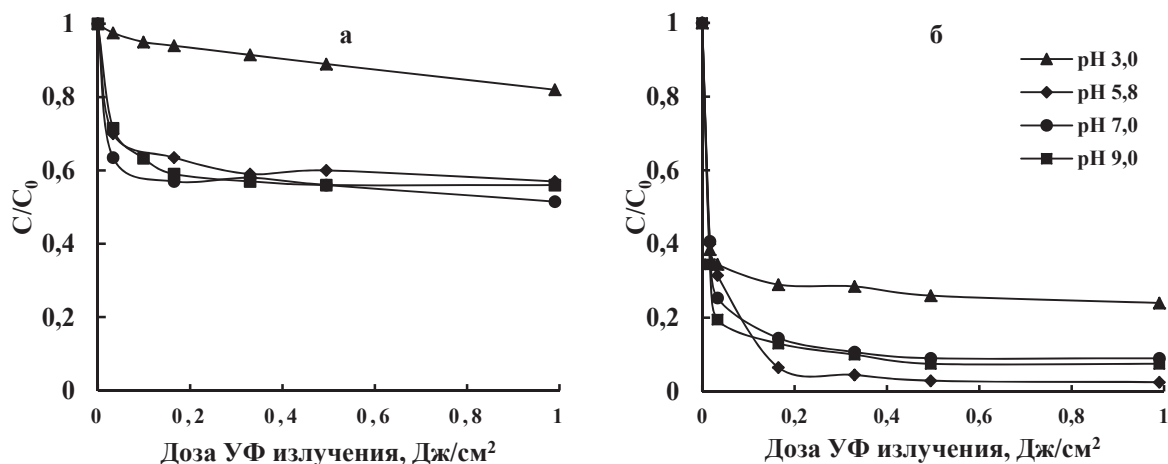


Рис. 4. Влияние pH на процесс фотохимического окисления As (III) при прямом фотолизе $\{ \text{УФ} \}$ (а) и в присутствии H_2O_2 $\{ \text{УФ}/\text{H}_2\text{O}_2 \}$ (б). $[\text{As}^{3+}]_0 = 2,7 \text{ мкмоль/л}$, $[\text{H}_2\text{O}_2] = 2,7 \text{ мкмоль/л}$

Fig. 4. Effect of pH on the photochemical oxidation of As (III) in direct photolysis (UV) (a) and in the presence of H_2O_2 $\{ \text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2 \}$ (b). $[\text{As}^{3+}]_0 = 2,7 \text{ }\mu\text{M}$, $[\text{H}_2\text{O}_2] = 2,7 \text{ }\mu\text{M}$

нием кислотности среды на скорость фоторазложения пероксида водорода и на процесс окисления различных интермедиатов. Кроме того, дозы УФ-излучения, необходимые для окисления 90 % As(III) в интервале pH 5,8–9 составляли 150–380 мДж/см². Значительное сокращение доз УФ-излучения и ускорение процесса окисления As(III) является следствием участия АФК.

Выявление роли АФК в процессе окисления As(III)

Для подтверждения участия АФК в процессе фотоокисления As (III) проведены эксперименты с использованием радикальных ловушек – трет-бутанола и изо-пропанола. Константа взаимодействия трет-бутанола с $\cdot\text{OH}$ радикалами составляет $6 \cdot 10^8 \text{ л}\cdot\text{моль}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$, а изо-пропанола – $1,9 \cdot 10^9 \text{ л}\cdot\text{моль}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$. Установлено, что введение добавок ингибирует процесс окисления As(III), через 30 минут обработки с изо-пропанолом эффективность процесса снизилась на 18,5 %, с трет-бутанолом – на 11 % (в соответствии с рис. 5). Следовательно, при фотоокислении As(III) в рассматриваемой комбинированной системе $\{ \text{УФ}/\text{H}_2\text{O}_2 \}$ в процессе окисления принимают участие гидроксильные радикалы, в соответствии с реакцией (7).

Вероятно, при фотоактивации пероксида водорода излучением эксилампы в данных экспериментальных условиях реализуется радикальный механизм окисления As(III), включающий процессы активации пероксида водорода УФ излучением с образованием гидроксильных радикалов (3).

Возможно также в рассматриваемой окислительной системе наряду с $\cdot\text{OH}$ радикалами генерирование других АФК, в частности $\text{HO}_2^{\cdot}$ и $\text{O}_2^{\cdot-}$, способных активировать пероксид водорода (5), а также рекомбинировать с образованием дополнительного количества пероксида водорода (6), фотоактивация которого увеличивает выход гидроксильных радикалов. Известно, что супероксидные ра-

дикалы $\text{O}_2^{\cdot-}$ являются наиболее долгоживущими частицами по сравнению с гидроксильными радикалами [32] и вследствие этого имеют более высокую степень растворения, чем гидроксильные радикалы, и в объёме реагируют с As(III) с образованием интермедиата As(IV), окисление которого и является лимитирующей стадией процесса. Известно, что интермедиаты As (IV), которые в зависимости от pH среды находятся в различных формах – $\text{As}^{\text{IV}}(\text{OH})_4$, $\text{As}(\text{OH})_3\text{O}^-$, $\text{HAs}^{\text{IV}}\text{O}_3^-$, $\text{As}^{\text{IV}}\text{O}_3^{2-}$ [24], далее окисляются: в кислой среде – с образованием двух продуктов, как конечного As(V), так и исходного As(III) (о чем свидетельствует дезактивация реакционной смеси при pH 3), а в слабокислой и щелочной средах (5,8–9,0) – до конечного As(V). Существование интермедиата As(IV) подтверждено методом импульсного радиолиза ранее авторами [33].

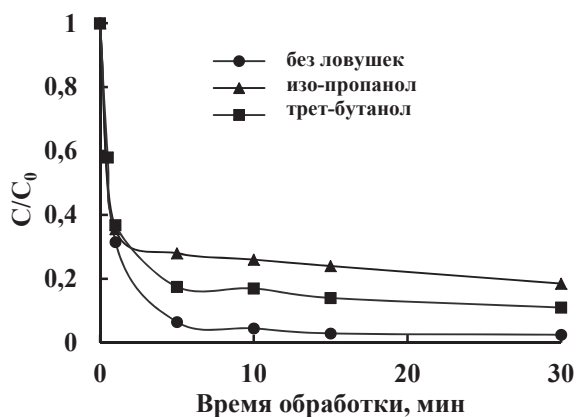
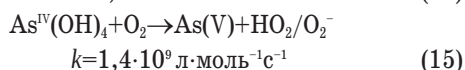
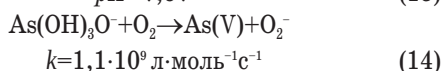
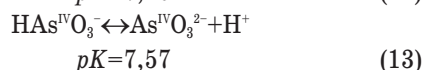
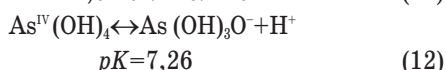
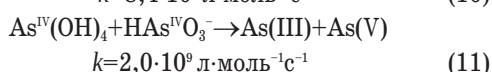
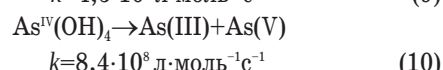
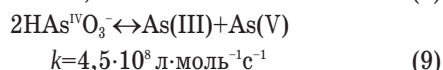
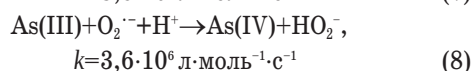
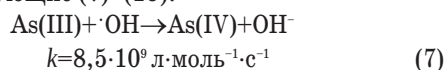


Рис. 5. Фотохимическое окисление As (III) в присутствии ловушек радикалов. $[\text{As}^{3+}]_0 = [\text{H}_2\text{O}_2]_0 = 2,7 \text{ мкмоль}\cdot\text{л}^{-1}$, $[\text{изо-пропанол}] = 1,35 \text{ ммоль/л}$, $[\text{трет-бутанол}] = 1,35 \text{ ммоль/л}$. pH 5,8

Fig. 5. Photochemical oxidation of As (III) in the presence of radical scavengers. $[\text{As}^{3+}]_0 = [\text{H}_2\text{O}_2]_0 = 2,7 \text{ }\mu\text{M}$, $[\text{iso-propanol}] = 1,35 \text{ mM}$, $[\text{tert-butanol}] = 1,35 \text{ mM}$. pH 5,8

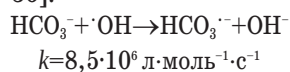
Анализ литературы и полученные экспериментальные результаты позволяют предположить, что процесс фотохимического окисления мышьяка в комбинированной окислительной системе {УФ/Н₂О₂} протекает по смешанному ион-радикальному механизму, включающему наряду с реакциями (1)–(6) следующие (7)–(15):



Влияние гидрокарбонатов на процесс окисления As (III)

Известно, что природная вода является многокомпонентной динамической системой, так называемой «водной матрицей», которая содержит в своем составе различные газы, органические и минеральные вещества, присутствие которых оказывает значительное влияние на процессы, протекающие в природных водных системах.

Наиболее часто в природных водах встречаются гидрокарбонаты, хлориды, сульфаты щелочноземельных и щелочных металлов, в меньшей мере нитраты, нитриты, силикаты, фториды, фосфаты и др. На рис. 6 представлены результаты по окислению As(III) в комбинированной системе {УФ/Н₂О₂} в присутствии гидрокарбонатов (НСО₃⁻) в концентрационном диапазоне 0–1300 мг/л. Установлено, что при концентрациях до 130 мг/л гидрокарбонат-ионы оказывают ингибирующее действие на протекание реакций в {УФ/Н₂О₂}, скорость процесса снизилась до 1,6 мкмоль·л⁻¹·мин⁻¹, а эффективность окисления As(III) на 30 %. Полагая, что ингибирующее влияние НСО₃⁻ на процесс фотохимического окисления As(III) связано с нецелевым расходом ·ОН-радикалов согласно реакции [34–36]:



Однако при десятикратном увеличении концентрации НСО₃⁻ (1300 мг/л) W₀ увеличилась до 2,23 мкмоль·л⁻¹·мин⁻¹ и уже после 15 минут обработки наблюдалось полное окисление мышьяка (III).

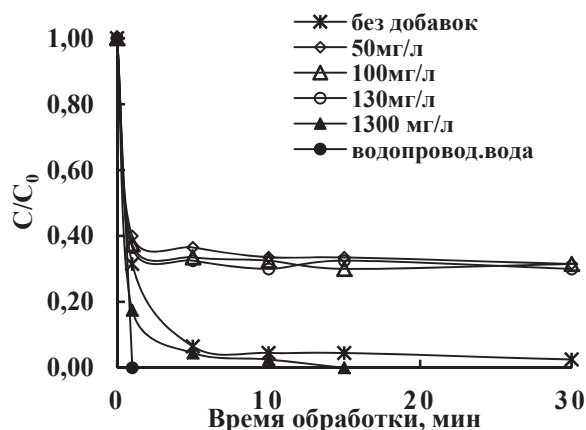


Рис. 6. Влияние гидрокарбонат-ионов на процесс фотохимического окисления As(III). [As³⁺]₀ = [H₂O₂]₀ = 2,7 мкмоль/л

Fig. 6. Influence of hydrocarbonate ions on As (III) photochemical oxidation. [As³⁺]₀ = [H₂O₂]₀ = 2,7 μM/L

Промотирующее влияние высоких концентраций НСО₃⁻ и сокращение времени обработки обусловлено подщелачиванием обрабатываемого раствора (pH ≥ 9), созданием условий для ускорения процесса депротонирования Н₂О₂. Неожиданные результаты получены при комбинированной {УФ/Н₂О₂} обработке As-содержащего модельного раствора, приготовленного на водопроводной воде (табл. 1), скорость процесса окисления As(III) увеличилась в 1,5 раза, и уже в первую минуту достигается полное окисление «таргетного» загрязнителя. Вероятно, более эффективное окисление мышьяка в водопроводной воде обусловлено как протеканием фотохимических процессов в обрабатываемой воде с образованием различных АФК, фотоактивацией пероксида водорода, так и увеличением удельной электропроводности водопроводной воды вследствие содержания в ней различных солей, способствующих увеличению степени диспропорционирования пероксида водорода. Наряду с этим возможно участие растворенного органического вещества, которое способно фотоиндуцировать превращения экотоксикантов [37] в качестве фотосенсибилизатора.

Выводы

Изучены основные кинетические закономерности процесса фотохимического окисления токсичных соединений As (III) в комбинированной окислительной системе, базирующейся на использовании генерируемых *in situ* активных форм кислорода при воздействии монохроматического УФ-С излучения KrCl-эксилампы.

Установлено, что при обработке в комбинированной окислительной системе {УФ/Н₂О₂} наблюдается существенная интенсификация процесса окисления As(III), при этом уже через 10 минут остаточная концентрация загрязнителя в растворе ниже норм ПДК (0,01 мг/л). По эффективности, скорости процесса окисления As(III) рассмотренные окислительные системы можно выстроить в

ряд $\{УФ/H_2O_2\} > \{H_2O_2\} > \{УФ\}$. Установлено, что оптимальные условия окисления As(III) реализуются при pH 5,8–9, при стехиометрическом молярном соотношении $[H_2O_2] - [As^{3+}]$, равном 1. При этом дозы УФ излучения, необходимые для окисления 90 % As(III), составили 150–380 мДж/см².

Предложен смешанный ион-радикальный механизм фотохимического окисления мышьяка (III) с использованием УФ-С излучения KrCl-эксилампы в присутствии пероксида водорода, заключающийся в окислении мышьяка АФК преимущественно гидроксильными и супероксидными радикалами и последующем окислении интермедиатов растворенным кислородом. При этом лимитирую-

щей стадией всего процесса является окисление интермедиата As(IV).

Выявлено, что HCO_3^- в концентрациях до 130 мг/л, наиболее характерные анионы природных «водных матриц», оказывают ингибирующее действие на протекание реакций в комбинированном процессе.

Полученные результаты свидетельствуют о принципиальной возможности реализации процесса полного окисления As(III) с использованием энергоэффективного источника оптического излучения KrCl-эксилампы (222 нм) для очистки мышьяксодержащих природных и сточных вод.

Работа выполнена в рамках государственного задания БИП СО РАН № 007-00207-18-00.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Smedley P.L., Kinniburgh D.G. A review of the source, behavior and distribution of arsenic in natural waters // *Applied Geochemistry*. – 2002. – V. 17. – № 5. – P. 517–568.
2. Multiple inorganic toxic substances contaminating the groundwater of Myingyan Township, Myanmar: Arsenic, manganese, fluoride, iron, and uranium / T. Bacquart, S. Frisbie, E. Mitchell, L. Grigg, C. Cole, C. Small, B. Sarkar // *Science of the Total Environment*. – 2015. – V. 517. – P. 232–245.
3. Current status of arsenic contamination in drinking water and treatment practice in some rural areas of west Bengal, India / J.N. Bhakta, S. Ranaa, J. Janaa, S.K. Baga, S. Lahiria, B.B. Janaa, F. Panninge, L. Fechterd // *Journal of Water Chemistry and Technology*. – 2016. – V. 38. – № 6. – P. 366–373.
4. Arsenic speciation and uranium concentrations in drinking water supply wells in Northern Greece: Correlations with redox indicative parameters and implications for groundwater treatment / I.A. Katsoyiannis, S.J. Hug, A. Ammann, A. Zikoudi, C. Hatziliontos // *Science of the Total Environment*. – 2007. – V. 383. – P. 128–140.
5. Avoiding high concentrations of arsenic, manganese and salinity in deep tubewells in Munshiganj District, Bangladesh / S.J. Hug, D. Gaertnera, L.C. Robertsa, M. Schirmer, T. Ruettimann, T.M. Rosenbergb, A.B.M. Badruzzamanc, A.M. Ali // *Applied Geochemistry*. – 2011. – V. 26. – P. 1077–1085.
6. Prevalence of high arsenic concentration in Darbhanga district of Bihar: Health assessment / A. Abhinav, S. Navin, A. Kumar, R. Kumar, M. Ali, S.K. Verma, A.K. Ghosh // *Journal of Environmental and Analytical Toxicology*. – 2016. – V. 6. – № 6. – P. 1–7.
7. Mohan D., Pittman Ch.U. Jr. Arsenic removal from water/wastewater using adsorbents – a critical review // *Journal of Hazardous Materials*. – 2007. – V. 142. – P. 1–53.
8. Коваленко К.А., Бочкарев Г.Р., Пушкарева Г.И. Марганцевые руды как перспективный сорбент для удаления соединений мышьяка из подземных вод // *Вода: Химия и экология*. – 2013. – № 10. – С. 80–84.
9. Arsenic (III) remediation from contaminated water by oxidation and Fe/Al co-precipitation / W. Zhang, P. Singh, T.B. Issa, W. Zhang // *Journal of Water Resource and Protection*. – 2011. – № 3. – P. 655–660.
10. Removal of arsenic (III) and arsenic (V) from aqueous medium using chitosan-coated biosorbent / V.M. Boddu, K. Abburi, J.L. Talbott, E.D. Smith, R. Haasch // *Water Research*. – 2008. – V. 42. – P. 633–642.
11. Iron oxide-modified nanoporous geopolymers for arsenic removal from ground water / D. Medpelli, R. Sandoval, L. Sherrill, K. Hristovski, D.-K. Seo // *Resource-Efficient Technologies*. – 2015. – V. 1. – № 1. – P. 19–27.
12. Eary L.E., Schramke J.A. Rates of Inorganic Oxidation Reactions Involving Dissolved Oxygen // *Chemical Modeling of Aqueous Systems II. American Chemical Society Symposium Series*, 1990. – V. 416. – № 30. – P. 379–396.
13. Pettine M., Campanella L., Millello F.J. Arsenite oxidation by H_2O_2 in aqueous solutions // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1999. – V. 63. – № 18. – P. 2727–2735.
14. Deng Y., Zhao R. Advanced oxidation processes (AOPs) in wastewater treatment // *Current Pollution Reports*. – 2015. – V. 1. – P. 167–176.
15. Hug S.J., Leupin O. Iron-catalyzed oxidation of arsenic (III) by oxygen and by hydrogen peroxide: pH-dependent formation of oxidants in the Fenton reaction // *Environmental Science and Technology*. – 2003. – V. 37. – P. 2734–2742.
16. Katsoyiannis I.A., Ruettiman T., Hug S.J. Ph Dependence of Fenton Reagent generation and As (III) oxidation and removal by corrosion of Zero valent iron in aerated water // *Environmental Science and Technology*. – 2008. – V. 42. – P. 7424–7430.
17. Comparing the efficacy of VUV and UVC/ $S_2O_8^{2-}$ advanced oxidation processes for degradation and mineralization of cyanide in wastewater / G. Moussavi, M. Pourakbar, E. Aghayani, M. Mahdavianpour, S. Shekoohyian // *Chemical Engineering Journal*. – 2016. – V. 294. – P. 273–280.
18. Ультрафиолетовые и вакуумно-ультрафиолетовые эксилампы: физика, техника и применения / А.М. Бойченко, М.И. Ломачев, А.Н. Панченко, Э.А. Соснин, В.Ф. Тарасенко. – Томск: Изд-во STT, 2011. – 512 с.
19. Sosnin E.A., Oppenländer T., Tarasenko V.F. Applications of capacitive and barrier discharge excilamps in photoscience // *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*. – 2006. – № 7. – P. 145–163.
20. Canonica S., Meunier L., Von Gunten U. Phototransformation of selected pharmaceuticals during UV treatment of drinking water // *Water Research*. – 2008. – V. 42. – P. 121–128.
21. Комбинированный метод деградации хлорфенолов / Г.Г. Матафонова, В.Б. Батоев, Э.А. Соснин, N. Christofi // *Химия в интересах устойчивого развития*. – 2008. – Т. 16. – С. 191–197.
22. Матафонова Г.Г., Батоев В.Б. Деструкция карбамазепина в воде ультрафиолетовым излучением эксилампы // *Вода: химия и экология*. – 2013. – № 9. – С. 87–92.
23. Monitoring of TiO_2 -catalytic UV-LED photo-oxidation of cyanide contained in mine wastewater and leachate / S.H. Kim, S.W. Lee, G.M. Lee, B.T. Lee, S.T. Yun, S.O. Kim // *Chemosphere*. – 2016. – V. 143. – № 1. – P. 106–114.
24. Photocatalytic oxidation of arsenic (III) evidence of hydroxyl radicals / P.K. Dutta, S.O. Pehkonen, V.K. Sharma, A.K. Ray // *Environmental Science and Technology*. – 2005. – V. 39. – P. 1827–1834.
25. ГОСТ 4152–89. Вода питьевая. Метод определения массовой концентрации мышьяка. – Введ. 1991–01–01. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 1991. – С. 473–479.

26. Christensen J., Linden K.G. How particles affect UV lighting the UV disinfection of unfiltered drinking water // *Journal of the American Water Works Association*. – 2003. – № 95. – P. 179–189.
27. Arsenite oxidation by ultrasound combined with ultraviolet in aqueous solution / S. Lee, M. Cui, S. Na, J. Kim // *Japanese Journal of Applied Physics*. – 2012. – V. 51. – 07GD15.
28. Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения. Приказ Минсельхоза России, 13 декабря 2016, № 552.
29. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. Гигиенические нормативы ГН 2.1.5.1315–03. (с изм. на 13.07.2017 г.). – М.: Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. URL: <http://docs.cntd.ru/document/901862249> (дата обращения 15.04.2019).
30. Ryu J., Choi W. Photocatalytic oxidation of Arsenite on TiO_2 : understanding the controversial oxidation mechanism involving superoxides and effect of alternative electron acceptors // *Environmental Science and Technology*. – 2006. – V. 40. – P. 7034–7039.
31. Baxendale J.H., Wilson J.A. The photolysis of hydrogen peroxide at high light intensities // *Transactions of the Faraday Society*. – 1957. – V. 53. – № 411. – P. 344–356.
32. Glaze W.H., Kang J.-W., Chapin D.H. The chemistry of water treatment processes involving ozone, hydrogen peroxide and ultraviolet radiation // *Ozone: Science and engineering*. – 1987. – V. 9. – P. 335–352.
33. Klaning U.K., Bielski B.H.J., Sehested K. Arsenic (IV). A pulse-radiolysis study // *Inorganic Chemistry*. – 1989. – V. 28. – P. 2717–2724.
34. Critical review of rate constants for reactions of hydrated electrons, hydrogen atoms and hydroxyl radicals in aqueous solution / G.V. Buxton, C.L. Greenstock, W.P. Helman, A.B. Ross // *Journal of Physical and Chemical Reference Data*. – 1988. – V. 17. – P. 513–886.
35. Effect of $\text{HO}^\cdot$, and $\text{SO}_4^{\cdot-}$ and $\text{CO}_3^{\cdot-}/\text{HCO}_3^\cdot$ radicals on the photodegradation of the herbicide amitrole by UV radiation in aqueous solution / F. Orellana-Garcia, M.A. Álvarez, M.V. López-Ramón, J. Rivera-Utrilla, M. Sánchez-Polo // *Chemical Engineering Journal*. – 2015. – V. 267. – P. 182–190.
36. Lutze H.V., Kerlin N., Schmidt T.C. Sulfate radical-based water treatment in presence of chloride: Formation of chlorate, interconversion of sulfate radicals into hydroxyl radicals and influence of bicarbonate // *Water Research*. – 2015. – V. 72. – P. 349–360.
37. Sokolova I.V., Tchaikovskaya O.N. Fluorescence and photochemical properties of humic acids // *Atmospheric and Oceanic optics*. – 2006. – V. 19. – № 02–03. – P. 220–222.

Поступила 29.04.2019 г.

Информация об авторах

Цыбикова Б.А., кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории инженерной экологии Байкальского института природопользования СО РАН.

Батоева А.А., доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией инженерной экологии Байкальского института природопользования СО РАН.

UDC 544.526.2

EXCILAMPS AS A PERSPECTIVE SOURCE OF UV RADIATION FOR PHOTOCHEMICAL DETOXIFICATION OF ARSENIC CONTAINING WATERS

Belegma A. Tsybikova¹,
belegmats@mail.ru

Agniya A. Batoeva¹,
abat@binm.ru

¹ Baikal Institute of Nature Management SB RAS,
6, Sakhyanova street, Ulan-Ude, 670047, Russia.

The relevance of the research is determined by the need to solve the problem of toxic substances, including arsenic compounds, entry into water bodies, by searching for and developing effective photochemical methods for cleaning and neutralizing arsenic-containing solutions using environmentally friendly oxidants and modern mercury-free sources of UV-radiation.

The main aim of the research is to study the possibilities of using excilamps for neutralizing As-containing waters and to establish the regularities of photochemical activation of arsenic oxidation by hydrogen peroxide using a mercury-free source of quasi-monochromatic radiation from the KrCl excilamp.

Objects: model aqueous solutions of arsenic (III) with a concentration of $2,7 \mu\text{M}$ ($\sim 0,2 \text{ mg/L}$), prepared on distilled water ($\text{UEP}=2 \mu\text{S/cm}$, pH 5,8) and tap water.

Methods: spectrophotometric determination of arsenic (III) ions; pH control by potentiometric method, shooting of electronic absorption spectra of solutions of reacting substances; determination of absorbed emission power of the excilamp by the method of chemical actinometry with atrazine; evaluation of doses of UV-radiation.

Results. The authors have established the principal possibility of using the mercury-free source of quasi-monochromatic radiation of the KrCl excilamp (222 nm) for photochemical oxidation of As(III) by the oxidation system $\{\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2\}$. They studied the main regularities of photochemical oxidation of arsenic (III) using the mercury-free UV source KrCl-excilamp (222 nm) and carried out the comparative studies of the efficiency of direct photolysis and combined oxidation of arsenic (III) in aqueous solution with ultraviolet radiation of the KrCl excilamp in the presence of hydrogen peroxide. According to the efficiency of As (III) oxidation the considered oxidation systems may be arranged as $\{\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2\} > \{\text{H}_2\text{O}_2\} > \{\text{UV}\}$. At the combined treatment of $\{\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2\}$ the significant intensification of oxidation is observed, after 10 minutes the residual arsenic concentration in the solution is below the MPC ($0,01 \text{ mg/l}$). The paper considers as well the effect of hydrocarbonate ions, being the most characteristic anions of natural «water matrices», on the oxidation rate of As(III). The authors proposed the ion-radical mechanism of arsenic photochemical oxidation in a combined oxidation system $\{\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2\}$ using the UV-radiation of the KrCl excilamp.

Key words:

Arsenic, hydrogen peroxide, mercury-free source of UV radiation, KrCl-excilamp, hydrocarbonates, combined oxidation processes.

The research was carried out within the State Task of Baikal Institute of Nature Management SB RAS no. 007–00207–18–00.

REFERENCES

1. Smedley P.L., Kinniburgh D.G. A review of the source, behavior and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, 2002, vol. 17, no. 5, pp. 517–568.
2. Bacquart T., Frisbie S., Mitchell E., Grigg L., Cole C., Small C., Sarkar B. Multiple inorganic toxic substances contaminating the groundwater of Myingyan Township, Myanmar: Arsenic, manganese, fluoride, iron, and uranium. *Science of the Total Environment*, 2015, vol. 517, pp. 232–245.
3. Bhakta J.N., Rana S., Jana J., Baga S.K., Lahiri S., Jana B.B., Pannig F., Fechter L. Current status of arsenic contamination in drinking water and treatment practice in some rural areas of west Bengal, India. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 2016, vol. 38, no. 6, pp. 366–373.
4. Katsoyiannis I.A., Hug S.J., Ammann A., Zikoudi A., Hatziliontos C. Arsenic speciation and uranium concentrations in drinking water supply wells in Northern Greece: Correlations with redox indicative parameters and implications for groundwater treatment. *Science of the Total Environment*, 2007, vol. 383, pp. 128–140.
5. Hug S.J., Gaertner D., Roberts L.C., Schirmer M., Ruettimann T., Rosenberg T.M., Badruzzaman A.B.M., Ali A.M. Avoiding high concentrations of arsenic, manganese and salinity in deep tubewells in Munshiganj District, Bangladesh. *Applied Geochemistry*, 2011, vol. 26, pp. 1077–1085.
6. Abhinav A., Navin S., Kumar A., Kumar R., Ali M., Verma S.K., Ghosh A.K. Prevalence of high arsenic concentration in Darbhanga district of Bihar: Health assessment. *Journal of Environmental and Analytical Toxicology*, 2016, vol. 6, no. 6, pp. 1–7.
7. Mohan D., Pittman Ch.U. Jr. Arsenic removal from water/wastewater using adsorbents – a critical review. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, vol. 142, pp. 1–53.
8. Kovalenko K.A., Botchkarev G.R., Pushkareva G.I. Manganese ores as a promising sorbent for the removal of arsenic compounds from groundwater. *Water: Chemistry and Ecology*, 2013, no. 10, pp. 80–84. In Rus.
9. Zhang W., Singh P., Issa T.B., Zhang W. Arsenic (III) remediation from contaminated water by oxidation and Fe/Al co-precipitation. *Journal of Water Resource and Protection*, 2011, no. 3, pp. 655–660.
10. Boddu V.M., Abburi K., Talbott J.L., Smith E.D., Haasch R. Removal of arsenic (III) and arsenic (V) from aqueous medium using chitosan-coated biosorbent. *Water Research*, 2008, vol. 42, pp. 633–642.
11. Medpelli D., Sandoval R., Sherrill L., Hristovski K., Seo D.-K. Iron oxide-modified nanoporous geopolymers for arsenic removal

- from ground water. *Resource-Efficient Technologies*, 2015, vol. 1, no. 1, pp. 19–27.
12. Eary L.E., Schramke J.A. Rates of Inorganic Oxidation Reactions Involving Dissolved Oxygen. *Chemical Modeling of Aqueous Systems II. American Chemical Society Symposium Series*, 1990, vol. 416, no. 30, pp. 379–396.
 13. Pettine M., Campanella L., Millello F.J. Arsenite oxidation by H_2O_2 in aqueous solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, vol. 63, no. 18, pp. 2727–2735.
 14. Deng Y., Zhao R. Advanced oxidation processes (AOPs) in wastewater treatment. *Current Pollution Reports*, 2015, vol. 1, pp. 167–176.
 15. Hug S.J., Leupin O. Iron-catalyzed oxidation of arsenic (III) by oxygen and by hydrogen peroxide: pH-dependent formation of oxidants in the Fenton reaction. *Environmental Science and Technology*, 2003, vol. 37, pp. 2734–2742.
 16. Katsoyiannis I.A., Ruettiman T., Hug S.J. Ph Dependence of Fenton Reagent generation and As (III) oxidation and removal by corrosion of Zero valent iron in aerated water. *Environmental Science and Technology*, 2008, vol. 42, pp. 7424–7430.
 17. Moussavi G., Pourakbar M., Aghayani E., Mahdavianpour M., Shekoohyian S. Comparing the efficacy of VUV and UVC/ $S_2O_8^{2-}$ advanced oxidation processes for degradation and mineralization of cyanide in wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 2016, vol. 294, pp. 273–280.
 18. Boychenko A.M., Lomaev M.I., Panchenko A.N., Sosnin E.A., Tarasenko V.F. *Ultrafioletovye i vakuumno-ultrafioletovye eksilampy: fizika, tekhnika i primeneniya* [Ultraviolet and vacuum-ultraviolet excilamps: physics, engineering and applications]. Tomsk, STT Publ., 2011. 512 p.
 19. Sosnin E.A., Oppenländer T., Tarasenko V.F. Applications of capacitive and barrier discharge excilamps in photoscience. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 2006, no. 7, pp. 145–163.
 20. Canonica S., Meunier L., Von Gunten U. Phototransformation of selected pharmaceuticals during UV treatment of drinking water. *Water Research*, 2008, vol. 42, pp. 121–128.
 21. Matafonova G.G., Batoyev V.B., Sosnin E.A., Christofi N. Combined method of degradation of chlorophenols. *Chemistry for Sustainable Development*, 2008, vol. 16, pp. 191–197. In Rus.
 22. Matafonova G.G., Batoyev V.B. Destruction of carbamazepine in water by ultraviolet radiation of the excilamps. *Water: Chemistry and Ecology*, 2013, no. 9, pp. 87–92. In Rus.
 23. Kim S.H., Lee S.W., Lee G.M., Lee B.T., Yun S.T., Kim S.O. Monitoring of TiO_2 -catalytic UV-LED photo-oxidation of cyanide contained in mine wastewater and leachate. *Chemosphere*, 2016, vol. 143, no. 1, pp. 106–114.
 24. Dutta P.K., Pehkonen S.O., Sharma V.K., Ray A.K. Photocatalytic oxidation of arsenic (III) evidence of hydroxyl radicals. *Environmental Science and Technology*, 2005, vol. 39, pp. 1827–1834.
 25. GOST 4152–89. *Voda pit'yevaya. Metod opredeleniya massovoy kontsentratsii mysh'yaka* [State Standard 4152–89. Drinking water. Method for determination of arsenic mass concentration]. Moscow, Standartinform Publ., 1991. pp. 473–479.
 26. Christensen J., Linden K.G. How particles affect UV lighting the UV disinfection of unfiltered drinking water. *Journal of the American Water Works Association*, 2003, no. 95, pp. 179–189.
 27. Lee S., Cui M., Na S., Khim J. Arsenite oxidation by ultrasound combined with ultraviolet in aqueous solution. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2012, vol. 51, 07GD15.
 28. *Normativy kachestva vody vodnykh ob'yektov rybkhozyaystvennogo znacheniya* [Water quality standards for water bodies of fisheries value. Order of the Ministry of Agriculture of Russia, December 13, 2016, № 552.]. Order of the Ministry of Agriculture of Russia, December 13, 2016. no. 552.
 29. *Predelno dopustimye kontsentratsii (PDK) khimicheskikh veshchestv v vode vodnykh ob'yektov khozyaystvenno-pitevogo i kulturno-bytovogo vodopolzovaniya* [Maximum permissible concentration (MPC) of chemical substances in water of water objects of domestic and drinking water and cultural and domestic water use]. Hygienic standards GN 2.1.5.1315–03 (as amended on 07/13/2017) [Electronic resource]. Moscow, Electronic fund of legal and regulatory technical documentation. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/901862249> (accessed 15 April 2019).
 30. Ryu J., Choi W. Photocatalytic oxidation of Arsenite on TiO_2 : understanding the controversial oxidation mechanism involving superoxides and effect of alternative electron acceptors. *Environmental Science and Technology*, 2006, vol. 40, pp. 7034–7039.
 31. Baxendale J.H., Wilson J.A. The photolysis of hydrogen peroxide at high light intensities. *Transactions of the Faraday Society*, 1957, vol. 53, no. 411, pp. 344–356.
 32. Glaze W.H., Kang J.-W., Chapin D.H. The chemistry of water treatment processes involving ozone, hydrogen peroxide and ultraviolet radiation. *Ozone: Science and engineering*, 1987, vol. 9, pp. 335–352.
 33. Klaning U.K., Bielski B.H.J., Sehested K. Arsenic (IV). A pulse-radiolysis study. *Inorganic Chemistry*, 1989, vol. 28, pp. 2717–2724.
 34. Buxton G.V., Greenstock C.L., Helman W.P., Ross A.B. Critical review of rate constants for reactions of hydrated electrons, hydrogen atoms and hydroxyl radicals in aqueous solution. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1988, vol. 17, pp. 513–886.
 35. Orellana-Garcia F., Álvarez M.A., López-Ramón M.V., Rivera-Utrilla J., Sánchez-Polo M. Effect of $HO\cdot$ and $SO_4^{\cdot-}$ and $CO_3^{\cdot-}/HCO_3^{\cdot-}$ radicals on the photodegradation of the herbicide amitrole by UV radiation in aqueous solution. *Chemical Engineering Journal*, 2015, vol. 267, pp. 182–190.
 36. Lutze H.V., Kerlin N., Schmidt T.C. Sulfate radical-based water treatment in presence of chloride: Formation of chlorate, interconversion of sulfate radicals into hydroxyl radicals and influence of bicarbonate. *Water Research*, 2015, vol. 72, pp. 349–360.
 37. Sokolova I.V., Tchaikovskaya O.N. Fluorescence and photochemical properties of humic acids. *Atmospheric and Oceanic optics*, 2006, vol. 19, no. 02–03, pp. 220–222.

Received: 29 April 2019.

Information about the authors

Belegma A. Tsybikova, Cand. Sc., researcher, Baikal Institute of Nature Management SB RAS.

Agniya A. Batoeva, Dr. Sc., associate professor, head of the Laboratory, Baikal Institute of Nature Management SB RAS.

УДК 528.004

ОРГАНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ЗЕМЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ НОВОСИБИРСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Карпик Александр Петрович¹,
rektorat@ssga.ru

Аврунев Евгений Ильич¹,
avrynev_ei@ngs.ru

Добротворская Надежда Ивановна¹,
dobrotvorskaya@mail.ru

Дубровский Алексей Викторович¹,
avd5@mail.ru

Малыгина Олеся Игоревна¹,
131379@mail.ru

Попов Виктор Константинович²

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
Россия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10.

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

Актуальность исследования обоснована тем, что современная организация объектов инфраструктуры промышленных и хозяйственных комплексов должна быть безопасна, экологически и экономически эффективна. Поставлена проблема организации системы рационального использования и контроля состояния водохранилищ с применением геотехнологий и систем дистанционного зондирования Земли. В качестве объекта исследования рассматривается территория Новосибирского водохранилища – техногенного природно-территориального комплекса. На исследуемой территории водохранилища отмечается ухудшение экологической ситуации в результате прогрессирующей ветро-волновой эрозии береговой линии и интенсивного смыва в воду почвы, растений, деревьев, химических сельскохозяйственных удобрений и т. д. По данным дистанционного зондирования Земли определены скорости эрозии почв на всем протяжении береговой линии водохранилища. На основании проведенных почвенных обследований и типизации почв составлена прогнозная модель разрушения береговой линии. Установлены участки геодинамического мониторинга и определена периодичность наблюдений. Сделаны выводы о необходимости проведения берегоукрепительных работ, а также более широкого вовлечения территории водохранилища в рекреационное использование.

Цель: разработать систему геоинформационного мониторинга состояния земельных ресурсов прибрежной зоны водохранилища на примере территории Новосибирского водохранилища.

Объекты: земельные ресурсы прибрежной территории Новосибирского водохранилища.

Методы. При решении поставленных задач использовались как общие методы исследования (системный анализ, синтез, наблюдение, сравнение, измерение, обобщение), так и специальные методы исследования (мониторинг состояния земель и окружающей природной среды с использованием данных дистанционного зондирования Земли, методы цифровой картографии и геоинформационного анализа и моделирования).

Результаты. Разработана технологическая схема организации системы геоинформационного мониторинга техногенного природно-территориального комплекса – водохранилища. Построена прогнозная градиентная модель скоростей смещения береговой линии водохранилища. На основании анализа данной модели определен перечень объектов недвижимости, которые будут разрушены в результате прогрессирующей ветро-волновой эрозии.

Ключевые слова:

Спутниковые методы мониторинга, техногенные природно-территориальные комплексы, земельные ресурсы, беспилотные летательные аппараты, цифровая экономика, водные объекты.

Введение

В настоящее время перед человечеством стоит ряд глобальных проблем, из которых можно выделить пять наиболее актуальных, таких как: социальная, экологическая, продовольственная, энергетическая, водная. Решение первых четырех невозможно без решения водной проблемы. Поскольку современное состояние водных объектов ухудшается с каждым годом, и данная ситуация

вселяет опасение за будущее человечества, ученые многих стран мира считают главной проблему обеспечения водой населения и хозяйства. На нашей планете создание искусственных водохранилищ привело к изменению природных свойств территории на площади более 700 тыс. км². При этом инфраструктурные изменения коснулись территории более 1,5 млн км² [1]. В первую очередь это связано с интенсивным строительством объектов

недвижимости на прилегающих к водохранилищам территориях и миграцией населения.

Также актуальность темы исследования подчеркивается и тем фактом, что в средствах массовой информации в последнее время возросла критика водохозяйственных мероприятий, связанных с созданием и эксплуатацией водохранилищ. Результаты такого антропогенного вмешательства в естественные водные системы вызывает существенные экологические изменения на территории водосборной площади. Часто строительство водохранилищ приводит к снижению качества воды в результате попадания загрязняющих веществ. Загрязнителями могут выступать как сельскохозяйственные и промышленные стоки, так и естественные загрязнители воды, образующиеся в результате разрушения береговой линии. Все перечисленные негативные факторы в совокупности с затоплением огромных площадей при строительстве водохранилищ приводят к сокращению земельных ресурсов и ухудшению их качества.

Особенно остро эти проблемы проявляются на водохранилищах равнинного типа, к которым относится Новосибирское водохранилище, представленное на рис. 1 [1–3].

В качестве одного из решений перечисленных выше проблем специалистами-экологами предлагается снижение подпорных отметок или же в некоторых случаях даже полный спуск водохранилищ [2]. Подобные сценарии являются крайне нежелательными, так как сложившаяся вокруг водохранилищ инфраструктура, а также сформированные объекты недвижимости могут существенно изменить свои характеристики, в том числе и кадастровую стоимость. В связи с этим актуальным является решение задачи организации системы мониторинга состояния земельных ресурсов прибрежной зоны водохранилищ с использованием геотехнологий и беспилотных аэрофотосъемочных систем. В результате будут определены участки береговой линии, подверженные ветро-волновой эрозии, а также составлена модель дальнейшего прогрессирующего негативных эрозионных процессов.

Использование земельных ресурсов для ведения хозяйственной деятельности должно быть не только экономически эффективным, но и экологически целесообразным. При современных уровнях техногенной трансформации естественных ландшафтов и перестройке природных систем в результате промышленного и хозяйственного освоения территорий уже невозможно найти отдельный земельный участок, не испытывающий антропогенного воздействия. В этих условиях актуальным является разработка экологически-ориентированного рационального подхода к природопользованию на землях, занятых крупными промышленно-хозяйственными образованиями – техногенными природно-территориальными комплексами (ТПТК).

Водохранилища являются сложными гидротехническими сооружениями, которые кроме своих непосредственных функций, могут решать еще ряд задач, связанных с обеспечением населения рекреационными ресурсами. Во всем мире наблюдается рост популярности национальных парков, природных зон отдыха [4]. Для создания системы управления рекреационной зоной должна быть разработана пространственная цифровая экономическая модель развития. При этом методы точного мониторинга состояния территории с использованием геотехнологий должны сочетаться с методами экономического моделирования и прогнозирования. Как и любой ТПТК рекреационные зоны водохранилищ должны приносить экономический доход от хозяйственного использования. При правильной организации системы землепользования возможно получение постоянной устойчивой прибыли как эксплуатирующими территорию субъектами частного бизнеса, так и местными и региональными властями [5–7].

Цели исследования

В результате проведения исследований разработана система геоинформационного мониторинга состояния земельных ресурсов прибрежной зоны водохранилища на примере территории Новосибирского водохранилища.



а/а



б/б

Рис. 1. Примеры разрушения берегов Новосибирского водохранилища: а) село Завьялово; б) село Сосновка

Fig. 1. Examples of destruction of the Novosibirsk water basin shore line as the result of wind-and-wave soil erosion: а) near the village Zav'yalovo; б) near the village Sosnovka

Методы исследования

В соответствии с концепцией развития отрасли геодезии и картографии до 2020 г. [8] в интересах совершенствования картографо-геодезического производства и модернизации системы картографического обеспечения РФ особо остро стоит проблема разработки современных методов актуализации пространственных данных картографо-геодезического фонда и разрабатываемой инфраструктуры пространственных данных. Одним из путей решения данной проблемы является усовершенствование технологий обновления картографических материалов с использованием данных космических съемок. Осуществляемый в РФ государственный топографический мониторинг состоит из взаимосвязанных информационно-технологических сегментов: географического, космического, картографического, спутниково-навигационного и геоинформационного [9].

Без актуальной и достоверной информации о земельных ресурсах невозможно эффективное управление, контроль, надзор и координация деятельности различных министерств и ведомств. С помощью космических снимков можно выполнять работы по созданию генеральных планов населенных пунктов, разработке проектной документации, планированию мест размещения инвестиционных площадок, выявлению незаконного строительства, созданию схем территориального планирования и многое другое. При этом современные спутниковые системы дистанционного зондирования могут обеспечить съемку поверхности Земли с пространственным разрешением до 0,23 м, а аэрофотосъемочные комплексы – 0,1 м и крупнее. Эти пределы точности удовлетворяют

практически всем видам работ, которые может проводить специалист по управлению земельными ресурсами. Определение границ территориальных зон, границ муниципальных образований, памятников природы, объектов регистрации прав – это далеко не полный список работ, которые могут быть выполнены с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ).

Современные системы мониторинга территории, системы раннего предупреждения и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, гидрометеорологические службы являются активными потребителями информационного ресурса, который предоставляют ДДЗЗ. Кроме того, в настоящее время существуют примеры, когда спутниковая съемочная система изначально проектируется и разрабатывается для решения конкретных задач, связанных с мониторингом чрезвычайных ситуаций и оперативного обеспечения заинтересованных служб и ведомств актуальными ДДЗЗ. Подобной системой является российская разработка космического аппарата «Канопус-М» [10].

Территория водохранилищ является одним из наиболее интересных и важных с позиции геомониторинга объектов наблюдений. В первую очередь это обосновано стратегическими задачами по обеспечению водными ресурсами населения. Также интерес представляет и научное изучение состояния ТПТК и динамики его поведения как техногенного объекта. При проектировании водохранилищ одним из обязательных параметров является установление проектного срока эксплуатации. Например, для Новосибирского водохранилища проектный срок эксплуатации составляет 450 лет. Однако при выполнении расчетов были заложены минималь-

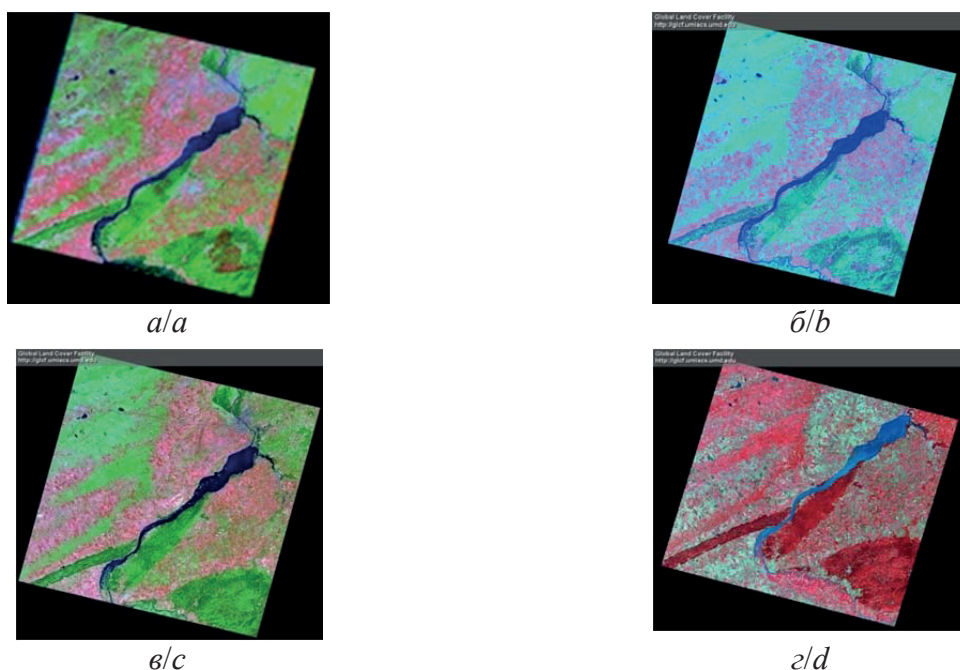


Рис. 2. Исходные ДДЗЗ на территорию Новосибирского водохранилища. Съемка: а) 2016 г.; б) 2009 г.; в) 1999 г.; г) 1989 г.

Fig. 2. Initial Earth remote sensing data of the Novosibirsk water basin in: a) 2016; b) 2009; c) 1999; d) 1989

ные скорости разрушения береговой линии в результате ветро-волновой эрозии. Фактическая скорость разрушения берегов превышает проектные расчеты в 10 раз. В результате темпы заиления водохранилища также превышают проектные значения. Поэтому конечный срок эксплуатации водохранилища может уменьшиться до 250 лет.

При проведении исследования состояния береговой линии Новосибирского водохранилища, анализа интенсивности и локализации процессов берегоразрушения были использованы разновременные данные дистанционного зондирования Земли, материалы полевых наблюдений, а также почвенные карты территории района работ. Часть данных была получена при поддержке группы компаний «СКАНЭКС» в рамках договора о научно-техническом сотрудничестве, рис. 2.

Для автоматической векторизации разновременных контуров Новосибирского водохранилища по космическим снимкам растровое изображение было разбито на классы с помощью неуправляемой классификации Isodata. Использование этого алгоритма осуществляется посредством диалога Isodata classification в программном обеспечении Image Procecion [11].

Оперативный мониторинг состояния береговой линии водохранилища осуществляется с использованием технологий беспилотных авиасистем. Полученные снимки высокого разрешения применяются для решения следующих задач:

- оперативный мониторинг состояния территории;
- контроль скорости разрушения береговой линии;
- создание и обновление карт и планов;
- решение задач проектирования систем рационального природопользования (в том числе и разработка схем рекреационного использования земельных ресурсов);
- проведение мероприятий по инвентаризации;
- ведение кадастров.

В качестве съёмочного оборудования целесообразно использовать цифровые фотографические камеры с полноразмерными или ASP-C матрицами, обеспечивающие получение снимков высокого качества. Также рекомендовано наличие на борту ГНСС-приемников, обеспечивающих сантиметровую точность выполнения спутникового позиционирования. В качестве примера БПЛА, оснащённых необходимым для съёмки оборудованием, можно привести Геоскан 101 и Геоскан 201 [12]. В случае отсутствия спутниковой аппаратуры сантиметровой точности требуется создание планово-высотного съёмочного обоснования геодезическими методами. Фотограмметрическая обработка материалов аэрофотосъёмки выполняется с использованием цифровых фотограмметрических станций PHOTOMOD или аналогичного программного обеспечения: Agisoft PhotoScan, Trimble Inpho UASMaster.

Большинство современных техногенных природно-территориальных комплексов изменяются

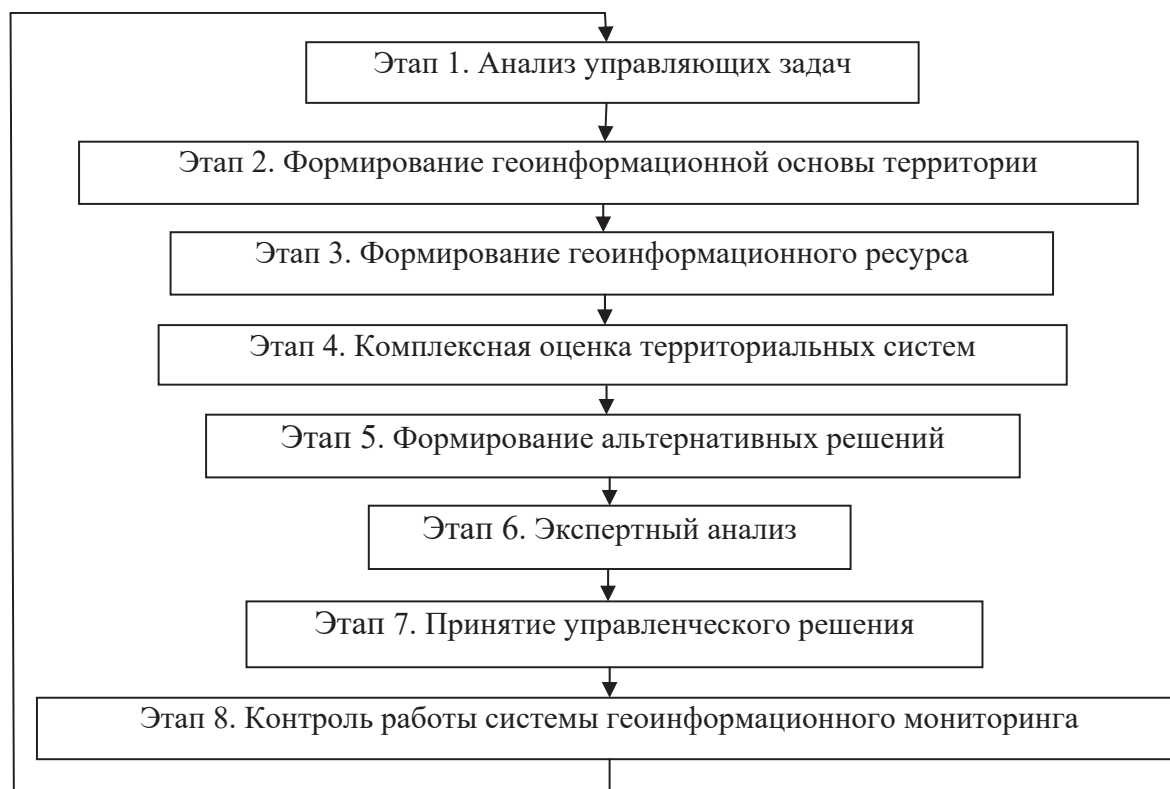


Рис. 3. Технологическая схема геоинформационного мониторинга ТПТК

Fig. 3. Technological scheme of geoinformational monitoring of TNTC

во времени, приобретают новые качества. При этом техногенный характер возникновения объекта предполагает наличие проектных показателей нормального состояния и функционирования ТПТК. В ряде случаев подобного рода показатели определены в нормативно-правовых актах, санитарных нормах и правилах, показателях предельно-допустимых концентраций и т. п. Мониторинг состояния ТПТК выполняется на различных уровнях, при этом в современном понимании мониторинг не ограничивается определением происходящих изменений. Для создания прогнозных моделей формируются разновременные базы данных, которые содержат комплекс разнородной информации о территории. ДДЗЗ и векторная геоинформация составляют основу для осуществления геоинформационного мониторинга.

Предлагаемые технологические решения позволили сформировать технологическую схему геоинформационного мониторинга территории ТПТК, которая представлена на рис. 3 [7, 13].

Разработанная технологическая схема геоинформационного мониторинга ТПТК ориентирована на применение современных геотехнологий и реализует принципы рационального, экологически-ориентированного землепользования и достижения устойчивого развития территорий с соблюдением норм промышленной безопасности [7, 14].

Результаты исследования

Водохранилища представляют собой ТПТК – систему, состоящую из природных и искусственных объектов, взаимодействующих на различных структурных уровнях и оказывающих влияние друг на друга. На территории Новосибирского водохранилища ежегодно проводится комплекс полевых работ, связанных с определением участков береговой линии, разрушаемых в результате прогрессирования ветро-волновой эрозии (рис. 4). Действие негативных процессов берегоразрушения установлено на 70 % территории водохранилища.

Однако вместе с этим в период с 2014–2016 гг. на некоторых участках береговой линии протяженностью около 10 км были проведены берегоукрепительные работы, показанные на рис. 5.

В результате анализа разновременных ДДЗЗ были получены карты положения береговой линии водохранилища на различные даты с момента его создания (рис. 6). Установлено также, что на некоторых участках береговая линия смещалась со скоростью до 5 м в год.

По полученным в результате анализа контурам водохранилища было определено разрушение берегов за 40 лет и выделены места наибольшего разрушения. Также на основании полученных данных разработан план мероприятий по укреплению



а/а



б/б



в/с



г/д

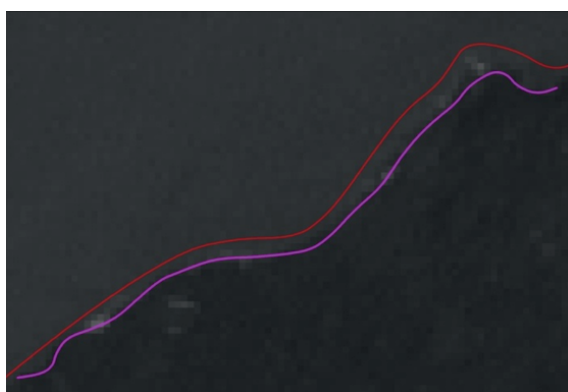
Рис. 4. Примеры разрушения берегов Новосибирского водохранилища

Fig. 4. Examples of shore line destruction of the Novosibirsk water basin



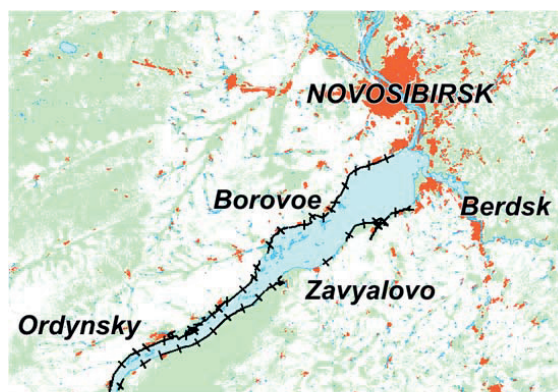
Рис. 5. Примеры берегоукрепления Новосибирского водохранилища

Fig. 5. Example of shore line stabilization, the Novosibirsk water basin



— контур водохранилища в 1979 году
 — контур водохранилища в 1989 году

a/a



— участки разрушения береговой линии
 — населенные пункты

b/b

Рис. 6. Результат анализа ДДЗЗ: а) Сравнение положения двух разновременных контуров береговой линии водохранилища вблизи села Завьялово; б) Участки береговой линии Новосибирского водохранилища, подверженные разрушению в результате прогрессирования ветро-волновой эрозии

Fig. 6. Result of remote sensing data analysis of the Novosibirsk water basin territory: a) example of shore line shift as the result of shore line reproduction near the village Zavyalovo; b) shore line parts of the Novosibirsk water basin, subjected to destruction

берегов. По типу разрушения береговой линии предложено дополнить существующую классификацию В.Т. Трофимова [15], которая включала умеренно-опасный, опасный, особо опасный типы разрушения, дополнительным типом – катастрофическим (таблица).

На рис. 7 представлена градиентная модель смещения береговой линии за период с 1979 по 2016 гг.

На рис. 7 цифрами обозначены участки, которые в первую очередь нуждаются в проведении берегоукрепительных работ и организации системы геодезического мониторинга. Для создания прогнозной модели разрушения береговой линии водохранилища были проведены почвенные исследования, по результатам которых получены данные о наиболее подверженных размыву участках. На рис. 8 представлен фрагмент почвенной карты.

Таблица. Классификационные характеристики разрушения береговой линии Новосибирского водохранилища

Table. Classificatory characteristics of the Novosibirsk water basin shore line deformation

Тип разрушения береговой линии Shore line deformation type	Скорость разрушения, (м/год) Deformation velocity (meters per year)	Протяженность береговой линии Shore line length		Площадь разрушенных земель, (км ²) Area of destroyed lands (km ²)
		км/km	%	
Умеренно-опасный, опасный, особо опасный (классификация В.Т. Трофимова) Moderately dangerous, dangerous, highly dangerous (classification of V.T. Trofimov)	от 1 до 4	190	30	10,5
Катастрофический Disastrous	от 4 до 8	120	19	18,5

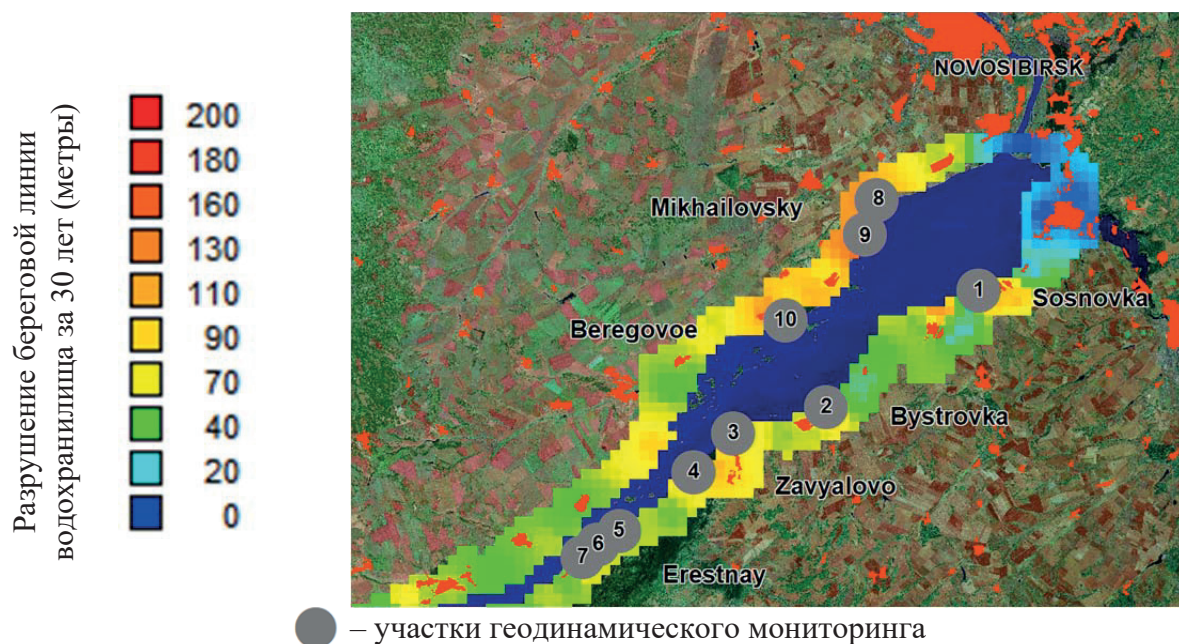


Рис. 7. Градиентная модель смещения береговой линии

Fig. 7. Gradient model of shore line shift

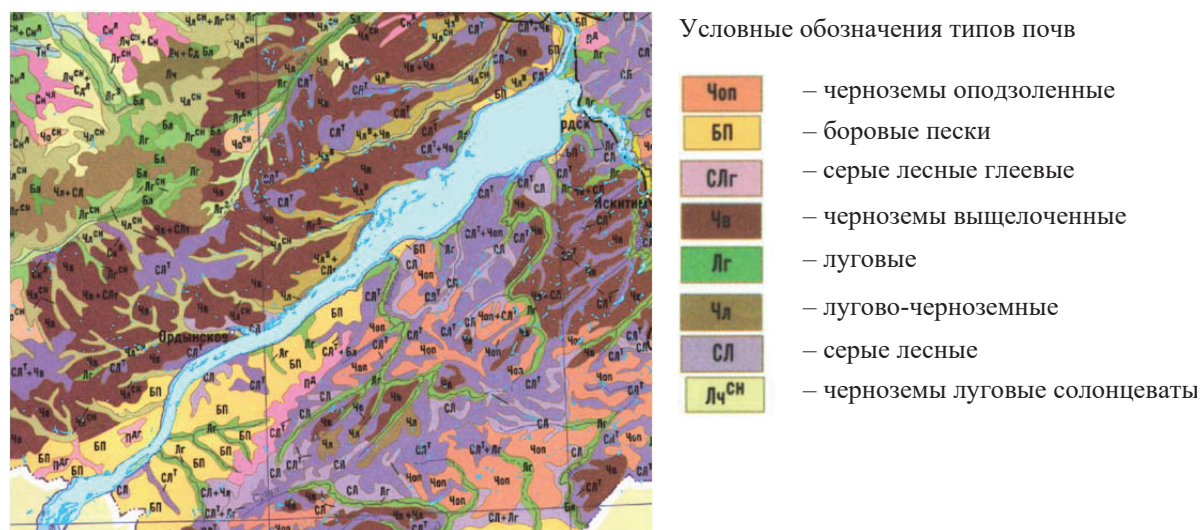


Рис. 8. Фрагмент почвенной карты

Fig. 8. Fragment of the soil map

Учитывая данные по типам почв и скоростям их разрушения за предыдущие периоды, можно определить скорости разрушения береговой линии в зависимости от почвообразующих пород. Например, наибольшая скорость берегозащиты – 5 м в год, установлена на земельных участках, почвообразующими породами которых являются боровые пески. Такие земельные участки занимают 61 % от общей площади разрушаемой территории берега. Оставшиеся земельные участки заняты темно-серыми лесными, луговыми и лугово-черноземными почвами. Скорости разрушения данных типов почв не превышают 2 м в год.

Также определенный практический интерес представляет и прогноз скоростей разрушения береговой линии в зависимости от типов почв и определение земельных участков, которые в силу специфики почвенного состава наиболее пострадают в результате ветро-волновой эрозии. На территории прибрежной зоны Новосибирского водохранилища наиболее интенсивному разрушению подвергаются земельные участки, почвослагающие породы которых представляют собой боровые пески.

Для выполнения работ по картографированию нарушений почвенного и растительного покровов предлагается комплексное зонирование земель с



Рис. 9. Геодезический мониторинг береговой линии: а) применение геодезической рулетки; б) выполнение геодезических измерений; в) измерение с использованием лазерной рулетки

Fig. 9. Examples of shore line monitoring with the use of geodetic instruments: a) geodetic tape measurement (up to 50 meters); b) reflector use for measuring; c) use of laser tape to determine the distance from basic direction to the shore line

учетом кадастрового деления, функционального использования и анализа сложившихся социально-экономических отношений. При этом перспективным является применение подхода к зонированию территории, изложенного в работе [16]. В частности, полученные при анализе нарушенности земель ареалы необходимо в дальнейшем оценивать не только по степени их антропогенной трансформации, но и по социально-экономической эффективности использования населением этих земельных участков [17].

Для организации системы наземного мониторинга были определены 10 участков береговой линии, на которых наблюдается максимальное по скорости берегоразрушение. Выбранные земельные участки отмечены номерами на рис. 7. На каждом участке было закреплено по три репера для проведения контрольных измерений положения береговой линии. От реперов проводились измерения до береговой линии (рис. 9).

Для организации системы современного мониторинга в качестве данных дистанционного зондирования целесообразно использовать материалы космической съёмки высокого разрешения в видимом диапазоне или съёмку с использованием беспилотных авиационных систем. Применение космической съёмки для мониторинга береговой линии может оказаться менее эффективным из-за сложной и сильно вытянутой формы съёмочного участка. В этом случае наиболее целесообразна организация системы мониторинга территории водохранилища с помощью применения технологии беспилотных авиационных систем. На участках, где береговая линия интенсивно разрушается, предлагается организовать не только систему топографического мониторинга, но и аэрофотосъёмочные работы с применением беспилотных авиационных си-

стем и специализированного программного обеспечения, в том числе позволяющего создать геопортал [18–23].

Аэрофотосъёмка должна выполняться минимум в два маршрута: первый маршрут над линией уреза воды, второй – над прилегающей береговой частью (для обеспечения планово-высотного съёмочного обоснования). Разрешение съёмки для обеспечения идентификации связующих и опорных точек составляет 5–10 см. Общая длина береговой линии Новосибирского водохранилища – более 600 км, соответственно, длина съёмочных маршрутов – более 1200 км. В связи с этим для съёмки целесообразно использовать БПЛА самолётного типа из-за их более высокой производительности (до 500 км в день). Для дополнительного мониторинга тех участков, которые подвержены катастрофическому отступанию береговой линии (отдельные участки береговой линии суммарной длиной около 120 км) и локального объектного мониторинга, целесообразно использовать квадрокоптеры. Планирование аэрофотосъёмки выполняется с использованием наземных станций управления БПЛА, например Mission Planner (рис. 10).

Результатом съёмки является ортофотоплан прибрежной части водохранилища, по которому определяется текущее положение линии уреза воды с точностью до 10 см [13]. Полученные данные о состоянии береговой линии и прилегающих к водохранилищу земельных участков используются для расчета численных значений критериев эффективности землепользования. При этом возможно применение соответствующих подходов к ценообразованию при определении кадастровой стоимости земельных ресурсов рекреационной или лесной категории, занятых промышленными объектами, изложенных в работах [4, 5].

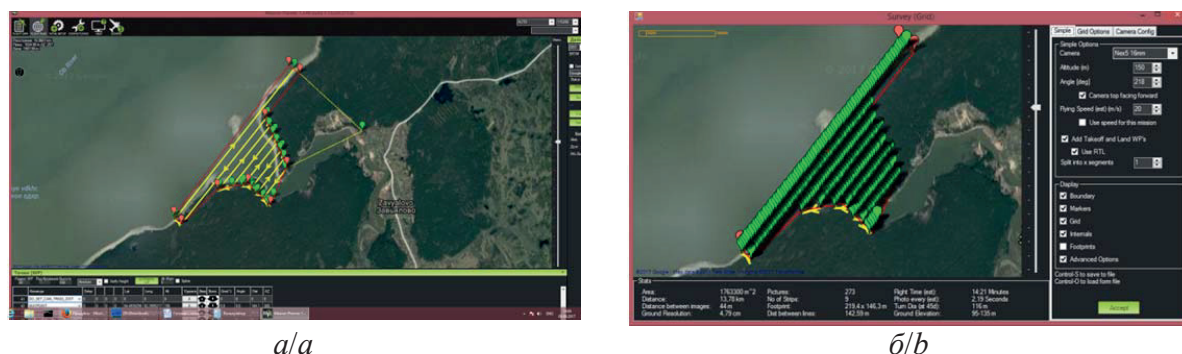


Рис. 10. Пример планирования аэрофотосъёмочных работ с использованием станции управления Mission Planner: а) общая схема аэрофотосъёмочных маршрутов; б) расчёт параметров аэрофотосъёмки

Fig. 10. Example of aerial survey works with the use of ground control station Mission Planner: а) general scheme of aerial survey routes; б) aerial survey parameters calculation

Заключение

Мониторинг состояния береговой линии водохранилища необходим в первую очередь для проверки адекватности прогнозной модели прогрессирования ветро-волновой эрозии. Выполненные исследования показали соответствие прогнозных и фактических значений разрушения береговой линии на 87 %. В первую очередь расхождения были связаны с неверным определением типов почв и скоростей их разрушения. Также прогнозная модель требует уточнения в зависимости от водности рассматриваемого временного периода. В маловодные годы скорость разрушения береговой линии снижается на 25–40 % на различных участках водохранилища. Водность обусловлена запасами снега, в первую очередь на территории Алтая. Также динамика разрушения береговой линии меняется в зависимости от времени года: максимальные разрушения происходят в весенний период при максимальном уровне воды в водохранилище, постепенно интенсивность разрушения затухает и полностью прекращается зимой после формирования ледяного покрова.

Для решения задачи организации экономически-эффективного землепользования на прибрежной территории водохранилища наиболее рационально развивать рекреационное землепользование. Для исследуемой территории Правительством Новосибирской области совместно с широким кругом специалистов в области территориального планирования, кадастра, земельных ресурсов, а также министерства здравоохранения разработаны планы по развитию рекреационного направления природопользования. В частности, наряду с существующей инфраструктурой рекреационно-оздоровительных объектов планируется создание двух крупных рекреационных зон для обеспечения населения города Новосибирска и близлежащих населенных пунктов объектами природного лечебно-восстановительного значения. Реализация проектов намечена на период с 2018 по 2025 гг. Прогнозируется существенный экономический эффект,

выражающийся в увеличении доходов от использования прибрежной территории водохранилища на 40 %. Главным элементом создания современных основ рационального и экономически эффективного землепользования является переход на цифровую экономику с применением геотехнологий [24]. Также при строительстве объектов туристической и рекреационно-оздоровительной инфраструктуры намечено проведение работ по берегоукреплению, общим объемом свыше 20 км. Проведение данных работ позволит увеличить общий срок эксплуатации водохранилища и существенно улучшить качество воды.

Теоретическая и практическая значимость исследования

Предлагаемая технологическая схема геоинформационного мониторинга является эффективной с позиции временных и финансовых затрат, обеспечивает оперативный контроль состояния береговой линии, позволяет оценить качество выполненных берегоукрепительных работ.

Выявлены участки береговой линии с особо опасным и катастрофическим разрушением. Для них определена технология мониторинга и периодичность наблюдений. Реализация разработанной программы комплексного экологически ориентированного рационального землепользования на территории водохранилищ позволит не только решить проблему с обеспечением населения прилегающих территорий запасами питьевой воды, но и с максимальной экономической выгодой использовать прибрежные территории в рекреационной сфере.

Исследования проводились при финансовой поддержке Правительства Новосибирской области и выделенного гранта: «Исследование ветро-волновой эрозии береговой линии Новосибирского водохранилища». Авторы выражают благодарность руководству Новосибирской области за проявленный интерес к их исследованиям и финансирование мероприятий по исследованию состояния береговой линии Новосибирского водохранилища.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Верхотуров Д. Во глубине сибирских гидроэлектростанций // Красноярская региональная общественная экологическая организация «Плотина»: сборник статей. – Красноярск: КРОЭО «Плотина», 2009. – 91 с.
2. Бейром С.Г., Вострякова Н.В. Изменение природных условий в средней Оби после создания Новосибирской гидроэлектростанции. – Новосибирск: Наука, Сибирское Отделение, 1973. – 250 с.
3. Комплексные исследования Новосибирского водохранилища / Труды Сибирского регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института / под ред. Ю.И. Подлипского, Т.С. Чайковской. – М.: Гидрометеиздат, 1985. – Вып. 70. – 135 с.
4. Sibly H. Pricing and Management of Recreational Activities which Use Natural Resources // Environmental and Resource Economics. – 2001. – № 18. – P. 339–354. URL: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1011165132180> (дата обращения 10.11.2019).
5. Pak M., Türker M.F. Determination of forest recreational use value of forest resources in Turkey: Sazalan forest recreation site sample. URL: <http://www.fao.org/docrep/ARTICLE/WFC/XII/0411-A1.HTM> (дата обращения 10.11.2019).
6. Oulidi H.J., Moumen A. Towards a Spatial Data Infrastructure and an Integrated Management of Groundwater Resources // Journal of Geographic Information Systems. – 2015. – № 7. – P. 667–676.
7. Elements of Geoinformation Support of Natural Resource Management System / A.V. Dubrovsky, I.T. Antipov, A.I. Kalenitsky, A.P. Guk // International Journal of Advanced Biotechnology and Research (IJBR). – 2018. – V. 9. – Iss. 1. – P. 1185–1202.
8. Об утверждении концепции развития отрасли геодезия и картографии до 2020 г.: утверждена Распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 декабря 2010 г. № 2378-р. URL: http://economy.gov.ru/minrec/activity/sections/landrelations/geodesyandcartography/doc20101217_01 (дата обращения 10.11.2019).
9. Седелников В.П. Космический сегмент в структуре Системы государственного топографического мониторинга // Геоматика № 2. – М.: Совзонд, 2012. – С. 57–60.
10. Горбунов А.В., Ильина И.Ю., Саульский В.К. Состояние и перспективы развития космических комплексов «Канопус-В» и «Метеор-М» // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2015. – Т. 2. – № 4. – С. 14–19.
11. Фарутин И.Н., Федоткин Д.И. Технологические решения компании Сканэкс для приема и обработки спутниковой информации // Сборник статей по материалам международного научного конгресса «Интерэкспо Гео-Сибирь», 2011. – Новосибирск: Сибирская государственная геодезическая академия, 2011. – С. 167–169.
12. Иноземцев Д.П. Автоматизированная аэрофотосъемка с помощью программно-аппаратного комплекса «GeoScan-PhotoScan» // САПР и ГИС автомобильных дорог. – 2014. – № 1 (2). – С. 46–51.
13. Lucas G., Lenart Cs., Solymosi J. Development and testing of geoprocessing models for the automatic generation of remediation plan and navigation data to use in industrial disaster remediation // Open Geospatial Data, Software and Standards. – 2016. – № 1:5. URL: <https://opengeospatialdata.springeropen.com/articles/10.1186/s40965-016-0006-z> (дата обращения 10.11.2019).
14. Гридэл Т.Е., Алленби Б.Р. Промышленная экология. – М.: Юнити-Дана, 2012. – 527 с.
15. Трофимов В.Т., Вознесенский Е.А., Королев В.А. Инженерная геология России. Т. 1. Грунты России. – М.: КДУ, 2011. – 671 с.
16. Дубровский А.В. Возможности применения геоинформационного анализа в решении задач мониторинга и моделирования пространственных структур // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 5/С. – С. 220–224.
17. Joseph M., Moeckel R. Automated design of gradual zone systems // Open Geospatial Data, Software and Standards. – 2017, Springer Open. URL: <https://doi.org/10.1186/s40965-017-0032-5> (дата обращения 10.11.2019).
18. Карпик, А. П. Методологические и технологические основы геоинформационного обеспечения территорий. – Новосибирск: Сибирская государственная геодезическая академия, 2004. – 250 с.
19. Геопространственный дискурс в системе опережающего научного мышления / А.П. Карпик, Д.В. Лисицкий, К.С. Байков, А.Г. Осипов, В.Н. Савиных // Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий. – 2017. – Т. 22. – № 4. – С. 53–67.
20. Bakillah M., Liang S. Open geospatial data, software and standards Open Geospatial Data // Software and Standards. – 2016. – № 1:1. URL: <https://opengeospatialdata.springeropen.com/articles/10.1186/s40965-016-0004-1> (дата обращения 10.11.2019).
21. Becirspahic L., Karabegovic A. Web portals for visualizing and searching spatial data // Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), 2015. 38th International Convention on. – Opatija, Croatia, 2015. – P. 305–311.
22. Steiniger S., Hunter A.J.S. Free and open source GIS software for building a spatial data infrastructure // Geospatial Free and Open Source Software in the 21st Century. LNCS. – Heidelberg: Springer, 2012. – P. 247–261.
23. A Web Map Service implementation for the visualization of multidimensional gridded environmental data / J.D. Blower, A.L. Gemmell, G.H. Griffiths, K. Haines, A. Santokhee, X. Yang // Environmental Modelling & Software. – September 2013. – V. 47. – P. 218–224.
24. Digital economy and geoinformation technologies / D. Lisitsky, K. Baykov, A. Osipov, A. Grishanova, V. Savinykh // Actual Issues of Mechanical Engineering: International Conference, 2017. – Tomsk, Russia, 27–29 July, 2017. DOI: 10.2991/ai-me-17.2017.120.

Поступила: 12.11.2018 г.

Информация об авторах

Карпик А.П., доктор технических наук, профессор, ректор Сибирского государственного университета геосистем и технологий.

Аврунев Е.И., кандидат технических наук, доцент кафедры кадастра и территориального планирования Сибирского государственного университета геосистем и технологий.

Добротворская Н.И., доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры кадастра и территориального планирования Сибирского государственного университета геосистем и технологий.

Дубровский А.В., кандидат технических наук, заведующий кафедрой кадастра и территориального планирования, заведующий научно-производственным центром «Дигитайзер» Сибирского государственного университета геосистем и технологий.

Малыгина О.И., кандидат технических наук, доцент кафедры кадастра и территориального планирования Сибирского государственного университета геосистем и технологий.

Попов В.К., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и землеустройства Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 528.004

ORGANIZATION OF THE SYSTEM OF GEOINFORMATION MONITORING THE LAND RESOURCES IN NOVOSIBIRSK BASIN SHORE ZONE

Alexandr P. Karpik¹,
rektorat@ssga.ru

Evgeny I. Avrunev¹,
avrynev_ei@ngs.ru

Nadezhda I. Dobrotvorskaya¹,
dobrotvorskaya@mail.ru

Alexey V. Dubrovsky¹,
avd5@mail.ru

Olesya I. Malygina¹,
131379@mail.ru

Viktor K. Popov²

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies,
10, Plakhotny street, Novosibirsk, 630108, Russia.

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

Relevance of the research is caused by the fact that modern organization of infrastructure objects, industrial and economical complexes must be secure, ecologically and economically efficient. The article states the problem of system organization in rational use and control for water reservoir conditions applying geotechnologies and Earth's remote sensing systems. The territory of the Novosibirsk Basin (Russia, the Novosibirsk region) is considered as the object of the research. On the territory under investigation there is the deterioration of ecological situation as a result of wind-and-wave erosion of shore lines and intensive wash-out of soils, vegetation, trees and chemical agricultural fertilizers etc. into the water. The article substantiates the introduction of the term – technogenic natural territorial complexes. The Earth's remote sensing data define soil erosion velocities along the whole length of the water basin shore line. On the basis of the research we made a forecast model of shore line destruction. The spots of geodynamic monitoring are settled and the observation frequency is determined. The authors drawn the conclusions on the necessity of shore line stabilization, as well as more intensive involvement of the water basin territory into recreational activity.

The aim of the research is to develop the geoinformation system for monitoring land resources of basin shore zone, on the example of the Novosibirsk water basin territory.

Objects: land resources of the Novosibirsk water basin shore zone.

Methods. When solving the tasks we used both general research methods (system analysis, synthesis, observation, comparison, measurement, generalization), and special research methods (monitoring of environment and land conditions with the use of Earth's remote sensing data, digital cartography method and geoinformational analysis and modelling).

Results. The authors developed technological scheme of geoinformational monitoring the system organization for technogenic natural territorial complex – water basin. The authors built the forecast gradient model of water basin shore line displacement velocities. On the basis of the analysis of this model the authors determined the list of real estate objects which will be destroyed in the result of wind-and-wave erosion development.

Key words:

Satellites monitoring methods, technogenic natural territorial complexes, land resources, unmanned aerial vehicles, digital economy, water objects.

The research was financially supported by the Administration of Novosibirsk region and the grant «Study of wind-wave erosion of the shore line of Novosibirsk basin shore zone».

The authors appreciate the interest of the Administration of Novosibirsk region in the research and funding the investigations of the shore line state in Novosibirsk basin shore zone.

REFERENCES

1. Verkhotur D. Vo glubine sibirskikh gidroelektrostantsii [In the deep of Siberian PS]. *Krasnoyarskaya regionalnaya obshchestvennaya ekologicheskaya organizatsiya «Plotina»: sbornik statey* [Krasnoyarsk regional public ecological organization «Plotina»: collection of articles]. Krasnoyarsk, KRPEO Publ., 2009. 91 p.
2. Beyrom S.G., Vostryakova N.V. *Izmenenie prirodnnykh usloviy v sredney Obi posle sozdaniya Novosibirskoy gidroelektrostantsii* [Changing of natural conditions in central Ob after creation of Novosibirsk Power Station]. Novosibirsk, Nauka, Publ., 1973. 250 p.
3. Kompleksnye issledovaniya Novosibirskogo vodokhranilishcha [Complex research of the Novosibirsk water basin]. *Kompleksnye*

- issledovaniya Novosibirskogo vodokhranilishcha* [Proceedings of the Siberian Regional Research Hydrometeorological Institute]. Eds. I.Yu. Podlipsky, T.S. Tchaikovskaya. Moscow, Gidrometeoizdat Publ., 1985. Iss. 70, 135 p.
4. Sibly H. Pricing and Management of Recreational Activities Which Use Natural Resources. *Environmental and Resource Economics*, 2001, no. 18, pp. 339–354. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1011165132180> (accessed 12 May 2019).
 5. Pak M., Türker M.F. Determination of forest recreational use value of forest resources in Turkey: Szalan forest recreation site sample. Available at: <http://www.fao.org/docrep/ARTICLE/WFC/XII/0411-A1.HTM> (accessed 12 May 2019).
 6. Oulidi H.J., Moumen A. Towards a Spatial Data Infrastructure and an Integrated Management of Groundwater Recourses. *Journal of Geographic Information Systems*, 2015, no. 7, pp. 667–676.
 7. Dubrovsky A.V., Antipov I.T., Kalenitsky A.I., Guk A.P. Elements of Geoinformation Support of Natural Resource Management System. *International Journal of Advanced Biotechnology and Research (IJBR)*, 2018, vol. 9, Iss. 1, pp. 1185–1202.
 8. *Ob utverzhdenii kontseptsii razvitiya otrasli geodeziya i kartografi do 2020 g.: utverzhdena Rasporyazheniem Pravitelstva Rossiyskoy Federatsii ot 17 dekabrya 2010 g. № 2378-r* [The concept of branch development «Geodesy and Cartography» up to 2020, approved by the Government of the Russia Federation, December, 17, 2010 № 2378-r]. Available at: http://economy.gov.ru/minrec/activity/sections/landrelations/geodesyandcartography/doc201_01217_01 (accessed 12 May 2019).
 9. Sedelnikov V.P. Kosmicheskii segment v strukture Sistemy gosudarstvennogo topograficheskogo monitoringa [Space segment in the structure of State topographic monitoring system]. *Geomatika* № 2. Moscow, Sovzond Publ., 2012. pp. 57–60.
 10. Gorbunov A.V., Ilina I.Yu., Saulskiy V.K. Condition and perspectives of development of space complexes «Kanopus-V» and «Meteor-M». *Space missile instrument making and information systems*, 2015, vol. 2, no. 4, pp. 14–19. In Rus.
 11. Farutin I.N., Fedotkin D.I. Tekhnologicheskie resheniya kompanii Skanyeks dlya priema i obrabotki sputnikovoy informatsii [Technological solutions of Scanecs company for receiving and processing satellite information]. *Sbornik statey po materialam mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa «Interjekspos Geo-Sibir»* [Collected papers of international scientific congress «InterExpo Geo-Siberia»]. Novosibirsk, Siberian State Geodetic Academy Publ., 2011. pp. 167–169.
 12. Inozemtsev D.P. Avtomatizirovannaya aerofotosemka s pomoshchyu programmno-apparatnogo kompleksa «GeoScan-PhotoScan» [Automated aerial survey with the help of software and hardware complexes «GeoScan-PhotoScan»]. *SAPR i GIS avtomobilnykh dorog*, 2014, no. 1 (2), pp. 46–51.
 13. Lucas G., Lenart Cs., Solymosi J. Development and testing of geoprocessing models for the automatic generation of remediation plan and navigation data to use in industrial disaster remediation. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 2016, no. 1:5. Available at: <https://opengeospatialdata.springeropen.com/articles/10.1186/s40965-016-0006-z> (accessed 12 May 2019).
 14. Gridjel T.E., Allenbi B.R. *Promyshlennaya ekologiya* [Industrial ecology]. Moscow, Juniti-Dana Publ., 2012. 527 p.
 15. Trofimov V.T., Voznesensky E.A., Korolev V.A. *Inzhenernaya geologiya Rossii*. T. 1. Grunty Rossii [Engineering Geology of Russia. Vol. 1. Soils of Russia]. Moscow, BHU Publ., 2011. 672 p.
 16. Dubrovskiy A.V. Opportunities of geoinformational analysis implication for solving tasks of monitoring and modelling spatial structures. *News of Higher Education, Geodesy and aerial survey*, 2015, no. 5/P, pp. 220–224. In Rus.
 17. Joseph M., Moeckel R. Automated design of gradual zone systems. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 2017, Springer Open. Available at: <https://doi.org/10.1186/s40965-017-0032-5> (accessed 12 May 2019).
 18. Karpik A.P. *Metodologicheskie i tekhnologicheskie osnovy geoinformatsionnogo obespecheniya territoriy* [Methodological and technological basis of geoinformational territorial support]. Novosibirsk, Siberian State Geodetic Academy Publ., 2004. 250 p.
 19. Karpik A.P., Lisitskiy D.V., Baykov K.S., Osipov A.G., Savinykh V.N. Geospatial discourse in the system of advanced scientific thinking. *Siberian State University of Geosystems and Technologies Bulletin*, 2017, vol. 22, no. 4, pp. 53–67. In Rus.
 20. Bakillah M., Liang S. Open geospatial data, software and standards Open Geospatial Data. *Software and Standards*, 2016, no. 1:1. Available at: <https://opengeospatialdata.springeropen.com/articles/10.1186/s40965-016-0004-1> (accessed 12 May 2019).
 21. Becirspahic L., Karabegovic A. Web portals for visualizing and searching spatial data. *Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, 2015. 38th International Convention on. Opatija, Croatia. 2015. pp. 305–311.
 22. Steiniger S., Hunter A.J.S. Free and open source GIS software for building a spatial data infrastructure. *Geospatial Free and Open Source Software in the 21st Century*. LNC. Heidelberg, Springer, 2012. pp. 247–261.
 23. Blower J.D., Gemmell A.L., Griffiths G.H., Haines K., Santokhee A., Yang X. A Web Map Service implementation for the visualization of multidimensional gridded environmental data. *Environmental Modelling & Software*, September 2013, vol. 47, pp. 218–224.
 24. Lisitskiy D., Baykov K., Osipov A., Grishanova A., Savinykh V. Digital economy and geoinformation technologies. *International Conference. Actual Issues of Mechanical Engineering*. Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia on 27–29 July, 2017. DOI: 10.2991/aime-17.2017.120.

Received: 12 November 2018.

Information about the authors

Alexandr P. Karpik, Dr. Sc., professor, rector, Siberian State University of Geosystems and Technologies.

Evgeny I. Avrunev, Cand. Sc., associate professor, Siberian State University of Geosystems and Technologies.

Nadezhda I. Dobrotvorskaya, Dr. Sc., professor, Siberian State University of Geosystems and Technologies.

Alexey V. Dubrovsky, Cand. Sc., head of the department, Siberian State University of Geosystems and Technologies.

Olesya I. Malygina, Cand. Sc., associate professor, Siberian State University of Geosystems and Technologies.

Viktor K. Popov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 631.417.2

МОЛЕКУЛЯРНО-МАССОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГУМИНОВЫХ КИСЛОТ МЕРЗЛОТНЫХ БУГРИСТЫХ ТОРФЯНИКОВ ЕВРОПЕЙСКОГО СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ

Василевич Роман Сергеевич¹,
vasilevich.r.s@ib.komisc.ru

Вежов Кирилл Сергеевич¹,
vezhov@ib.komisc.ru

Лодыгин Евгений Дмитриевич¹,
lodigin@ib.komisc.ru

¹ Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук,
Россия, 167982, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28.

Актуальность исследования обуславливается полидисперсностью гуминовых кислот и их слабой изученностью в торфяных почвах криолитозоны.

Цель: изучение особенностей молекулярно-массового распределения гуминовых кислот почв бугристых торфяников.

Объекты: препараты гуминовых кислот, выделенные из двух типов почв мерзлотных бугристых болот – сухоторфяной мерзлотной почвы бугров, почвы оголённых торфяных пятен, на всю глубину торфяных отложений.

Методы: элементный состав, жидкостная гель-хроматография.

Результаты. Исследовано молекулярно-массовое распределение препаратов гуминовых кислот, выделенных из мерзлотных бугристых торфяников Европейского Северо-Востока России. Выявлены закономерности его изменения по профилю. Установлено, что содержание низкомолекулярной фракции преобладает над содержанием средне- и высокомолекулярной фракций гуминовых кислот торфяных почв. Профильное распределение среднечисловых молекулярных масс гуминовых кислот двух разрезов имеет бимодальный характер, с максимальными значениями в верхней и нижней частях профиля. Высокие значения в верхней части профиля связаны с наличием фрагментов длинных неразветвленных углеродных цепей, парафиновых структур и фрагментов олиго- и полисахаридов, что приводит к увеличению линейных размеров молекул гуминовых кислот. Дегградация парафиновых и углеводных фрагментов вниз по торфяному профилю обуславливает уменьшение молекулярных масс гуминовых кислот. Установлена корреляционная связь между мольным отношением $x(H):x(C)$ и мольной долей высокомолекулярной фракции гуминовых кислот. В нижней части профиля увеличение молекулярных масс обусловлено коагуляцией дисперсных гуминовых кислот на минеральной матрице торфа. На границе многолетнемерзлых пород криогенные процессы приводят к существенной трансформации структуры гуминовых кислот с отщеплением наименее конденсированных молекулярных фрагментов. Это имеет четкое отражение в уменьшении молекулярных масс и индекса полидисперсности гуминовых кислот.

Ключевые слова:

Тундровая зона, бугристые торфяники, гуминовые кислоты, молекулярно-массовое распределение, гель-хроматография.

Введение

Гуминовые кислоты (ГК) – гетерогенные смеси высокомолекулярных конденсированных веществ, сформированные из продуктов распада материалов растительного и животного происхождения в наземных и водных экосистемах [1, 2]. Полидисперсность ГК, их полифункциональный состав, связанные с их эволюцией в различных климатических зонах и локальными изменениями экологогенетических условий их формирования, обуславливают инструментальные проблемы их идентификации и аналитические сложности определения макроструктуры молекулярных ансамблей. Одним из основополагающих и дискуссионных остаётся вопрос о размерах их молекул.

Молекулярные массы (ММ), определяющие растворимость ГК, их способность к аккумуляции и миграции в природных средах, использование микроорганизмами и растениями в качестве источника питания, являются важнейшими характеристиками ГК. Изучение молекулярно-массового распределения (ММР) ГК актуально для анализа их роли в почвообразовательном процессе, интерпре-

тации их пространственной, структурной организации и экологических функций, взаимодействия с минеральными компонентами почв [3, 4]. Изменения в распределении молекулярных размеров полидисперсных макромолекул ГК часто происходят в ответ на изменения условий окружающей среды. Наиболее распространенным методом определения ММР является жидкостная гель-проникающая хроматография [5, 6]. Достоинством данного метода является возможность получения информации о полной кривой ММР ГК.

Существуют три гипотезы гумификации почвенного органического вещества (ПОВ). Согласно первой, при трансформации ПОВ в гумусовые кислоты осуществляется образование наиболее стабильного пула природных соединений. Эволюционный отбор в процессе гумификации сопровождается накоплением ароматических структур и сокращением алифатических фрагментов в составе гумусовых веществ, что ведет к увеличению линейных размеров их молекул и как следствие ММ [1, 7]. Компоненты высокомолекулярной фракции (ВМФ) ГК являются наиболее стабильными фраг-

ментами структуры агрегатов ГК. Эта фракция является наиболее гидрофобной фракцией и образована из термодинамически устойчивых ароматических и алифатических компонентов. В низкомолекулярной фракции (НМФ) сосредоточен углерод углеводных и аминокислотных фрагментов, а также алифатических цепочек. Исходя из второй гипотезы, при уменьшении линейного размера гуминовых кислот ароматичность их молекул заметно возрастает. В ВМФ ГК преобладают парафиновые фрагменты, фрагменты олиго- и полисахаридов, аминокислот и ацеталей [8]. Согласно третьей гипотезе, высокие ММ ГК – результат ассоциации или агрегации органических коллоидов. Экстракция препаратов сопровождается существенной трансформацией структурно-функциональных параметров ГК [5].

Цель представленной работы – изучение особенностей молекулярно-массового распределения гуминовых кислот почв бугристых торфяников.

Экспериментальная часть

В качестве объектов исследования выбраны препараты ГК из двух мерзлотных торфяных почв бугристых болот, расположенных в Большеземельской тундре: разрез 2014–1 – сухоторфяная мерзлотная почва бугров (Hemic Follic Cryic Histosols), и разрез 2014–2 – почва оголённых торфяных пятен (Hemic Follic Cryic Histosols (Turbic)).

Данные почвы имеют широкое распространение в тундровой зоне (2,9 % площади Республики Коми), располагаясь на водораздельных пространствах и озёрно-аллювиальных комплексах Большеземельской тундры [9, 10]. Болотные почвы Арктики и Субарктики являются реликтовыми, возникшими в борреальный и атлантический периоды голоцена, при доминировании эвтрофного пути торфонакопления. Впоследствии массивы бугристых болот под действием термокарста, водной эрозии превращаются в типичные мочажинно-бугристые комплексы, изобилующие мелкими озёрами [11]. Протяжённость бугров от 5–10 м до нескольких десятков метров, высота колеблется от 0,2 до 5 м. Под действием криогенных и эрозионных процессов растительный покров на поверхности бугров часто деградирован.

Разрез 2014–1 – сухоторфяная мерзлотная почва бугров. Почва отобрана в 7 км к ЮЗ от ст. Сейда. Разрез заложен на плоском бугре, диаметром 12 м. В растительном покрове преобладают олиготрофные растительные сообщества: брусника, вороника, голубика, дикранум, карликовая березка, кладония, морошка, политрихум и сфагнум.

Разрез 2014–2 – почва оголённых торфяных пятен. Пятно без растительности, диаметром около 5 м в восточной части торфяного бугра. На поверхности диагностируется криогенное растрескивание и пучение верхнего горизонта, фрагменты коры карликовой березки. По периметру торфяного пятна растут зеленые мхи и лишайники. Вследствие ландшафтной близости данные почвы по фи-

зико-химическим характеристикам и ботаническому составу являются аналогами почвы разр. 2014–1, отличаясь только температурными характеристиками сезонно-талого слоя [12]. При отсутствии термоизолирующего мохового слоя они прогреваются интенсивнее в период метеорологического лета. И вследствие этого сезонно-талый слой (СТС) этих почв представлен органическим веществом с большей степенью гумификации [13].

Верхняя граница многолетнемерзлых пород исследованных почв в период календарного лета, в момент максимальной протайки, находится на глубине 40–60 см от дневной поверхности. Торф на всю глубину почвенного профиля тёмно-коричневый, средней и высокой степени разложения. Начальный этап торфонакопления территории относится к раннему атлантическому периоду и для большей части своего существования протекал в эвтрофных условиях во вне мерзлотных условиях с доминированием древесно-осоковых растительных сообществ. Позже, с накоплением торфяной толщи и более глубоким залеганием грунтовых вод относительно дневной поверхности, отмечена высокая доля олиготрофных и мезотрофных видов. С глубины 15–20 см в торфяной почве доминируют олиготрофные растительные сообщества: зеленые мхи и кустарнички [12]. Установление многолетней мерзлоты на данной территории произошло около 2100–2300 кал. л. н., когда происходило образование исследованных бугров, связанное с криогенными процессами пучения [14].

Отбор проб торфа произведен до глубины 2,0 м посылочно по ГОСТ 17644–83 и 11306–2013. Препараты ГК экстрагированы согласно процедуре, рекомендованной Международным обществом по изучению гумусовых веществ [15]. Количественный химический анализ элементного состава ГК выполнен на CHNSO-анализаторе EA 1110 (Carlo-Erba) в соответствии с аттестованными методиками в ЦКП «Хроматография» при Институте биологии. Значения массовой доли элементов в ГК рассчитаны с учетом гигроскопической влаги и зольности.

Количественный анализ ММР препаратов ГК выполнен на хроматографической системе АКТА-basic 10 UPS (Amersam Biosciences) с колонкой SuperdexTM 200 10/300 GL, объём аликвоты раствора ГК 0,10 см³, скорость элюирования 0,5 см³/мин., длина волны светофильтра 254 нм. Рабочую область колонки определяли с помощью растворов голубого декстрана и бихромата калия с концентрацией 1 мг/см³. В качестве элюента использовали Tris-HCl-буфер с pH=8,3 [16] с содержанием додецилсульфата натрия (0,1 %), азида натрия (0,02 %) и NaCl (0,05 моль/дм³). Обработку полученных хроматограмм и расчёт ММР фракций ГК проводили с помощью оригинальной программы Unicorn v. 5.10.

В отличие от индивидуальных органических соединений, которые характеризуются одним значением ММ, препараты ГК полидисперсны,

т. е. обладают набором ММ. Поэтому их описывают молекулярно-массовым распределением, на основании которого рассчитывают среднюю ММ. В зависимости от способа расчета усреднения используют три типа средних молекулярных масс: среднечисловую (M_n), средневесовую (M_w) и среднюю (M_z) [17–19].

Среднечисловая ММ – усреднение по числу молекул в биополимере:

$$M_n = \frac{\sum n_i M_i}{\sum n_i},$$

где n_i – число i -х молекул с молекулярной массой M_i .

Средневесовая ММ – усреднение по массе молекул в биополимере:

$$M_w = \frac{\sum n_i M_i^2}{\sum n_i M_i}.$$

Средняя ММ выражается уравнением:

$$M_z = \frac{\sum n_i M_i^3}{\sum n_i M_i^2}.$$

В монодисперсных системах все типы ММ численно равны, но в полидисперсных системах выполняется отношение:

$$M_z > M_w > M_n,$$

отношение M_w/M_n характеризует степень полидисперсности [19, 20].

Градуировку колонки проводили по глобулярным белкам, структура которых наиболее близка к структуре ГК, с заданными значениями молекулярных масс (рис. 1).

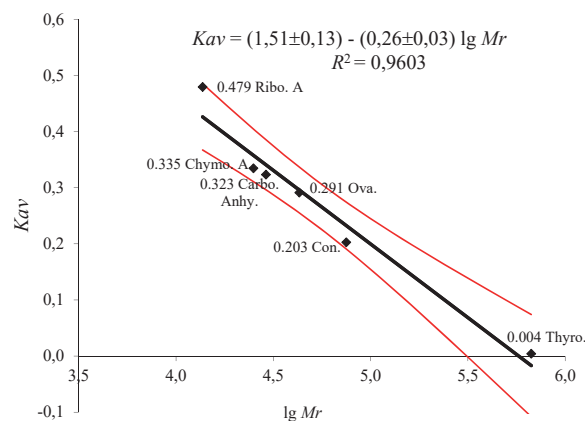


Рис. 1. Градуировочная зависимость коэффициента распределения (K_{av}) от логарифма молекулярной массы ($\lg Mr$) глобулярных белков. Коридор ошибок указан для $P=0,95$

Fig. 1. Graduated dependence of the distribution coefficient (K_{av}) on the logarithm of the molecular mass ($\lg Mr$) of globular proteins. The error corridor is specified for $P=0,95$

Результаты и обсуждение

Массовая доля углерода препаратов ГК, выделенных из почв оголенных торфяных пятен, составляет от 50,1 до 60,8 % и сухоторфяных мерзлотных почв бугров – 52,2–60,8 % (табл. 1). Соотно-

шение $x(H):x(C)$ – одна из важнейших характеристик ГК, отражающая степень бензоидности и устойчивости молекул ГК. Глубина гумификации органического вещества связана с периодом биологической активности почв [1]. Сухоторфяные почвы бугров имеют меньшие значения среднемесячных температур в период климатического лета по сравнению с аналогами без растительности [12]. Именно с этим связаны большие значения атомных отношений $x(H):x(C)$, что косвенно свидетельствует о низкой конденсированности молекул ГК из торфяных горизонтов до верхней границы многолетней мерзлоты. По представлениям ряда исследователей [21–23] образование криогенных пятен является современным процессом. Преобразование органического вещества СТС бугристых торфяников под влиянием биохимических процессов более активно протекает в торфяниках без растительного покрова и может служить модельной основой современного диагенеза болотных почв в условиях меняющегося климата.

Как видно из рис. 2, происходит накопление более конденсированных молекул в структуре ГК вниз по профилю, диагностируемое по отношению $x(H):x(C)$ для препаратов ГК из почв оголенных торфяных пятен с 1,05 до 0,82 и для сухоторфяных мерзлотных почв бугров с 1,16 до 0,90, что обусловлено эволюционным отбором термодинамически устойчивых структур и определяет высокую степень гумификации ПОВ в нижних слоях. Это связано с показателем степени разложения торфа, который возрастает вниз по профилю от 15–20 % для моховых видов торфа СТС до 30–40 % вахтово-осоковых и осоковых видов центральной части и до 35–50 % древесно-осокового и древесного торфа нижних слоев [12]. Установлена значимая корреляционная связь отношения $x(C):x(H)$ ГК со степенью разложения торфа ($r=0,52$, $n=118$, $r_{5\%}=0,47$).

Компоненты лигнина во многом определяют степень ароматичности ГК. Массовая доля лигнина в мхах и лишайниках колеблется от 8 до 10 %, что меньше, чем в кустарниковой и древесной (20–30 %) или травянистой (15–20 %) растительности [1]. Увеличение доли травянистой растительности с глубины 60 см и древесной растительности в нижних торфяных слоях обуславливает уменьшение атомного отношения $x(H):x(C)$ ГК по профилю [12].

На глубине 20–60 см почв оголенных торфяных пятен отмечается накопление конденсированных фрагментов ГК, обусловленное низкими показателями $x(H):x(C)$. Это может быть связано с динамическими процессами оттаивания–замерзания в многолетнемерзлых породах (ММП), приводящими к расщеплению молекул ГК и уменьшению содержания конденсированных структур [12]. Отсутствие мха, имеющего низкую теплопроводность, способствует большему градиенту температур в зимний период в почвах оголенных торфяных пятен.

Таблица 1. Элементный состав ГК

Table 1. Elemental composition of humic acids (HAs)

Горизонт/глубина, см Horizon/depth, cm	Массовая доля/Mass fraction, %				Мольные отношения ¹ /Molar ratios ¹			Степень окисленности, ω^2 Degree of oxidation, ω^2
	C	N	H	O	H:C	O:C	C:N	
Разрез 2014-1/Plot 2014-1								
T1 0-10	53,1±1,73	3,45±0,23	5,2±0,5	38,3±1,8	1,16±0,12	0,54±0,11	18,0±1,3	-0,08
T2 10-20	52,9±1,7	3,30±0,22	4,9±0,4	38,9±1,8	1,10±0,11	0,55±0,11	18,7±1,4	-0,00
T3 20-40	53,7±1,7	3,38±0,23	4,8±0,4	38,1±1,8	1,07±0,11	0,53±0,11	18,5±1,4	-0,00
T4 40-60	52,6±1,7	3,18±0,21	4,7±0,4	39,5±1,8	1,06±0,10	0,56±0,10	19,3±1,4	0,07
T5 60-80	52,2±1,7	2,98±0,20	4,3±0,4	40,6±1,7	0,98±0,10	0,58±0,10	20,4±1,5	0,19
T6 80-100	59,3±1,9	3,51±0,24	4,5±0,4	32,7±2,0	0,92±0,09	0,41±0,09	19,7±1,5	-0,09
T7 100-150	60,8±2,0	3,90±0,26	4,6±0,4	32,7±2,0	0,90±0,09	0,38±0,09	18,2±1,4	-0,15
T8 150-175	56,3±1,8	3,17±0,21	4,4±0,4	36,1±1,9	0,94±0,09	0,48±0,10	20,7±1,5	0,02
T9 175-200	55,8±1,8	3,44±0,23	4,5±0,4	36,2±1,9	0,98±0,10	0,49±0,10	18,9±1,4	-0,01
Разрез 2014-2/Plot 2014-2								
T _{криог} 0-5	54,1±1,7	3,48±0,23	4,7±0,4	37,7±1,8	1,05±0,10	0,52±0,10	18,1±1,3	-0,00
T1 5-20	52,0±1,7	3,15±0,21	4,4±0,4	40,5±1,7	1,01±0,10	0,59±0,10	19,2±1,4	0,16
T2 20-40	52,2±1,7	2,2±0,4	3,6±0,3	42,0±1,8	0,82±0,08	0,60±0,09	28,1±2,1	0,38
T3 40-60	50,1±1,6	2,2±0,4	3,5±0,3	44,2±1,7	0,83±0,08	0,66±0,09	26,7±2,0	0,49
T4 60-80	51,1±1,6	2,93±0,20	4,0±0,4	42,0±1,7	0,93±0,09	0,62±0,09	20,3±1,5	0,30
T5 80-100	60,8±2,0	3,78±0,25	4,7±0,4	30,7±2,0	0,93±0,09	0,38±0,09	18,8±1,4	-0,17
T6 100-150	60,6±1,9	3,64±0,24	4,6±0,4	31,2±2,0	0,91±0,09	0,39±0,09	19,4±1,4	-0,14
T7 150-175	57,1±1,8	3,63±0,24	4,4±0,4	34,9±1,9	0,92±0,09	0,46±0,09	18,4±1,4	0,00
T8 175-200	56,3±1,8	3,56±0,24	4,3±0,4	35,8±1,9	0,92±0,09	0,48±0,09	18,5±1,4	0,03

Примечания/Notes: ¹ H:C=x(H):x(C), O:C=x(O):x(C), C:N=x(C):x(N). ² $\omega=(2 \cdot x(O)-x(H)):x(C)$. ³ $\pm \Delta$ – границы интервала абсолютной погрешности при P=0,95/ denotes the absolute error limits at P=0,95.

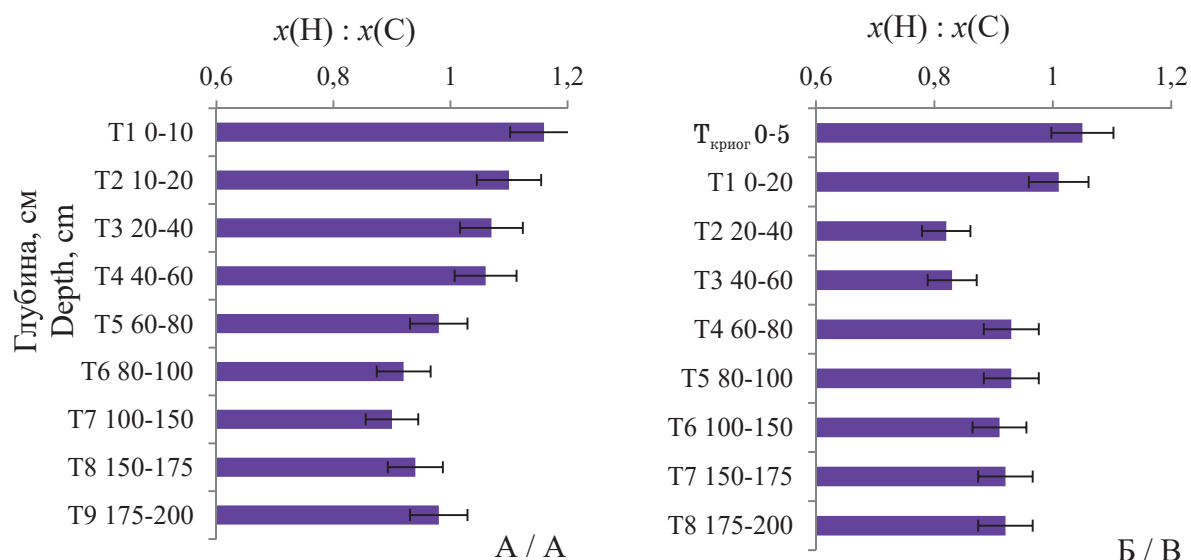


Рис. 2. Мольные отношения $x(H):x(C)$ в ГК из разрезов 2014-1 (А) и 2014-2 (Б)

Fig. 2. Molar ratios $x(H):x(C)$ in HAs from plots 2014-1 (A) and 2014-2 (B)

С глубины 80 см данные элементного состава ГК двух разрезов однотипны, что может свидетельствовать о реликтовости гумуса, который является продуктом диагенеза атлантического периода с более благоприятными по сравнению с современными климатическими условиями.

Анализ данных по содержанию кислорода и степени окисленности ГК из бугристых торфяников и ГК минеральных тундровых почв [24] выявил, что ГК торфяников представлены более редукционными молекулами, что связано с анаэробными условиями почвообразования.

Анализ полученных гель-хроматограмм ГК мерзлотных бугристых торфяников выявил наличие

трёх экстремумов, соответствующих трём фракциям ГК: высокомолекулярной (ВМФ/НМФ) 368–468 кДа (рис. 3, область а), среднемолекулярной (СМФ/ММФ) 14,6–22,0 кДа (рис. 3, область б) и низкомолекулярной (НМФ/ЛМФ) 1,1–1,6 кДа (рис. 3, область в).

В качестве образца для сравнения был выбран ГК подзолистого горизонта A2hg торфянисто-подзолистое поверхностно-оглеённой почвы [3], так как данный образец имеет четкое распределение хроматографических пиков на три фракции, что позволяет унифицировать процедуру разделения высоко-, средне- и низкомолекулярной фракций и проводить сравнительный анализ всех исследуемых препаратов ГК.

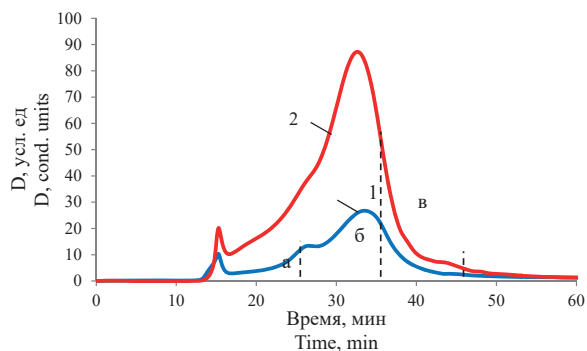


Рис. 3. Типичные гель-хроматограммы: 1 – ГК горизонта A2hg торфянисто-подзолистого поверхностно-оглеенной почвы (образец сравнения) [3]; 2 – ГК горизонта T_{кряг} (0–5 см) почв оголенных торфяных пятен

Fig. 3. Typical gel chromatograms: 1 – HAs from horizon A2hg of peaty-podzolic surface-gley soil (a reference sample) [3]; 2 – HAs horizon T_{кряг} (0–5 cm) of the soil from bare peat spots

В работе [20] было показано, что форма кривых гель-хроматограмм, а также положение максимума существенно зависит как от фракционного состава ГК, так и от их генезиса. Области на гель-хроматограммах, которые относятся к различным фракциям, имеют разные площади, свидетельствующие об их количественном содержании в образцах ГК. Кривые ММР всех исследованных ГК имеют интенсивный максимум в области низкомолекулярной фракции. Доля НМФ в ГК торфяных почв преобладает и составляет от 64,5 до 82,6 % и статистически достоверно превышает долю СМФ (16,7–32,9 %) и ВМФ (0,8–3,8 %) в составе ГК (табл. 2).

Таблица 2. Молекулярно-массовое распределение ГК

Table 2. Molecular mass distribution of HAs

Горизонт/ глубина, см Horizon/ depth, cm	ВМФ/НМФ				СМФ/ММФ				НМФ/ЛМФ				Mn, кДа, кДа	S	Mw, кДа, кДа	S	Mz, кДа, кДа	S	Mw/ Mn
	Mr, кДа, кДа	S'	Мольная доля Molar fraction, %		Mr, кДа, кДа	S	Мольная доля Molar fraction, %		Mr, кДа, кДа	S	Мольная доля Molar fraction, %								
			x	S			x	S			x	S							
Разрез 2014-1/Plot 2014-1																			
T1 0-10	418	3	3,65	0,17	20,2	0,3	28,2	0,26	1,19	0,00	68,1	0,4	21,8	0,7	298,2	0,4	411	3	13,7
T2 10-20	408	4	3,0	0,3	19,7	0,6	27,2	0,4	1,19	0,01	69,8	0,7	18,5	1,7	277	10	400	4	15,0
T3 20-40	403,6	1,0	1,82	0,14	17,6	0,5	23,07	0,16	1,10	0,03	75,1	0,3	12,2	0,7	248	4	394,3	0,9	20,3
T4 40-60	389	5	1,21	0,06	16,32	0,00	22,77	0,18	1,18	0,03	76,02	0,24	9,3	0,3	203	7	378	5	21,8
T5 60-80	391,1	2,9	0,83	0,00	15,52	0,04	21,39	0,08	1,26	0,00	77,78	0,08	7,55	0,02	175,6	2,8	376,171	3,180	23,2
T6 80-100	367,97	0,00	0,96	0,04	16,04	0,24	19,20	0,11	1,05	0,01	79,88	0,15	7,44	0,20	181,3	2,7	354,859	0,112	24,4
T7 100-150	370	4	1,44	0,18	18,0	0,4	20	7	1,18	0,02	79	7	9,9	0,6	210	30	359,022	1,161	21,1
T8 150-175	372,5	0,9	1,69	0,06	18,73	0,14	28,58	0,28	1,31	0,01	69,7	0,3	12,6	0,3	194,8	1,1	357,809	0,807	15,5
T9 175-200	376	8	2,28	0,05	20,2	0,7	32,9	0,9	1,45	0,14	64,8	1,0	16,1	0,4	208	8	362,109	9,479	12,9
Разрез 2014-2/Plot 2014-2																			
Tкрюг 0-5	440	15	3,80	0,11	20,4	0,5	27,46	0,22	1,20	0,06	68,75	0,11	23,07	0,05	322	12	430	20	14,0
T1 5-20	400	4	3,60	0,21	22,0	0,3	30,01	0,22	1,27	0,00	66,4	0,4	21,78	1,13	270	7	391	4	12,4
T2 20-40	386	4	2,7	0,2	20,3	0,6	29,05	0,10	1,27	0,04	68,2	0,3	17,2	0,8	241,8	1,5	376	4	14,0
T3 40-60	467,9	2,3	0,75	0,03	14,55	0,21	16,70	0,06	1,20	0,04	82,56	0,10	6,91	0,20	242	7	458,1	2,5	35,0
T4 60-80	379,0	2,8	1,45	0,08	17,68	0,26	25,50	0,20	1,27	0,03	73,04	0,12	10,94	0,26	198,0	2,9	365,5	2,4	18,1
T5 80-100	383,68	0,00	1,28	0,13	17,4	0,5	23,8	0,4	1,18	0,01	74,9	0,6	9,9	0,7	197	7	370,0	0,4	19,8
T6 100-150	390,4	1,9	1,67	0,09	17,5	0,3	25,00	0,17	1,25	0,04	73,33	0,08	11,8	0,4	222	3	379,4	1,8	18,8
T7 150-175	390	5	2,90	0,18	20,3	0,8	32,6	0,4	1,57	0,09	64,51	0,20	18,9	0,7	239,6	0,4	379	5	12,7
T8 175-200	364	4	1,02	0,00	17,2	0,5	25,05	0,02	1,24	0,08	73,93	0,02	8,95	0,02	159,8	2,8	346	5	17,9

¹ – Стандартное отклонение/Standard deviation.

Полученные значения среднечисловых молекулярных масс исследованных препаратов ГК сопоставимы с данными литературы [1, 20] и имеют значительную вариацию (от 6,9 до 23,1 кДа) по профилю. Распределение среднечисловых молекулярных масс ГК двух разрезов имеет бимодальный характер, с максимальными значениями в верхней и нижней частях профиля (рис. 4, табл. 2). Наибольшие среднечисловые молекулярные массы ГК (Mn 21,8–23,1 кДа) приурочены к верхним горизонтам СТС, за счёт большего вклада высоко- и среднемoleкулярных фракций (табл. 2).

По данным ¹³C ЯМР-спектроскопии [13] образцы ГК из верхних горизонтов СТС характеризуются наибольшей долей неокисленных алифатических и углеводных фрагментов, что обуславливает значительные линейные размеры молекул (стоксовских радиусов) за счёт длинных неразветвленных углеродных цепей парафиновых фрагментов, олиго- и полисахаридных остатков. Это положение подтверждается значимой корреляцией отношения x(H):x(C) с мольной долей высокомолекулярной фракции (r=0,50, r_{5%}=0,46, n=18, P=0,95), а также значимой корреляцией степени разложения торфа с массовой долей среднемoleкулярной фракции (r=0,58). Аналогичные закономерности взаимосвязи высокомолекулярной фракции с содержанием алифатических фрагментов получены для минеральных почв тундровой зоны Республики Коми [25].

Увеличение степени разложения торфа вниз по профилю почв в пределах СТС (до глубины 40–60 см) и связанная с этим большая гумифика-

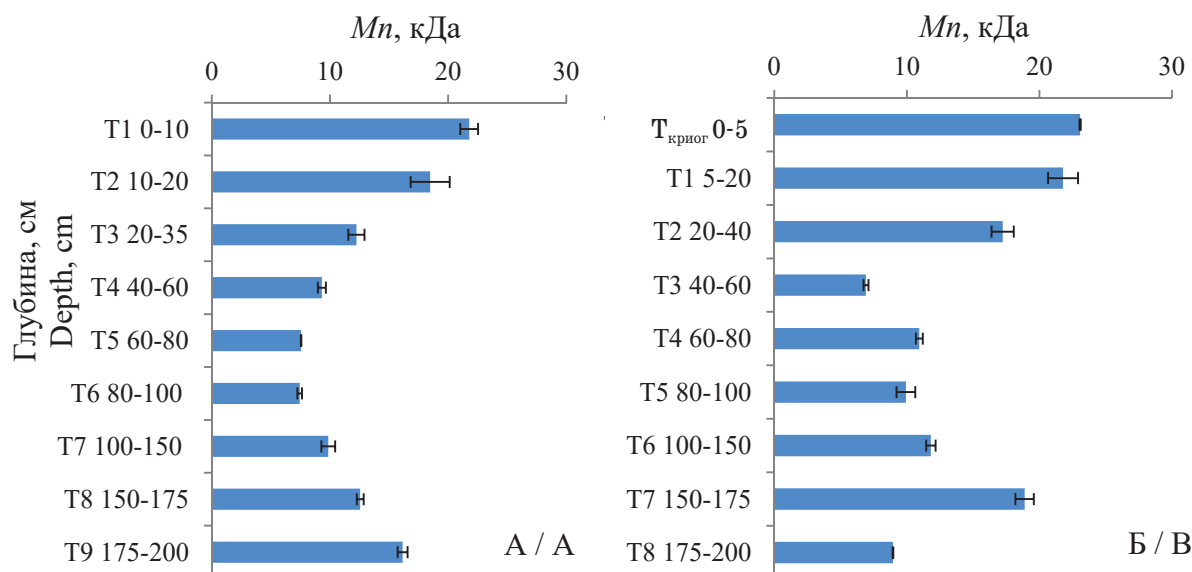


Рис. 4. Среднечисловые молекулярные массы ГК разрезов 2014–1 (А) и 2014–2 (Б)

Fig. 4. Number average molecular weight of the HAs of the plots 2014–1 (A) and 2014–2 (B)

ция органического материала определяют плановое уменьшение Mn ГК. Это обуславливает трансформацию неразветвленных длинноцепочечных алифатических структур в составе ГК до цепочек структур с небольшим числом атомов углерода (согласно ^{13}C -ЯМР спектроскопии), а также уменьшение доли парафиновых и углеводных фрагментов в ГК из верхней части СТС [13].

Анализ ММР ГК из многолетнемерзлых пород характеризуется уменьшением среднечисловых ММ ГК (6,9–13,3 кДа) преимущественно за счёт уменьшения доли высокомолекулярной фракции от 3,8 % в СТС до 0,8 % в ММП. Особенно интенсивно её изменение на границе ММП. Минимальное значение среднечисловой молекулярной массы ГК (6,9 кДа) на границе ММП почв оголенных торфяных пятен (40–60 см) может быть обусловлено динамическими процессами оттаивания и замерзания за счёт расклинивающего действия плёнок воды, приводящих к трансформации крупных молекулярных структур с понижением молекулярных масс. Этим горизонтантам соответствуют ГК с большей степенью ароматичности молекул, по данным ^{13}C ЯМР-спектроскопии, и меньшей долей неокисленных алифатических фрагментов. Также это может быть связано с изменением ботанического состава торфа. Важно отметить, что с глубины 100–150 см наблюдается постепенное увеличение зольности образцов торфяных почв с 40 до 90 % в органоминеральных горизонтах нижней части профиля [12]. Увеличение среднечисловой ММ ГК в многолетнемерзлой толще, вероятно, обусловлено коагуляцией ГК на минеральной матрице торфяных отложений с образованием высокомолекулярных ГК.

Полидисперсность – количественная характеристика степени отклонения ММР от монодисперсного, состоящего из молекул одной величины. Полидис-

персность является следствием случайного характера реакций образования биополимера, а в некоторых случаях и следствием разрушения или соединения макромолекул. Индекс полидисперсности Mw/Mn ГК имеет некоторый тренд на увеличение в центральной части профиля с максимальным значением для образца ГК на границе ММП почв оголенных торфяных пятен (40–60 см), диагностирующий резкое увеличение дисперсности ГК (табл. 2). Этому горизонту соответствует препарат ГК с наиболее широким спектром молекулярных масс. Средневесовая ММ ГК больше среднечисловой, так как наличие значительного количества более низкомолекулярных частиц в исследуемой фракции полимера приводит к существенному снижению среднечисловой ММ.

Закключение

Таким образом, проведен анализ молекулярно-массового распределения гуминовых кислот, выделенных из почв бугристых торфяников. Показано, что содержание низкомолекулярных фракций гуминовых кислот превалирует и значимо превышает долю средне- и высокомолекулярных фракций. Максимальные среднечисловые молекулярные массы гуминовых кислот приурочены к верхним горизонтам сезонно-талого слоя, за счёт вклада средне- и высокомолекулярных фракций. Наибольшей полидисперсностью обладают гуминовые кислоты, приходящиеся на границу многолетнемерзлых пород, что обусловлено динамическими криогенными процессами замерзания–оттаивания. Полученные результаты молекулярно-массового распределения гуминовых кислот исследованных бугристых болот в большей степени соответствуют гипотезе О.А. Трубецкого [8], согласно которой ВМФ ГК состоят в основном из разветвленных алифатических цепочек с преобладанием

аминокислотных, спиртовых, алкильных и углеводных фрагментов, а в НМФ ГК в большей степени находятся ароматические структуры.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-60195 (№ ЦИТус АААА-А18-118062090029-0).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Orlov D.S. Humic substances of soils and general theory of humification. – London: Taylor & Francis, 1995. – 266 p.
2. Wershaw R.L. The study of humic substances – in search of a paradigm / Humic substances. Versatile components of plants, soils and water. – Sawston: Woodhead Publishing. 2000. – P. 1–7. – DOI: 10.1016/B978-1-85573-807-2.50005-9.
3. Лодыгин Е.Д., Безносиков В.А., Василевич Р.С. Изучение полидисперсности гумусовых веществ методом гель-хроматографии // Доклады Россельхозакадемии. – 2012. – № 4. – С. 24–27. – DOI: 10.3103/S1068367412040118.
4. Трубецкой О.А., Трубецкая О.Е. Трехмерный флуоресцентный анализ почвенных гуминовых кислот чернозема и их электрофоретических фракций // Почвоведение. – 2017. – № 9. – С. 1057–1064. DOI: 10.7868/S0032180X17090088.
5. Piccolo A., Conte P., Cozzolino A. Differences in high performance size exclusion chromatography between humic substances and macromolecular polymers / Humic substances. Versatile components of plants, soils and water. – Sawston: Woodhead Publishing. 2000. – P. 111–124. DOI: 10.1016/B978-1-85573-807-2.50013-8.
6. Molecular Size Distribution of Fluorophores in Aquatic Natural Organic Matter: Application of HPSEC with Multi-Wavelength Absorption and Fluorescence Detection Following LPSEC-PAGE Fractionation / O.A. Trubetskoy, C. Richard, G. Vyard, V.V. Marchenkov, O.E. Trubetskaya // Environ. Sci. Technol. – 2018. – V. 52. – P. 5287–5295. DOI: 10.1021/acs.est.7b03924.
7. Schnitzer M. Humic substances: chemistry and reactions / Developments in Soil Science. – 1978. – V. 8. – P. 1–64.
8. Трубецкой О.А., Трубецкая О.Е. ¹³C-ЯМР анализ компонентов гуминовой кислоты чернозема и ее фракций различного молекулярного размера и электрофоретической подвижности // Почвоведение. – 2011. – № 3. – С. 311–316.
9. Атлас почв Республики Коми / под ред. Г.В. Добровольского, А.И. Таскаева, И.В. Забавой. – Сыктывкар: ООО «Коми республиканская типография», 2010. – 356 с.
10. Каверин Д.А., Пастухов А.В. Генетическая характеристика мерзлотных оголенных пятен на плоскобугристых торфяниках Большеземельской тундры // Известия Самарского научного центра РАН. – 2013. – Т. 15. – № 3. – С. 55–62.
11. Пьявченко Н.И. Бугристые торфяники. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – 278 с.
12. Василевич Р.С., Безносиков В.А. Влияние изменения климата в голоцене на профильное распределение гумусовых веществ бугристых торфяников лесотундры // Почвоведение. – 2017. – № 11. – С. 1312–1324. DOI: 10.7868/S0032180X17090106.
13. Molecular composition of raw peat and humic substances from permafrost peat soils of European Northeast Russia as climate change markers / R. Vasilevich, E. Lodygin, V. Beznosikov, E. Abakumov // Science of the Total Environment. – 2018. – V. 615. – P. 1229–1238. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.10.053.
14. Multi-proxy study of soil organic matter dynamics in permafrost peat deposits reveal vulnerability to climate change in the European Russian Arctic / J. Routh, G. Hugelius, P. Kuhryb, T. Filley, P.K. Tillman, M. Becher, P. Crill // Chemical Geology. – 2014. – V. 368. – P. 104–117. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2013.12.022.
15. Swift R.S. Methods of soil analysis // Soil Sci. Soc. Amer. – 1996. – V. 3. – P. 1018–1020.
16. Справочник биохимика / Р. Досон, Д. Эллиот, У. Эллиот, К. Джонс. – М.: Мир, 1991. – 544 с.
17. Swift R.S. Molecular weight, size, shape and charge characteristics of humic substances: Some basic considerations // Humic substances II: In search of structure / Eds. M.H.B. Hayes, P. MacCarthy, R.L. Malcolm, R.S. Swift. – N.-Y.: John Wiley and Sons, 1989. – P. 449–465.
18. Орлов Д.С. Химия почв. – М.: Изд-во Московского государственного университета, 1992. – 259 с.
19. Striegel A.M. Size-exclusion chromatography / In Liquid Chromatography. 2nd ed. / Eds. S. Fanali, P.R. Haddad, C.F. Poole, M.-L. Riekkola – Amsterdam: Elsevier, 2017. – P. 245–273. DOI: 10.1016/B978-0-12-805393-5.00010-5.
20. Куликова Н.А., Перминова И.В., Кудрявцев А.В. Сравнительная характеристика молекулярно-массового распределения водорастворимых гуминовых веществ, гуминовых и фульвокислот дерново-подзолистых почв // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. – 2010. – № 4. – С. 20–23.
21. Oksanen P.O., Kuhry P., Alekseeva R.N. Holocene development of the Rogovaya River peat plateau, East-European Russian Arctic // The Holocene. – 2001. – V. 11. – № 1. – P. 25–40. DOI: 10.1191/095968301675477157.
22. Oksanen P.O., Kuhry P., Alekseeva R.N. Holocene development and permafrost history of the Usinsk mire, northeast European Russia // Geographie Physique et Quaternaire. – 2003. – V. 57. – № 2–3. – P. 169–187. DOI: 10.7202/011312ar.
23. Zuidhoff F.S. Palsa Growth and Decay in Northern Sweden, Climatic and environmental controls // Comprehensive summaries of Uppsala dissertations from the faculty of science and technology. – Uppsala: Acta universitatis upsaliensis, 2003. – 30 p.
24. Lodygin E., Beznosikov V., Abakumov E. Humic substances elemental composition of selected taiga and tundra soils from Russian European North-East // Polish Polar Research. – 2017. – V. 38. – № 2. – P. 125–147. DOI: 10.1515/popore-2017-0007.
25. Василевич Р.С., Лодыгин Е.Д., Безносиков В.А. Молекулярно-массовое распределение гумусовых веществ экстрагированных из тундровых почв европейского северо-востока России // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 3: Биология. – 2015. – № 4. – С. 103–111.

Поступила: 24.01.2019 г.

Информация об авторах

Василевич Р.С., кандидат биологических наук, старший научный сотрудник отдела почвоведения Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук.

Вежов К.С., инженер-исследователь отдела почвоведения Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук.

Лодыгин Е.Д., доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник отдела почвоведения Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук.

UDC 631.417.2

MOLECULAR-MASS DISTRIBUTION OF HUMIC ACIDS OF PERMAFROST PEAT MOUNDS FROM THE EUROPEAN NORTH-EAST OF RUSSIA

Roman S. Vasilevich¹,
vasilevich.r.s@ib.komisc.ru

Kirill S. Vezhov¹,
vezhov@ib.komisc.ru

Evgeny D. Lodygin¹,
lodygin@ib.komisc.ru

¹ Institute of Biology, Komi Science Center, Ural Branch, Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya street, Syktyvkar, 167982, Russia.

The relevance of the research is caused by the polydispersity of humic acids and their insufficient study in peat soils of cryolithozone.

The main aim of the research is to study the molecular mass distribution of humic acids in soils of mounds peatlands.

Objects of the research are humic acid preparations isolated from two permafrost peats – from dry cryogenic soil of mounds (Hemic Follic Cryic Histosols) and soil from bare peat spots (Hemic Follic Cryic Histosols (Turbic)), over the entire depth of peat deposits.

Methods: elemental composition, liquid gel chromatography.

Results. The authors have studied the molecular-mass distribution of humic acid preparations isolated from the hilly peatlands of the European North-East of Russia. The patterns of its changes along the profile are revealed. It was shown that the proportion of the low molecular weight fraction of humic acids in peat dominates and statistically significantly exceeds the mass fractions of the middle and high molecular weight fractions. The profile distribution of the number average molecular weights of humic acids of the two plots has a bimodal character, with maximum values in the upper and lower parts of the profile. High values in the upper part of the profile are associated with the presence of long unbranched carbon chains of paraffin fragments and fragments of oligo- and polysaccharides, leading to increase in the linear dimensions of humic acid molecules. The degradation of paraffin and carbohydrate fragments down the peat profile, leads to decrease in molecular weights of humic acids. The correlation dependences between the ratio $x(H):x(C)$ and high molecular weight fractions of humic acids were established. The increase in molecular weights in the lower part of the profile is caused by coagulation of dispersed humic acids on peat mineral matrix. Cryogenic processes on the border of permafrost lead to significant transformation of humic acid structure with splitting off the least condensed molecular fragments. This is clearly reflected in decrease of molecular weights and polydispersity index of humic acids.

Key words:

Tundra zone, peat mounds, humic acids, molecular weight distribution, gel chromatography.

The research was financially supported by the RFBR within the scientific project no. 18-05-60195 (no. TsITiS AAAA-A18-118062090029-0).

REFERENCES

- Orlov D.S. *Humic substances of soils and general theory of humification*. London, Taylor & Francis, 1995. 266 p.
- Wershaw R.L. The study of humic substances – in search of a paradigm. *Humic substances. Versatile components of plants, soils and water*. Sawston, Woodhead Publishing, 2000. pp. 1–7. DOI: 10.1016/B978-1-85573-807-2.50005-9.
- Lodygin E.D., Beznosikov V.A., Vasilevich R.S. Study of polydispersity of humic substances by the gel chromatography method. *Russian Agricultural Sciences*, 2012, vol. 38, no. 4, pp. 293–296. DOI: 10.3103/S1068367412040118.
- Trubetskoi O.A., Trubetskaya O.E. Three-dimensional fluorescence analysis of chernozem humic acids and their electrophoretic fractions. *Eurasian Soil Science*, 2017, vol. 50, no. 9, pp. 1018–1024. DOI: 10.1134/S1064229317090083.
- Piccolo A., Conte P., Cozzolino A. Differences in high performance size exclusion chromatography between humic substances and macromolecular polymers. *Humic substances. Versatile components of plants, soils and water*. Sawston, Woodhead Publishing, 2000, pp. 111–124. DOI: 10.1016/B978-1-85573-807-2.50013-8.
- Trubetskoi O.A., Richard C., Voyard G., Marchenkov V.V., Trubetskaya O.E. Molecular Size Distribution of Fluorophores in Aquatic Natural Organic Matter: Application of HPSEC with Multi-Wavelength Absorption and Fluorescence Detection Following LPSEC-PAGE Fractionation. *Environ. Sci. Technol.*, 2018, vol. 52, pp. 5287–5295. DOI: 10.1021/acs.est.7b03924.
- Schnitzer M. Humic substances: chemistry and reactions. *Developments in Soil Science*, 1978, vol. 8, pp. 1–64.
- Trubetskoi O.A., Trubetskaya O.E. ¹³C-NMR analysis of components of chernozem humic acids and their fractions with different molecular sizes and electrophoretic mobilities. *Eurasian Soil Science*, 2011, vol. 44, no. 3, pp. 281–285. DOI: 10.1134/S1064229311030148.
- Atlas pochv Respubliki Komi* [Soil Atlas of the Komi Republic]. Eds. G.V. Dobrovolsky, A.I. Taskaev, I.V. Zaboeva. Syktyvkar, LC «Komi Republic Publishing House», 2010. 356 p.
- Kaverin D.A., Pastukhov A.V. Geneticheskaya kharakteristika merzlotnykh ogolennykh pyaten na ploskobugristykh torfyanikakh Bolshezemelskoy tundry [Genetic characteristics of permafrost-affected soils formed in bare circles of peat plateaus in Bolshezemelskaya tundra]. *Izvestiya Samarского nauchnogo tsentra RAN*, 2013, vol. 15, no 3, pp. 55–62. In Rus.
- Pyavchenko N.I. *Bugristye torfyaniky* [Hummocky peat bogs]. Moscow, AS USSR Publ., 1955. 278 p.
- Vasilevich R.S., Beznosikov V.A. Effect of climate changes in the Holocene on the distribution of humic substances in the profile of forest-tundra peat mounds. *Eurasian Soil Science*, 2017, vol. 50, no. 11, pp. 1271–1282. DOI: 10.1134/S1064229317090101.

13. Vasilevich R., Lodygin E., Beznosikov V., Abakumov E. Molecular composition of raw peat and humic substances from permafrost peat soils of European Northeast Russia as climate change markers. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 615, pp. 1229–1238. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.10.053.
14. Routh J., Hugelius G., Kuhryb P., Filley T., Tillman P.K., Becher M., Crill P. Multi-proxy study of soil organic matter dynamics in permafrost peat deposits reveal vulnerability to climate change in the European Russian Arctic. *Chemical Geology*, 2014, vol. 368, pp. 104–117. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2013.12.022.
15. Swift R.S. Methods of soil analysis. *Soil Sci. Soc. Amer.*, 1996, vol. 3, pp. 1018–1020.
16. Doson R., Alliot D., Alliot U., Jons K. *Spravochnik biokhimiya* [Biochemistry handbook]. Moscow, Mir Publ., 1991. 544 p.
17. Swift R.S. Molecular weight, size, shape and charge characteristics of humic substances: Some basic considerations. *Humic substances II: In search of structure*. Eds. M.H.B. Hayes, P. MacCarthy, R.L. Malcolm, R.S. Swift. N.-Y., John Wiley and Sons, 1989. pp. 449–465.
18. Orlov D.S. *Khimiya pochv* [Chemistry of soils]. Moscow, Moscow State University Publ. House, 1992. 259 p.
19. Striegel A.M. Size-exclusion chromatography. *Liquid Chromatography*. 2nd ed. Eds. S. Fanali, P.R. Haddad, C.F. Poole, M.-L. Riekkola. Amsterdam: Elsevier, 2017. pp. 245–273. DOI: 10.1016/B978-0-12-805393-5.00010-5.
20. Kulikova N.A., Perminova I.V., Kudryavtsev A.V. Sravnitel'naya kharakteristika molekulyarno-massovogo raspredeleniya vodorstvorimyykh guminovykh veshchestv, guminovykh i fulvokislot dornovo-podzolistykh pochv [Comparative characteristics of the molecular mass distribution of water-soluble humic substances, humic and fulvic acids of sod-podzolic soils]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17: Pochvovedenie*, 2010, no. 4, pp. 20–23.
21. Oksanen P.O., Kuhry P., Alekseeva R.N. Holocene development of the Rogovaya River peat plateau, East-European Russian Arctic. *The Holocene*, 2001, vol. 11, no. 1, pp. 25–40. DOI: 10.1191/095968301675477157.
22. Oksanen P.O., Kuhry P., Alekseeva R.N. Holocene development and permafrost history of the Usinsk mire, northeast European Russia. *Geographie Physique et Quaternaire*, 2003, vol. 57, no 2–3, pp. 169–187. DOI: 10.7202/011312ar.
23. Zuidhoff F.S. Palsa Growth and Decay in Northern Sweden, Climatic and environmental controls. *Comprehensive summaries of Uppsala dissertations from the faculty of science and technology*. Uppsala, Acta universitatis upsaliensis, 2003. 30 p.
24. Lodygin E., Beznosikov V., Abakumov E. Humic substances elemental composition of selected taiga and tundra soils from Russian European North-East. *Polish Polar Research*, 2017, vol. 38, no. 2, pp. 125–147. DOI: 10.1515/popore-2017-0007.
25. Vasilevich R.S., Lodygin E.D., Beznosikov V.A. Molecular-mass distribution of tundra soils humic substances from the European northeast of Russia. *Biological Communications*, 2015, no 4, pp. 103–111. In Rus.

Received: 24 January 2019.

Information about the authors

Roman S. Vasilevich, Cand. Sc., senior researcher, Komi Science Center, Ural Branch, Russian Academy of Sciences.

Kirill S. Vezhov, research engineer, Komi Science Center, Ural Branch, Russian Academy of Sciences.

Evgeny D. Lodygin, Dr. Sc., leading researcher, Komi Science Center, Ural Branch, Russian Academy of Sciences.

УДК 004.021

СТЕГАНОГРАФИЧЕСКОЕ ВСТРАИВАНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ В СНИМКИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА QIM С ПЕРЕМЕННЫМ ШАГОМ КВАНТОВАНИЯ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ

Евсютин Олег Олегович¹,
eoo@keva.tusur.ru

Кокурина Анна Сергеевна¹,
annakokurina94@yandex.ru

Мещеряков Роман Валерьевич²,
mrv@ipu.ru

¹ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.

² Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук,
Россия, 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65.

Актуальность. Одно из направлений обработки цифровых изображений, в том числе снимков дистанционного зондирования Земли, связано со встраиванием в них дополнительной информации различного назначения. Встраивание дополнительной информации в цифровое изображение приводит к искажению естественной модели цифрового изображения, а также к возможному возникновению визуальных артефактов. В случае снимков дистанционного зондирования Земли такие искажения могут повлечь, например, искажение границ объектов, в результате чего дальнейший анализ снимков приведёт к некорректным результатам. Поэтому актуальными являются исследования, направленные на поиск новых способов уменьшения искажений, вызванных встраиванием дополнительной информации.

Цель: повышение качества стеганографического встраивания информации в коэффициенты дискретного косинусного преобразования снимков дистанционного зондирования Земли за счёт разработки улучшенного алгоритма встраивания, основанного на методе QIM и обеспечивающего коррекцию искажений естественной модели изображения в частотной области.

Объекты: алгоритмы стеганографического встраивания информации в коэффициенты дискретного косинусного преобразования цифровых изображений.

Методы: стеганографический метод QIM, методы математической статистики, вычислительные эксперименты.

Результаты. Предлагается новый подход к минимизации искажений естественной модели цифрового изображения в области дискретного косинусного преобразования, основанный на изменении шага квантования в зависимости от локальных характеристик изображения в частотной области. Результатом работы является улучшенный алгоритм встраивания информации в область дискретного косинусного преобразования снимков дистанционного зондирования Земли, объединяющий данный подход к подходу к обеспечению безошибочного извлечения встроеной информации, предложенным авторами ранее. Результаты экспериментов показывают, что разработанный алгоритм наряду с обеспечением безошибочности извлечения позволяет существенно уменьшить искажения, вносимые в частотные коэффициенты, и обеспечить статистическую неразличимость исходных изображений и стегоизображений в 75 % случаев.

Ключевые слова:

Цифровые изображения, стеганография, дискретное косинусное преобразование, QIM, дистанционное зондирование Земли.

Введение

Использование снимков дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) актуально в разных сферах деятельности человека, например, для создания карт местности, мониторинга состояния поверхности Земли, поиска месторождений полезных ископаемых, тектонических исследований, оценки состояния сельскохозяйственных угодий и лесных покровов и т. д. Данные ДЗЗ – это аэрокосмические снимки, т. е. цифровые изображения, следовательно, для их обработки и анализа применяются различные методы обработки и анализа цифровых изображений, такие как сегментация [1], фильтрация и выделение контуров [2], распознавание объектов [3] и другие [4]. Одним из перспективных направлений исследований в области обработки цифровых изображений, в частности снимков ДЗЗ, является сокрытие дополнительной информации в них.

Встраивание информации различного назначения в данные ДЗЗ в настоящее время исследуется многими авторами. В большинстве случаев под сокрытием информации подразумевается встраивание цифровых водяных знаков (ЦВЗ) – информационных последовательностей небольшого объёма, заранее заданных или сгенерированных на основе содержимого контейнера. Обычно целью внедрения ЦВЗ в изображения является защита их подлинности и целостности. Например, в работе [5] представлена схема встраивания ЦВЗ в изображения ДЗЗ с применением векторного квантования. Авторы работы [6] также предлагают обеспечивать целостность снимков ДЗЗ с помощью встраивания ЦВЗ, используя для этого сдвиг гистограммы. Причём описанный ими подход является обратимым, т. е. позволяет полностью восстановить исходный снимок после извлечения встро-

енной информации. В работе [7] представлен алгоритм генерации стойкого ЦВЗ для защиты гиперспектральных изображений ДЗЗ, обеспечивающий высокую устойчивость встроенного ЦВЗ к атакам прямого перебора ключа. Авторы статьи [8] акцентируют внимание на важности слепого обнаружения ЦВЗ и предлагают соответствующий подход.

Другим направлением сокрытия информации в цифровых объектах является стеганографическое встраивание. Цифровая стеганография предназначена для скрытой передачи информации внутри некоторых цифровых объектов. Она может использоваться либо для обеспечения конфиденциальности передаваемых в цифровых контейнерах данных, либо для хранения в цифровых контейнерах некоторого объема информации, обычно большего, чем в случае ЦВЗ. Например, в статье [9] представлен алгоритм скрытия информации в кадрах видеофайлов, полученных со спутников, для безопасной передачи и архивирования конфиденциальных данных. В работе [10] предлагается алгоритм встраивания информации в гиперспектральные снимки ДЗЗ, отличающийся высокой ёмкостью, причём встраивание защищаемой информации комбинируется со сжатием изображений-контейнеров. С помощью методов цифровой стеганографии также возможно скрывать в снимках ДЗЗ различную служебную информацию, связанную с происхождением снимка, с характеристиками зафиксированного участка поверхности Земли и т. д., тем самым уменьшая количество сопутствующих данных, требуемых при хранении и передаче снимка, и упрощая процедуру дальнейшей обработки.

Одним из основных требований к методам встраивания информации является возможность ее последующего безошибочного извлечения. Это особенно актуально для частотного встраивания, когда биты сообщения записываются в коэффициенты, полученные в результате применения к изображению-контейнеру некоторого частотного преобразования. В результате выполнения прямого и обратного частотного преобразования и последующего округления часть информации теряется, и восстановление встроенного сообщения в исходном виде не представляется возможным. Очевидно, что в случае сокрытия служебной информации в снимках ДЗЗ безошибочность извлечения является обязательным критерием эффективности встраивания, поскольку потеря или изменение даже одного–двух битов могут повлечь искажение встроенных данных, что сделает дальнейшую работу с ними бессмысленной.

Ранее авторами настоящего исследования был предложен новый подход к обеспечению безошибочности, заключающийся в итеративном исправлении ошибок при извлечении информации, и получен алгоритм, основанный на методе модуляции индекса квантования (QIM) в области дискретного косинусного преобразования (ДКП), который обеспечивает безошибочность извлечения встроенной информации за счет предложенного подхода [11].

Другим важным требованием к стеганографическим методам является незаметность встраивания, поскольку сокрытие дополнительной информации в цифровом объекте-контейнере не должно оказывать существенного влияния на дальнейшие анализ и обработку контейнера. Во многих случаях внедрение дополнительной информации в элементы данных, составляющие цифровое изображение, нарушает естественный вид модели цифрового изображения. В результате изображения-контейнеры и стегоизображения становятся статистически различимы. Вид искажений зависит от операции встраивания.

Данная работа развивает исследование [11] и предлагает новый подход к минимизации искажений естественной модели цифрового изображения в области ДКП при встраивании по методу QIM, основанный на изменении шага квантования в зависимости от локальных характеристик изображения в частотной области.

Основным результатом работы является новый улучшенный алгоритм встраивания информации в область ДКП цифровых изображений, одновременно обеспечивающий безошибочность встраивания и статистическую неразличимость изображений-контейнеров и стегоизображений. Данный алгоритм может эффективно использоваться для внедрения дополнительной информации в снимки ДЗЗ.

Описание и обоснование решений, лежащих в основе разработанного алгоритма, представлено в следующих разделах данной статьи.

Обеспечение безошибочного извлечения информации, встроенной по методу QIM

Основная идея метода QIM [12] заключается в модуляции яркости пикселей или значений частотных коэффициентов в зависимости от значений встраиваемых битов. Существует большое количество вариаций классического метода QIM. Например, в работе [13] представлена основанная на QIM техника внедрения цифровых водяных знаков для трёхмерных сеток. Авторы работы [14] предлагают улучшенную версию QIM, обеспечивающую устойчивость к масштабированию и ряду других искажений. В [15] представлен вариант метода QIM для JPEG-изображений, направленный на повышение устойчивости к атакам, основанным на гистограммах. В статье [16] описан метод стеганографического встраивания информации в область ДВП для изображений в формате JPEG2000. Авторами работы [17] предлагается использовать двойное вложение в рамках QIM, где один коэффициент модифицируется дважды для встраивания двух битов.

В основе алгоритма, представленного в настоящей статье, лежит формула, предложенная в статье [18]. Исходная формула описывает встраивание информации в пиксели изображения. В настоящей работе она модифицирована для применения к коэффициентам ДКП несжатых цифровых изображений и имеет следующий вид:

$$C'_{x,y} = \begin{cases} \operatorname{sgn} C_{x,y} \left(\left\lfloor \frac{|C_{x,y}|}{q} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{|C_{x,y}|}{q/2} \right\rfloor \right), & \text{если } b_i = 0; \\ \operatorname{sgn} C_{x,y} \left(\left\lfloor \frac{|C_{x,y}|}{q} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{|C_{x,y}|}{q/2} \right\rfloor + \frac{q}{2} \right), & \text{если } b_i = 1; \end{cases} \quad (1)$$

где $C_{x,y}$ – коэффициент ДКП до встраивания; $C'_{x,y}$ – коэффициент ДКП после встраивания; q – шаг квантования; b_i – бит сообщения; $[a]$ – целая

часть a ; $\left\{ \frac{a}{b} \right\}$ – остаток от деления a на b .

Извлечение информации производится по формуле

$$b_i = \begin{cases} 0, & \text{если } \left\{ \frac{|C'_{x,y}|}{q} \right\} < \frac{q}{2}, \\ 1, & \text{если } \left\{ \frac{|C'_{x,y}|}{q} \right\} \geq \frac{q}{2}. \end{cases} \quad (2)$$

Алгоритм, основанный на формулах (1) и (2), сформулирован в статье [11]. Его основной особенностью является безошибочное извлечение информации из стегоиображения за счёт итеративной процедуры встраивания, впервые предложенной авторами настоящей работы в статье [19]. Итеративная процедура встраивания заключается в следующем. На этапе встраивания выполняется извлечение информации с проверкой на наличие ошибок. В случае если при извлечении возникли ошибки, они исправляются, а затем выполняется повторное встраивание информации в уже изменённый блок. Если безошибочного извлечения не удалось достичь за определённое число шагов, блок обрабатывается таким образом, чтобы при извлечении ни один из его элементов не мог быть интерпретирован как содержащий встроенный бит. В данном алгоритме для этих целей применяется встраивание бита-флага в один из заранее выбранных коэффициентов. Областью встраивания является 21 высокочастотный коэффициент блока (с номерами 43–63 при зигзаг-сканировании). Эксперименты, проведенные с данным алгорит-

мом, демонстрируют хорошие показатели ёмкости и визуального качества встраивания, оцениваемого по метрике PSNR.

Искажение гистограммы изображения в области ДКП при встраивании по методу QIM

Несмотря на высокое качество встраивания алгоритм [11] приводит к существенному искажению естественной модели цифрового изображения в частотной области.

Для иллюстрации этой проблемы обратимся к рис. 1, на котором изображены фрагменты гистограмм распределения значений коэффициентов ДКП до и после встраивания информации согласно указанному алгоритму (шаг квантования $q=10$). Вид гистограммы стегоиображения значительно отличается от вида гистограммы оригинального изображения. На гистограмме из рис. 1, б отчётливо заметно возникновение пиков в районе ± 5 , что соответствует величине $\pm q/2$.

Эта проблема [20] является типичной для классического алгоритма QIM. Она связана с тем, что QIM сужает число возможных вариантов значений элементов данных цифрового изображения (пикселей или коэффициентов ДКП), в которые производится встраивание сообщения. В случае конкретного алгоритма возникновение данной проблемы напрямую следует из формулы (1). Например, при встраивании единичного бита в коэффициенты, значения которых близки к нулю, формула преобразуется к виду

$\operatorname{sgn} C_{x,y} \left(|C_{x,y}| + \frac{q}{2} \right)$, что в итоге трансформирует коэффициенты ДКП в значения, близкие к $\pm q/2$.

Существенное искажение естественной модели цифрового изображения в частотной области напрямую связано с незаметностью встраивания, которое обеспечивает практическую применимость алгоритма сокрытия данных в цифровом объекте.

Восстановление естественной модели цифрового изображения за счёт переменного шага квантования

Чтобы решить указанную проблему, алгоритм [11] был модифицирован таким образом, чтобы шаг квантования для каждого блока коэффициентов ДКП зависел от характеристик этого блока.

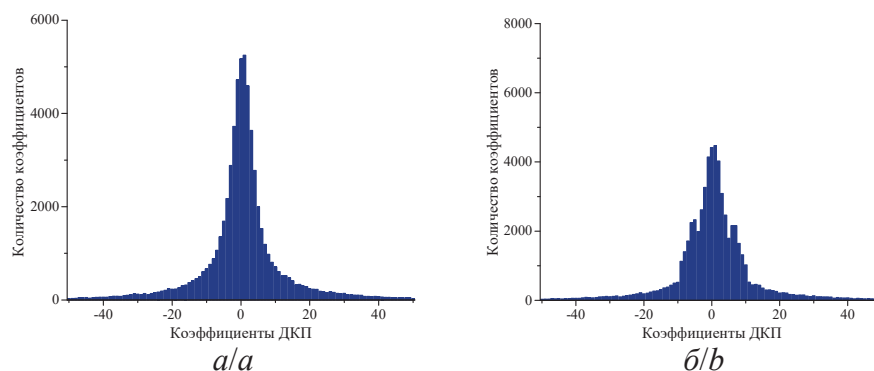


Рис. 1. Гистограммы изображения: а) до встраивания; б) после встраивания

Fig. 1. Image histograms: a) before embedding; b) after embedding

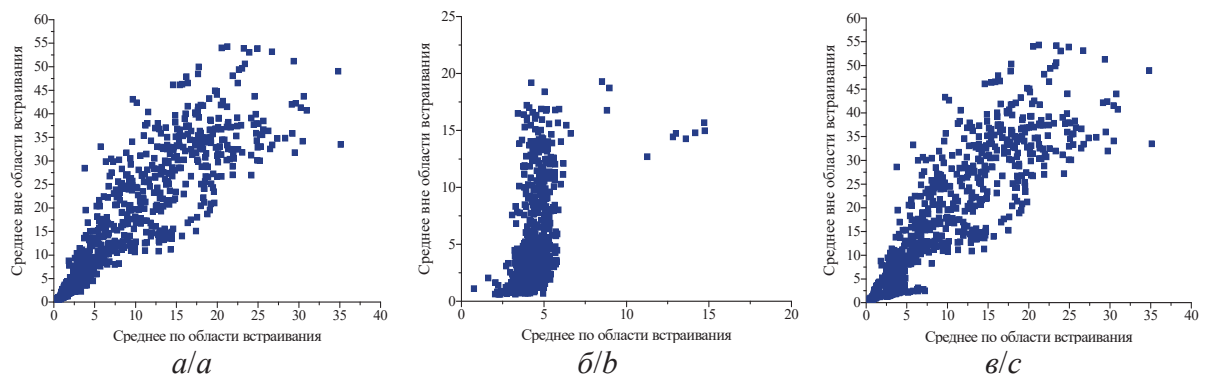


Рис. 2. Соотношение между средними значениями коэффициентов ДКП для: а) изображения-контейнера; б) стегоиображения, полученного по алгоритму [11]; в) стегоиображения, полученного по улучшенному алгоритму [11] с переменным шагом квантования

Fig. 2. Ratio between the average values of DCT coefficients for: a) cover image; b) stego image obtained by the algorithm [11]; c) stego image obtained by the improved algorithm [11] with a variable quantization step

Для этого была введена формула, определяющая величину шага квантования:

$$q_n = \begin{cases} [F / E] \cdot K, & \text{если } F \geq E, \\ [E / F] \cdot K, & \text{если } F < E. \end{cases} \quad (3)$$

где E – среднее значение модулей АС-коэффициентов ДКП по области встраивания; F – среднее значение модулей АС-коэффициентов ДКП вне области встраивания; K – целочисленный коэффициент; n – номер блока коэффициентов ДКП изображения-контейнера.

Идея подобного способа вычисления шага квантования возникла из следующего наблюдения: соотношение между средними значениями коэффициентов одномерного ДКП по области встраивания и вне её имеет схожий характер для разных изображений. На рис. 2, а представлен пример, иллюстрирующий данное соотношение для другого тестового изображения. График на рис. 2, б существенно отличается от графика на рис. 2, а по причине искажения естественной модели цифрового изображения в частотной области за счёт встраивания информации с постоянным шагом квантования (шаг квантования $q=10$). Однако график,

представленный на рис. 2, в, демонстрирует, что встраивание информации с переменным шагом квантования, рассчитанным по формуле (3), позволяет значительно уменьшить изменение данного соотношения.

Рассмотрим влияние произведённой модификации алгоритма на распределение значений коэффициентов ДКП после встраивания. Гистограмма на рис. 3, б содержит явные признаки наличия вложения. Рис. 3, в демонстрирует влияние переменного шага квантования на степень искажений гистограммы: пики сглажены, гистограмма визуально более похожа на гистограмму исходного изображения.

Результаты экспериментов и обсуждение

Для проверки эффективности предложенного подхода к корректировке искажений гистограммы была выполнена проверка статистической значимости различий между гистограммой контейнера и стегоиображения с помощью непараметрического критерия Уилкоксона. В ходе экспериментов использовались 20 тестовых изображений из базы USC-SIPI [21], примеры тестовых изображений представлены на рис. 4. Встраивание произво-

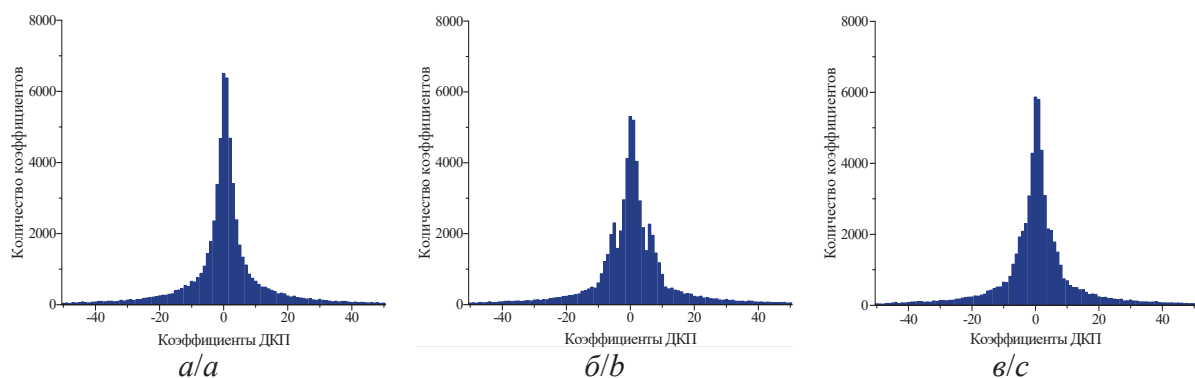


Рис. 3. Гистограммы изображения: а) до встраивания; б) после встраивания с постоянным шагом; в) после встраивания с переменным шагом

Fig. 3. Image histograms: a) before embedding; b) after embedding with a constant step; c) after embedding with variable step



Рис. 4. Примеры тестовых изображений

Fig. 4. Test image examples

дилось только в яркостную составляющую данных изображений, поэтому перед началом экспериментов они были преобразованы в полутоновый вид.

В таблице представлены значения p -уровня значимости для данного критерия. Чтобы две гистограммы считались статистически неразличимыми, должно выполняться условие $p > 0,05$, в таблице такие значения отмечены серым цветом.

Таблица. Проверка статистической различимости гистограмм по критерию Уилкоксона

Table. Checking the statistical legibility of histograms by the Wilcoxon test

Номер изображения Image number	p -уровень значимости/ p -value	
	Постоянное Constant $q=5$	Переменное Variable q
1	$2,65 \cdot 10^{-5}$	0,099
2	$6,21 \cdot 10^{-6}$	0,663
3	$2,03 \cdot 10^{-4}$	0,042
4	$1,68 \cdot 10^{-7}$	0,003
5	$2,75 \cdot 10^{-10}$	0,053
6	$2,06 \cdot 10^{-5}$	0,237
7	$1,46 \cdot 10^{-6}$	0,282
8	$1,87 \cdot 10^{-9}$	0,105
9	$6,41 \cdot 10^{-6}$	0,183
10	$3,63 \cdot 10^{-5}$	0,512
11	$2,54 \cdot 10^{-8}$	0,624
12	$3,90 \cdot 10^{-5}$	0,178
13	$3,83 \cdot 10^{-10}$	0,022
14	$1,57 \cdot 10^{-8}$	0,060
15	$1,37 \cdot 10^{-5}$	0,463
16	$1,50 \cdot 10^{-4}$	0,762
17	$2,67 \cdot 10^{-7}$	0,414
18	$1,63 \cdot 10^{-5}$	0,008
19	$1,23 \cdot 10^{-10}$	0,000
20	$9,63 \cdot 10^{-5}$	0,550

Как видно из таблицы, при встраивании информации с постоянным шагом квантования гистограммы статистически различимы во всех случаях. Для переменного шага квантования гистограммы до и после встраивания информации статистически неразличимы в 75 % случаев. Данный результат наглядно демонстрирует положительное влияние предложенного подхода на уменьшение искажений естественной модели цифрового изображения в ча-

стотной области. При этом качество встраивания улучшилось: при ёмкости 0,11 бит/пиксель среднее значение PSNR составило 40,7 и 41,8 дБ для алгоритмов с постоянным и переменным шагом квантования соответственно.

Заключение

Решение задачи встраивания информации в снимки дистанционного зондирования Земли необходимо искать в совокупности с решением проблемы обеспечения незаметности встраивания, поскольку серьёзные искажения, внесённые в изображение во время внедрения дополнительных данных, могут негативно сказаться на результатах дальнейшего анализа полученных снимков. В настоящей работе был предложен новый подход к минимизации искажений естественной модели цифрового изображения в области дискретного косинусного преобразования при встраивании информации в снимки дистанционного зондирования Земли по методу QIM, основанный на изменении шага квантования в зависимости от локальных характеристик изображения в частотной области. С помощью данного подхода разработан улучшенный алгоритм встраивания информации в область дискретного косинусного преобразования, который обеспечивает не только безошибочное извлечение информации, но и повышение до 75 % статистической неразличимости изображений-контейнеров и стегоизображений. Наличие эффекта от применения предложенного подхода подтверждается результатами проведённых экспериментов. Полученный алгоритм может эффективно применяться для внедрения дополнительной информации в снимки дистанционного зондирования Земли, при этом позволяя избегать возникновения артефактов встраивания, негативно влияющих на дальнейший анализ таких снимков.

Данная работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках проектной части государственного задания федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» на 2017–2019 гг. (проект № 2.3583.2017/4.6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семантическая сегментация данных дистанционного зондирования Земли при помощи нейросетевых алгоритмов / А.А. Друки, В.Г. Спицын, Ю.А. Болотова, А.А. Башлыков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 1. – С. 59–68.
2. Method based on edge constraint and fast marching for road centerline extraction from very high-resolution remote sensing images / L. Gao, W. Shi, Z. Miao, Z. Lv // Remote Sensing. – 2018. – V. 10. – № 6. – article number 900.
3. Казарян М.Л., Рихтер А.А., Шахрамьян М.А. Методика автоматического детектирования компонент объектов захоронения отходов по космическим изображениям // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 328. – № 3. – С. 46–53.
4. Buchnev A.A., Pyatkin V.P., Rusin E.V. Software Technologies for Processing of Earth Remote Sensing Data // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2013. – V. 23. – № 4. – P. 474–480.
5. Serra-Ruiz J., Megias D. A novel semi-fragile forensic watermarking scheme for remote-sensing images // International Journal of Remote Sensing. – 2011. – V. 32. – № 19. – P. 5583–5606.
6. Serra-Ruiz J., Megias D. Reversible data hiding for tampering detection in remote sensing images using histogram shifting // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 2012. – V. 8514. – 85140Y.
7. Митекин В.А. Алгоритм генерации стойкого цифрового водяного знака для защиты гиперспектральных изображений дистанционного зондирования Земли // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39. – № 5. – С. 808–817.
8. Khosravi M.R., Rostami H., Samadi S. Enhancing the binary watermark-based data hiding scheme using an interpolation-based approach for optical remote sensing images // International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems. – 2018. – V. 9. – № 2. – P. 53–71.
9. Akhtarkavan E., Majidi B., Manzuri M.T. Secure communication and archiving of low altitude remote sensing data using high capacity fragile data hiding // Multimedia Tools and Applications. – 2018. – P. 1–27.
10. One-pass lossless data hiding and compression of remote sensing data / B. Carpentieri, A. Castiglione, A. De Santis, F. Palmieri, R. Pizzolante // Future Generation Computer Systems. – 2019. – V. 90. – P. 222–239.
11. Евсютин О.О., Кокурина А.С., Мещеряков Р.В. Алгоритм встраивания информации в цифровые изображения с безопасным извлечением, основанный на методе QIM // Распределенные информационно – вычислительные ресурсы. Наука – цифровой экономике: Труды XVI Всероссийской конференции. – Россия, Новосибирск, 2017. – С. 314–322.
12. Chen B., Wornell G.W. Quantization index modulation: a class of provably good methods for digital watermarking and information embedding // IEEE Transactions on Information Theory. – 2001. – V. 47. – № 4. – P. 1423–1443.
13. Borah S., Borah B. Quantization index modulation (QIM) based watermarking techniques for 3D meshes // Proceedings of the Fourth International Conference on Image Information Processing (ICIIP). – India, Shimla, 2017. – P. 1–6.
14. Zhu X., Tang Z. Improved quantization index modulation watermarking robust against amplitude scaling and constant change distortions // Proceedings of the 15th IEEE International Conference on Image Processing. – USA, San Diego, 2008. – P. 433–436.
15. Noda H., Niimi M., Kawaguchi E. Application of QIM with dead zone for histogram preserving JPEG steganography // Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing. – Italy, Genova, 2005. – V. 2. – P. 1082–1085.
16. Noda H., Tsukamizu Y., Niimi M. JPEG2000 steganography possibly secure against histogram-based attack // Proceedings of the 7th Pacific Rim Conference on Multimedia. – China, Hangzhou, 2006. – P. 80–87.
17. Sarkar A., Manjunath B.S. Double embedding in the quantization index modulation framework // Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). – Egypt, Cairo, 2009. – P. 3653–3656.
18. Глумов Н.И., Митекин В.А. Алгоритм встраивания полухрупких цифровых водяных знаков для задач аутентификации изображений и скрытой передачи информации // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35. – № 2. – С. 262–267.
19. An adaptive algorithm for the steganographic embedding information into the discrete Fourier transform phase spectrum / O.O. Evsutin, A.S. Kokurina, R.V. Mescheryakov, O.O. Shumskaya // Intelligent Information Technologies for Industry: Proceedings of the First International Scientific Conference. – Russia, Sochi, 2016. – P. 47–56.
20. Mitekin V., Fedoseev V. A new QIM-based watermarking algorithm robust against multi-image histogram attack // Procedia Engineering. – 2017. – V. 201. – P. 453–462.
21. The USC-SIPI image database. URL: <http://sipi.usc.edu/database/> (дата обращения: 24.11.2018).

Поступила 31.05.2019 г.

Информация об авторах

Евсютин О.О., кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности информационных систем Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

Кокурина А.С., младший научный сотрудник кафедры безопасности информационных систем Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

Мещеряков Р.В., доктор технических наук, главный научный сотрудник Института проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук.

UDC 004.021

STEGANOGRAPHIC EMBEDDING OF ADDITIONAL DATA INTO THE IMAGES OF EARTH REMOTE SENSING BY QIM METHOD WITH A VARIABLE QUANTIZATION STEP IN THE FREQUENCY DOMAIN

Oleg O. Evsyutin¹,
eoo@keva.tusur.ru

Anna S. Kokurina¹,
annakokurina94@yandex.ru

Roman V. Meshcheryakov²,
mrv@ipu.ru

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

² V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences,
65, Profsoyuznaya street, Moscow, 117997, Russia.

The relevance. One of the areas of digital image processing, including images of Earth remote sensing, is associated with the embedding of additional information into such images for various purposes. Embedding of additional information into a digital image leads to distortion of the digital image natural model, as well as to the possible occurrence of visual artifacts. In the case of images of Earth remote sensing, such distortions may entail, for example, distortion of the object boundaries, as a result of which further analysis of the images will lead to incorrect results. Therefore, the studies aimed at finding new ways to reduce distortions caused by embedding additional information are relevant.

The aim of the research is to improve the quality of steganographic embedding of information in the coefficients of discrete cosine transform of Earth remote sensing images by developing an improved embedding algorithm based on the QIM method and ensuring the correction of distortions of the natural image model in the frequency domain.

Objects: algorithms for steganographic embedding of information in the coefficients of digital images discrete cosine transform.

Methods: QIM steganographic method, methods of mathematical statistics, computational experiments.

Results. The paper proposes a new approach to minimizing the distortion of the natural model of a digital image in the discrete cosine transform domain, based on changing the quantization step depending on the local image characteristics in the frequency domain. The result of the work is an improved algorithm for embedding the information in the coefficients of discrete cosine transform of images of Earth remote sensing, combining this approach with an approach to ensure the correct extraction of embedded information proposed by the authors earlier. The results of the experiments show that the developed algorithm, along with ensuring the accuracy of extraction, can significantly reduce the distortions introduced into frequency coefficients and ensure statistical indistinguishability of the cover images and stego images in 75 % of cases.

Key words:

Digital images, steganography, discrete cosine transform, QIM, Earth remote sensing.

The work was funded by the Russian Federation Ministry of Education and Science (grant 2.3583.2017/4.6).

REFERENCES

1. Druki A.A., Spitsyn V.G., Bolotova Yu.A., Bashlykov A.A. Semantic segmentation of Earth scanning images using neural network algorithms. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 1, pp. 59–68. In Rus.
2. Gao L., Shi W., Miao Z., Lv Z. Method based on edge constraint and fast marching for road centerline extraction from very high-resolution remote sensing images. *Remote Sensing*, 2018, vol. 10, no. 6, article number 900.
3. Kazaryan M.L., Richter A.A., Shakhramanian M.A. Method of automatic detecting the components of waste disposal objects by space images. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 328, no. 3, pp. 46–53. In Rus.
4. Buchnev A.A., Pyatkin V.P., Rusin E.V. Software Technologies for Processing of Earth Remote Sensing Data. *Pattern Recognition and Image Analysis*, 2013, vol. 23, no. 4, pp. 474–480.
5. Serra-Ruiz J., Megías D. A novel semi-fragile forensic watermarking scheme for remote-sensing images. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, vol. 32, no 19, pp. 5583–5606.
6. Serra-Ruiz J., Megías D. Reversible data hiding for tampering detection in remote sensing images using histogram shifting. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 2012, vol. 8514, article number 85140Y.
7. Mitekin V.A. An algorithm for generating digital watermarks robust against brute-force attacks. *Computer Optics*, 2015, vol. 39, no. 5, pp. 808–817. In Rus.
8. Khosravi M.R., Rostami H., Samadi S. Enhancing the binary watermark-based data hiding scheme using an interpolation-based approach for optical remote sensing images. *International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems*, 2018, vol. 9, no. 2, pp. 53–71.
9. Akhtarkavan E., Majidi B., Manzuri M.T. Secure communication and archiving of low altitude remote sensing data using high capacity fragile data hiding. *Multimedia Tools and Applications*, 2018, pp. 1–27.
10. Carpentieri B., Castiglione A., De Santis A., Palmieri F., Pizzolante R. One-pass lossless data hiding and compression of remote sensing data. *Future Generation Computer Systems*, 2019, vol. 90, pp. 222–239.
11. Evsyutin O.O., Kokurina A.S., Meshcheryakov R.V. Algorithm of the Information Embedding in Digital Images with Unmistakable Extraction Based on QIM Method. *Proceedings of the XVI All-Rus-*

- sian Conference. *Distributed Information and Computing Resources. Science to the digital economy (DICR-2017)*. Russia, Novosibirsk, 2017. pp. 314–322. In Rus.
12. Chen B., Wornell G.W. Quantization index modulation: a class of provably good methods for digital watermarking and information embedding. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2001, vol. 47, no. 4, pp. 1423–1443.
13. Borah S., Borah B. Quantization index modulation (QIM) based watermarking techniques for 3D meshes. *Proceedings of the Fourth International Conference on Image Information Processing (ICIIP)*. India, Shimla, 2017. pp. 1–6.
14. Zhu X., Tang Z. Improved quantization index modulation watermarking robust against amplitude scaling and constant change distortions. *Proceedings of the 15th IEEE International Conference on Image Processing*. USA, San Diego, 2008. pp. 433–436.
15. Noda H., Niimi M., Kawaguchi E. Application of QIM with dead zone for histogram preserving JPEG steganography. *Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing*. Italy, Genova, 2005. Vol. 2, pp. 1082–1085.
16. Noda H., Tsukamizu Y., Niimi M. JPEG2000 steganography possibly secure against histogram-based attack. *Proceedings of the 7th Pacific Rim Conference on Multimedia*. China, Hangzhou, 2006. pp. 80–87.
17. Sarkar A., Manjunath B.S. Double embedding in the quantization index modulation framework. *Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. Egypt, Cairo, 2009. pp. 3653–3656.
18. Glumov N.I., Mitekin V.A. A new semi-fragile watermarking algorithm for image authentication and information hiding. *Computer Optics*, 2011, vol. 35, no. 2, pp. 262–267. In Rus.
19. Evsutin O., Kokurina A., Mescheryakov R., Shumskaya O. An adaptive algorithm for the steganographic embedding information into the discrete Fourier transform phase spectrum. *Proceedings of the First International Scientific Conference. Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'16)*. Russia, Sochi, 2016. pp. 47–56.
20. Mitekin V., Fedoseev V. A new QIM-based watermarking algorithm robust against multi-image histogram attack. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 201, pp. 453–462.
21. *The USC-SIPI image database*. Available at: <http://sipi.usc.edu/database/> (accessed: 24 November 2018).

Received: 31 May 2019.

Information about the authors

Oleg O. Evsyutin, Cand. Sc., associate professor, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.

Anna S. Kokurina, junior researcher, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.

Roman V. Meshcheryakov, Dr. Sc., chief researcher, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences.

УДК 665.66.081.2

МАГНЕТИТ С МОДИФИЦИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ДЛЯ ВОДООЧИСТКИ

Чан Туан Хоанг¹,
cungbinh9327@gmail.com

Юрмазова Татьяна Александровна¹,
yur-tatyana@yandex.ru

Вайтулевич Елена Анатольевна¹,
rhodamine@tpu.ru

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

Актуальность. В последнее время возрос интерес к синтезу и модификации магнетита, что связано с возможностью применения его в качестве сорбента для защиты окружающей среды, например, для очистки сточных вод от органических соединений, лекарственных препаратов и от неорганических ионов тяжелых металлов. Необходимость повысить эффективность сорбционных процессов и изучить механизм процессов сорбции магнетита делает актуальной эту проблему.

Цель: определение сорбционных возможностей нанопорошков магнетита, полученного химическим способом с модифицированной поверхностью по отношению к неорганическим и органическим ионам, а также лекарственным препаратам для дальнейшего использования в процессах водоочистки.

Объект: магнитные нанопорошки на основе магнетита Fe_3O_4 с модифицированной поверхностью цитрат-ионами и диоксидом кремния.

Методы: рентгенофазовый анализ, атомно-эмиссионная спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой, метод тепловой десорбции азота, индикаторный метод.

Результаты. Магнитные нанопорошки на основе магнетита Fe_3O_4 , покрытые цитрат-ионами (НЧМ) и диоксидом кремния (HCM/SiO_2), были получены для сорбции органических и неорганических соединений из водных растворов. Изучены их состав и магнитные свойства. Показано, что полученный состав для магнетита с покрытием диоксида кремния соответствует кристаллической и аморфной фазе Fe_3O_4 и SiO_2 , соответственно. Кроме того, определена намагниченность насыщения M_s и средний поверхностный диаметр частиц. Изотермы сорбции органических и неорганических соединений на поверхности полученных нанопорошков описываются уравнением Ленгмюра, что свидетельствует об образовании мономолекулярного слоя на поверхности сорбентов. Определена максимальная сорбционная емкость порошков магнетита, модифицированного диоксидом кремния, она составляет для Ni^{2+} – 22,3 мг/г, метиленового голубого 14,7 мг/г, доксорубина – 18,8 мг/г. С помощью индикаторного метода определен заряд активных центров поверхности магнетита. Полученные результаты дают возможность моделировать процессы сорбции органических, неорганических веществ и лекарственных препаратов в процессах водоочистки и утилизации химических соединений на фармацевтических предприятиях и в онкологических центрах.

Ключевые слова:

Адсорбция, магнитные наночастицы, модификация поверхности, органические и неорганические ионы, заряд активных центров поверхности.

Введение

В настоящее время развитие промышленности приводит к усилению антропогенного воздействия на окружающую среду. В водные бассейны попадают гальваностоки, содержащие различные ионы, такие как: Pb^{2+} , Ni^{2+} , CrO_4^{2-} , и др., которые имеют высокую токсичность [1–3]. Сточные воды предприятий текстильной промышленности содержат большие концентрации красителей, превышающие ПДК [4, 5]. Кроме того, для лечения различных заболеваний применяются высокотоксичные препараты, неиспользованные остатки которых необходимо утилизировать перед сбрасыванием в сточные воды, потому что попадание этих препаратов пагубно влияет на водную экосистему [6, 7]. С точки зрения риска для окружающей среды требуется целевая система водоочистки от вышеприведенных соединений. В процессах водоочистки используют различные методы [8–11], в том числе сорбционный. Создание универсального сорбента для очистки сточных вод от химических соедине-

ний различного состава и свойств является актуальным направлением. В последнее время вырос интерес к магнетиту для применения его в процессах водоочистки и биомедицине. Если работ, связанных с применением магнетита в биомедицине, много [12–14], то работы, связанные с использованием его в процессах водоочистки, практически отсутствуют [15–17]. Магнетит является перспективным сорбентом из-за высокой сорбционной способности, невысокой чувствительности к окислению и большой стабильности [18]. Кроме того, нанопорошки магнетита легко отделяются после окончания сорбции внешним магнитным полем, что важно для восстановления или повторного использования нанопорошков магнетита [16]. Получение магнетита химическим способом исключает влияние примесей, которые присутствуют в природном минерале. Это необходимо для изучения механизма процессов сорбции, который до конца не изучен. Часто для увеличения сорбционной емкости, гидрофильности и стабильности, магнетит

модифицируют тетраэтоксисилоном, хитазаном, полиэтиленгликолем и др. [19–22]. Использование для модифицирования наночастиц магнетита тетраэтоксисилана (ТЭОС) не только помогает улучшить эти свойства, но также облегчает модификацию поверхности из-за доступности многочисленных силанольных групп ($-\text{SiOH}$) на поверхности.

Несмотря на многочисленные приведенные публикации, посвященные синтезу, модифицированию и изучению различных свойств нанопорошков магнетита, в них отсутствует комплексный подход к изучению взаимосвязи процессов формирования порошков, модифицирования их поверхности и сорбционных свойств и механизма сорбции.

Данная статья посвящена изучению взаимосвязи между синтезом нанопорошков магнетита, полученных химическим способом, условиями модифицирования их поверхности и исследованию физико-химических свойств; изучению сорбционной возможности по отношению к органическим, неорганическим ионам и лекарственным препаратам для дальнейшего использования его в процессах водоочистки.

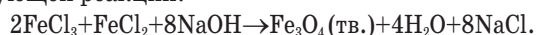
Экспериментальная часть

Реактивы

Для синтеза магнетита в работе использовали следующие реактивы: $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, NaOH (Реахим, Россия). Для стабилизации и модифицирования поверхности частиц использовали лимонную кислоту $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ и тетраэтоксисилан (ТЭОС) (Химпром, Россия). В качестве адсорбатов были выбраны органические соединения: катионный краситель метиленовый голубой (МГ) $\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{ClN}_3\text{S} \cdot \text{HCl}$ (х.ч., РЕАХИМ, Россия), анионный краситель эозин $\text{Na}_2[\text{C}_{20}\text{H}_6\text{O}_5\text{Br}_4]$ (х.ч., РЕАХИМ, Россия) и противоопухолевый препарат доксорубин (DOX) $\text{C}_{27}\text{H}_{29}\text{NO}_{11} \cdot \text{HCl}$ (Верофарм, Россия); и неорганические ионы CrO_4^{2-} , Ni^{2+} , полученные при растворении солей NiSO_4 , K_2CrO_4 (х.ч., РЕАХИМ, Россия). Все реактивы марки «х.ч.» использовались без дальнейшей очистки.

Условия синтеза нанопорошков магнетита

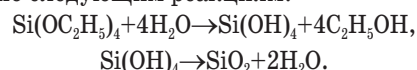
Коллоидный раствор наночастиц магнетита получали путем химического соосаждения хлоридов железа (II) и (III) в соотношении 1 к 2 в щелочной среде [23]. Их синтез осуществляли согласно следующей реакции:



Раствор нагревался до температуры 60°C при интенсивном перемешивании со скоростью 2000 об/мин. Удаление кислорода достигалось пропусканием азота через раствор на протяжении реакции синтеза. При достижении указанной температуры в раствор вливали нагретый 1,5 М NaOH , что вызывало повышение pH до 11. Для устранения низкой агрегативной устойчивости и сорбционной способности из-за отсутствия заряда поверхности магнетита [20] через 30 минут непре-

рывного нагрева в раствор вводили лимонную кислоту. После завершения синтеза раствор декантировали, промывали порошки дистиллированной водой. Эту процедуру повторяли до нейтрального pH, а затем порошки осаждали внешним магнитным полем и сушили при комнатной температуре на воздухе.

Синтезированные порошки магнетита, покрытого цитрат-ионами (НЧМ), были разделены на две части. Первую использовали в качестве сорбента, вторую часть порошков модифицировали ТЭОС для покрытия поверхности НЧМ диоксидом кремния ($\text{HЧМ}/\text{SiO}_2$) [24], для чего водный раствор, содержащий НЧМ 4 г/100 мл, перемешивали в течение нескольких минут при ультразвуковом воздействии (400 Вт, 50–60 Гц). Модифицирование поверхности наночастиц осуществляли путем введения в полученный коллоидный раствор спиртового раствора ТЭОС (отношение Fe_3O_4 и ТЭОС составляло 2:1). Химические превращения осуществлялись согласно следующим реакциям:



После этого суспензию выдерживали при перемешивании и нагревании в течение 2 часов при 90°C . После остывания до комнатной температуры полученный раствор осаждали в магнитном поле, промывали дистиллированной водой до нейтрального pH и после отделения жидкой фазы сушили на воздухе при комнатной температуре.

Методы исследования

Состав синтезированных нанопорошков магнетита определяли рентгенографически на дифрактометре SHIMADZU XRD-6000 (Япония) с использованием компьютерной базы данных рентгеновской порошковой дифрактометрии PDF4+ Международного центра дифракционных данных (ICDD, Denver, USA).

Дополнительно проводили анализ формы частиц, структуры агрегатов и распределения наночастиц магнетита по размерам с использованием электронного микроскопа «JEM-2100F» (Япония).

Автоматизированный комплекс Магнитометр Н-04 использовали для исследования магнитных характеристик в импульсных магнитных полях синтезированных нанопорошков.

При исследовании заряда поверхности магнитных порошков был применен индикаторный метод [25] с использованием катионного красителя $\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{ClN}_3\text{S} \cdot \text{HCl}$ (МГ) и анионного красителя эозина $\text{Na}_2[\text{C}_{20}\text{H}_6\text{O}_5\text{Br}_4]$.

Методом тепловой десорбции азота с помощью анализатора Sorbi-3М (Россия) определяли площадь удельной поверхности образцов $S_{\text{уд}}$.

Исследовали сорбционные свойства магнетита. В качестве адсорбатов были выбраны вышеприведенные красители, противоопухолевый препарат DOX и неорганические вещества NiSO_4 , K_2CrO_4 . Оптическую плотность растворов определяли с ис-

пользованием спектрофотометра «ArelPD-303UV» (Япония) в максимумах полос поглощения: метиленовый голубой – 660 нм, эозин – 490 нм, доксорубин – 490 нм. Концентрацию ионов CrO_4^{2-} , Ni^{2+} определяли с 1,5-дифенилкарбазидом и диметилглиоксимом, соответственно, по стандартным методикам [26].

Сорбционную емкость A_e ($\text{мг} \cdot \text{г}^{-1}$) определяли по формуле [27]:

$$A_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m},$$

где A_e – равновесная сорбционная емкость, $\text{мг} \cdot \text{г}^{-1}$; C_0 – исходная концентрация адсорбата, $\text{мг} \cdot \text{л}^{-1}$; C_e – равновесная концентрация адсорбата, $\text{мг} \cdot \text{л}^{-1}$; V – объем адсорбата, л; m – масса адсорбента, г.

Результаты исследования и их обсуждение

Для определения фазового состава полученных нанопорошков на рис. 1 представлены рентгеновские дифрактограммы образцов НЧМ и НЧМ/ SiO_2 .

Дифракционные рефлексы, наблюдаемые при $2\theta = 29,57^\circ$; $34,56^\circ$; $41,30^\circ$; $47,96^\circ$; $49,90^\circ$ и $52,15^\circ$ для образцов, отнесены к кристаллической фазе магнетита. Эти дифракционные максимумы характерны для плоскостей (220), (311), (400), (511) и (440), соответственно. Таким образом, единственной кристаллической фазой, присутствующей в образцах, является магнетит.

При этом на рис. 1, б для образцов НЧМ/ SiO_2 наблюдается широкий рефлекс около $20-28^\circ$, который относится к аморфной оболочке из SiO_2 , остальные дифракционные рефлексы относятся к характерным рефлексам кубической структуры нанопорошков Fe_3O_4 и совпадают с таковыми для НЧМ. При этом дифракционные рефлексы до 5 %, которые могли бы быть связаны с наличием в образцах примесей, отсутствуют. Таким образом, согласно полученным данным, состав для образцов НЧМ/ SiO_2 соответствует кристаллической Fe_3O_4 и аморфной SiO_2 фазе.

Средний поверхностный диаметр НЧМ и НЧМ/ SiO_2 , рассчитанный в соответствии с уравнением Дебая–Шеррера, составил 16 и 20 нм, соответственно.

На рис. 2 показаны фотографии образцов двух серий, полученные с помощью просвечивающей электронной микроскопии. Образцы порошков состоят из частиц с почти сферической формой (рис. 2). Наночастицы НЧМ имеют размер приблизительно 10–20 нм, что указывает на относительную однородность синтезированных порошков, согласно данной методике (рис. 2, а). Полученный результат согласуется с результатом работы [17].

Как видно из рис. 2, б, полученные НЧМ/ SiO_2 являются одиночными близкими по размерам частицами, состав ядра которых соответствует Fe_3O_4 . Все частицы покрыты однородной светлой оболочкой толщиной до 2 нм из диоксида кремния согласно микроанализу. Средний поверхностный диаметр НЧМ/ SiO_2 составляет около 20 нм.

Таким образом, синтезированные НЧМ достаточно малы по размеру, это связано с тем, что ионы цитрата из раствора адсорбируются на частицах магнетита, определяя отрицательный заряд на каждой частице, который препятствует укрупнению и агрегации частиц по электростатическому взаимодействию. Таким же образом заряженные ионы щелочного раствора ТЭОС в качестве поверхностно-активного вещества образуют оболочку вокруг каждой частицы магнетита, покрывая цитрат ионы на поверхности НЧМ.

Зависимости гистерезиса НЧМ и НЧМ/ SiO_2 в порошковом состоянии показаны на рис. 3.

По данным, представленным на рис. 3, для нанопорошков магнетита отсутствует петля гистерезиса. Намагниченность насыщения M_s составляет $92 \text{ А} \cdot \text{м}^2/\text{кг}$ для частиц, покрытых цитрат-ионами, и $57 \text{ А} \cdot \text{м}^2/\text{кг}$ для частиц, покрытых диоксидом кремния. Значение намагниченности насыщения наночастиц становится меньше после модификации диоксидом кремния, который экранирует

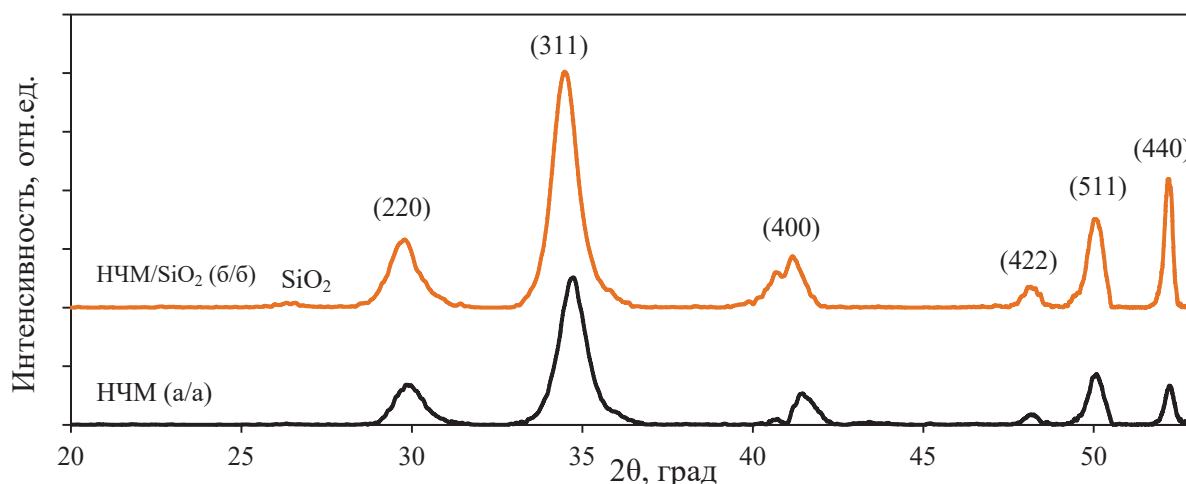


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы порошков магнетита, покрытых цитрат-ионами (а) и диоксидом кремния (б)

Fig. 1. XRD patterns of powder coated with citrate ions (a) and silicon dioxide (b)

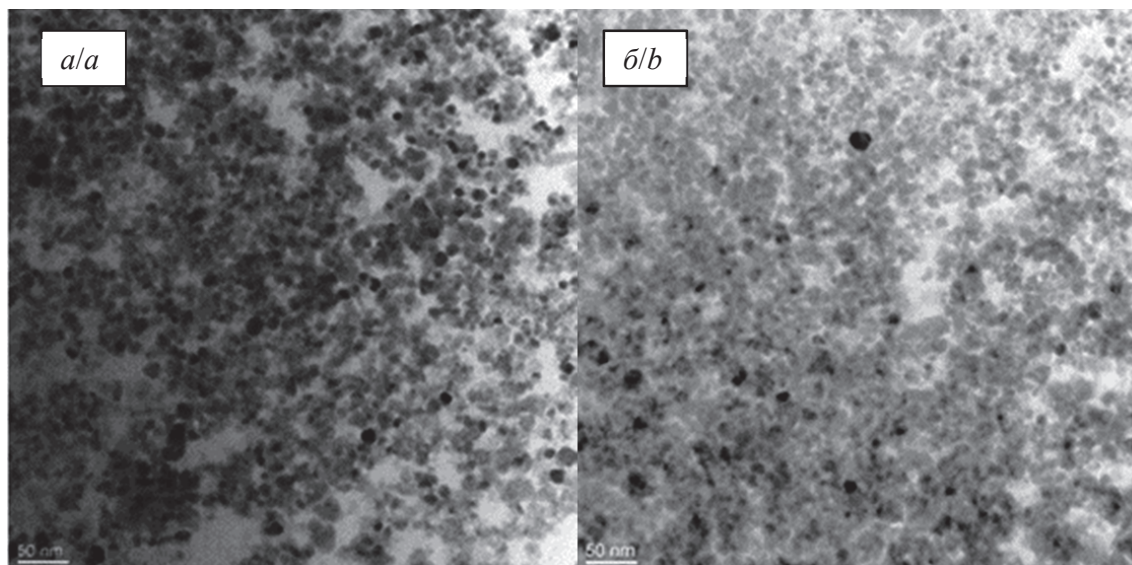


Рис. 2. Фотографии нанопорошков магнетита, покрытых цитрат-ионами (а) и диоксидом кремния (б), полученные с помощью просвечивающей электронной микроскопии

Fig. 2. TEM images of nanopowders coated with citrate ions (a) and silicon dioxide (b)

магнетит от внешнего магнитного поля. Значения намагниченности насыщения НЧМ/SiO₂ практически совпадает со значениями в работах других авторов [1, 14, 17].

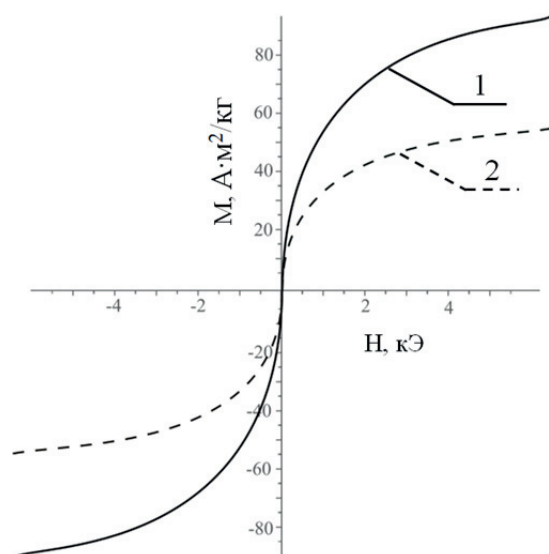


Рис. 3. Зависимость намагниченности от напряженности магнитного поля при комнатной температуре для нанопорошков магнетита, покрытых цитрат-ионами (1) и диоксидом кремния (2)

Fig. 3. Dependence of magnetization of nanopowders MNP (1), MNP/SiO₂ (2) on applied magnetic field at room temperature

Площадь удельной поверхности НЧМ и НЧМ/SiO₂ составила 115,4 и 130,5 м²/г, соответственно. Увеличение площади удельной поверхности для НЧМ/SiO₂ объясняется присутствием диоксида кремния на поверхности частиц. Средний размер пор составил 3,0 и 3,8 нм для НЧМ и НЧМ/SiO₂, соответственно. Таким образом, синтезированные нанопорошки с такими параметрами

обладают высокой адсорбционной способностью при удалении загрязняющих веществ или при адсорбции лекарственных препаратов.

Одним из важных факторов, определяющих сорбционное равновесие, является температура. Процесс сорбции DOX на НЧМ/SiO₂ изучали при температурах 293, 308 и 323 К. Результаты представлены на рис. 4, из которого видно, что с ростом температуры максимальная сорбционная ёмкость уменьшается, это указывает на экзотермический процесс адсорбции DOX.

Скорость адсорбции DOX была проанализирована с помощью уравнений псевдо-первого ($\ln(A_e - A_t)$ от t) и псевдо-второго порядка (t/A_t от t) [27]. Результаты расчёта приведены в табл. 1.

Данные зависимости относятся к уравнениям псевдо-второго порядка на основании более высокого значения коэффициента корреляции 0,999. Следовательно, скорость адсорбции определяется не только скоростью диффузионных процессов, но и скоростью химического взаимодействия между адсорбатом и адсорбентом.

Таблица 1. Параметры уравнений псевдо-первого и псевдо-второго порядка для адсорбции доксорубина при разных температурах

Table 1. Parameters of pseudo-first-order and pseudo-second-order equations for doxorubicin adsorption at different temperatures

Температура Temperature, K	A_e, exp , мг·г ⁻¹	Модель псевдо-первого порядка Pseudo-first-order model			Модель псевдо-второго порядка Pseudo-second-order model		
		k_1 , ч ⁻¹ ·г ⁻¹	A_e, cal , мг·г ⁻¹	R^2	k_2 , г·мг ⁻¹ ·ч ⁻¹	A_e, cal , мг·г ⁻¹	R^2
293	14,45	0,45	7,34	0,87	0,20	14,81	0,99
308	13,36	0,53	7,16	0,83	0,25	13,68	0,99
323	12,48	0,48	4,63	0,88	0,39	12,66	0,99

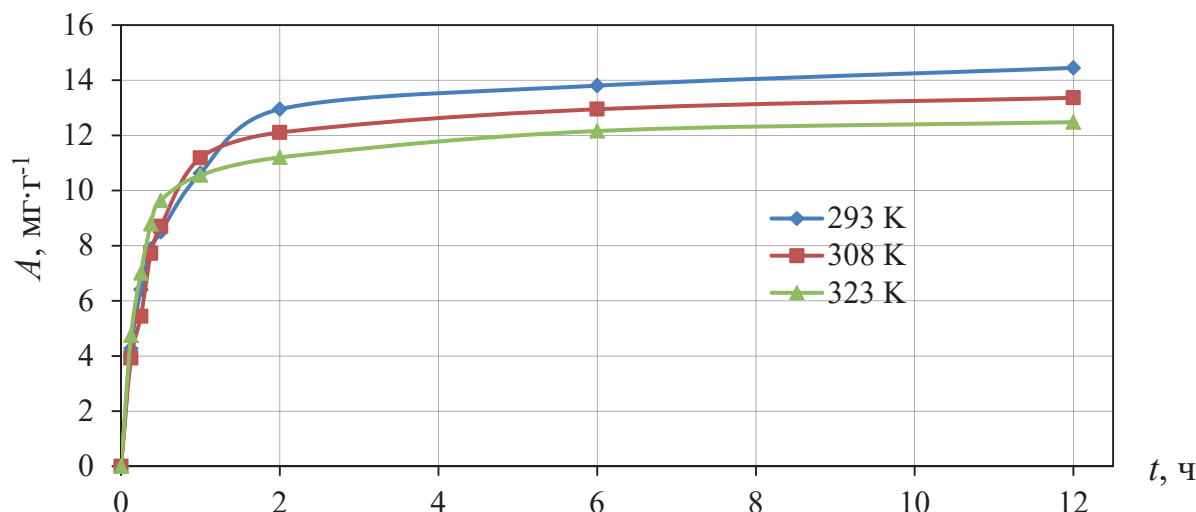


Рис. 4. Зависимость сорбционной емкости доксорубцина на нанопорошках магнетита, покрытых диоксидом кремния, от времени при разных температурах

Fig. 4. Dependence of doxorubicin adsorption capacity on magnetite nanopowders coated with silicon dioxide on time at different temperatures

Рассчитанные константы были использованы для определения энергии активации E_a , которая составила 18,2 кДж/моль. Полученное значение E_a является промежуточным между энергиями активации диффузионного (5–10 кДж/моль) и хемосорбционного процессов (≥ 40 кДж/моль) [28].

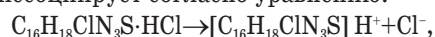
Оптимальное время достижения сорбционного равновесия при комнатной температуре определили на основании зависимости адсорбционной ёмкости от времени. Оно составило приблизительно 12 ч для всех адсорбатов. При данном времени были проведены все последующие эксперименты по адсорбции.

На рис. 5–7 представлены изотермы адсорбции органических и неорганических ионов.

Как видно из рис. 5–7, МГ, DOX, Ni^{2+} сорбируются как на НЧМ так и на НЧМ/ SiO_2 , а эозин и

CrO_4^{2-} практически не сорбируются. Данный результат свидетельствует о том, что активные центры поверхности НЧМ и НЧМ/ SiO_2 заряжены отрицательно. В работе [20] был измерен ζ -потенциал немодифицированных наночастиц магнетита, который оказался практически близок к нулю. Таким образом, модифицирование наночастиц магнетита цитрат-ионами и диоксидом кремния изменяет нулевой заряд поверхности магнетита на отрицательный.

Высокая адсорбция МГ обусловлена силами притяжения между катионами красителя, который диссоциирует согласно уравнению:



и отрицательными зарядами адсорбирующей поверхности частиц. Отрицательный заряд поверхности обуславливает адсорбционную способность и

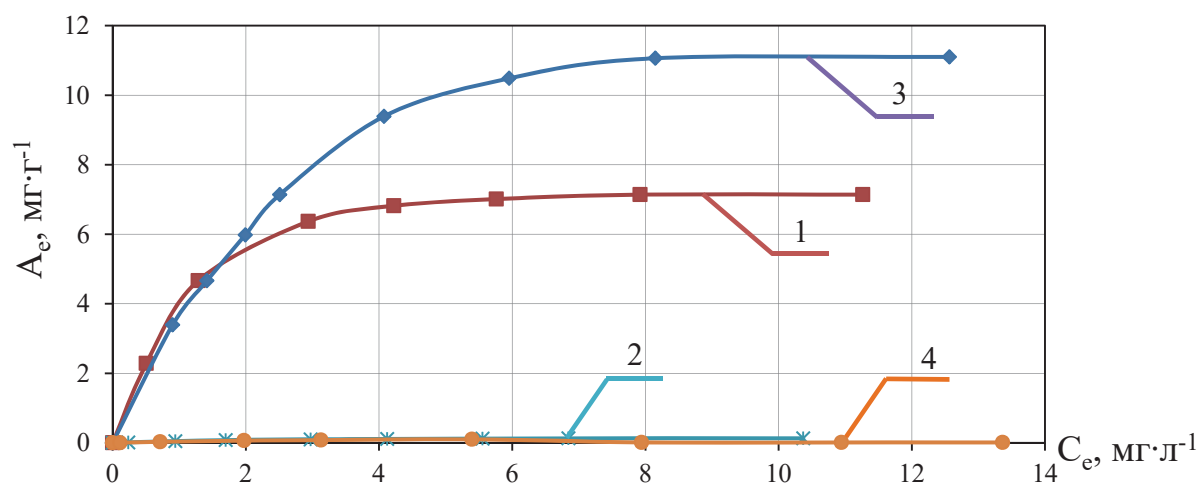


Рис. 5. Изотермы адсорбции метиленового голубого (1) и эозина (2) на магнетите, покрытом цитрат-ионами; метиленового голубого (3) и эозина (4) на магнетите, покрытом диоксидом кремния

Fig. 5. Adsorption isotherms of methylene blue (1) and eosin (2) on magnetite coated with citrate ions; methylene blue (3) and eosin (4) on magnetite coated silicon dioxide

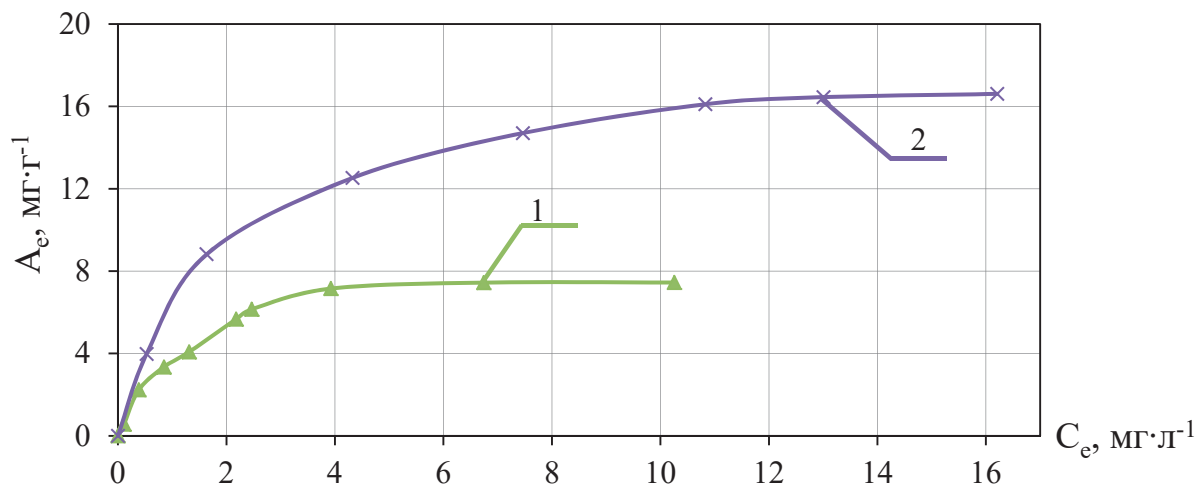


Рис. 6. Изотермы адсорбции доксорубина на магнетите, покрытом цитрат-ионами (1) и диоксидом кремния (2)

Fig. 6. Adsorption isotherm of doxorubicin on magnetite coated with citrate ions (1) and silicon dioxide (2)

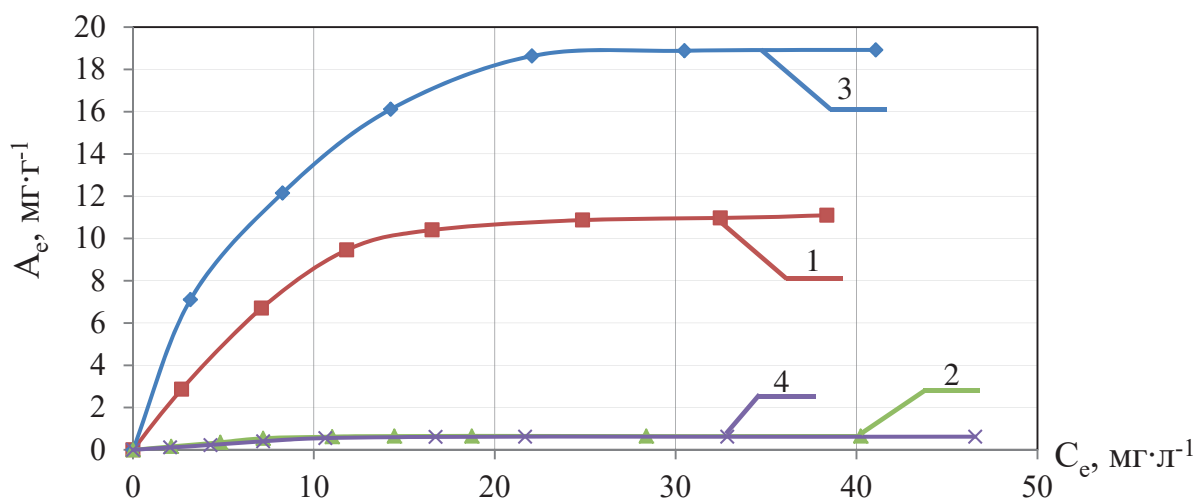


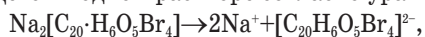
Рис. 7. Изотермы адсорбции ионов: Ni^{2+} (1) и CrO_4^{2-} (2) на нанопорошках магнетита, покрытых цитрат-ионами; Ni^{2+} (3) и CrO_4^{2-} (4) на нанопорошках магнетита, покрытых диоксидом кремния

Fig. 7. Adsorption isotherms of Ni^{2+} (1) and CrO_4^{2-} (2) ions on magnetite nanopowders coated with citrate ions; Ni^{2+} (3) and CrO_4^{2-} (4) ions on magnetite nanopowders coated with silicon dioxide

для противоопухолевого препарата DOX, также образующего в воде катионы по схеме:



В соответствии со структурой эозина, диссоциирующего в водном растворе согласно уравнению:



сорбция на синтезированных частицах обоих типов не произошла из-за одинаковых зарядов активных центров поверхности адсорбентов и адсорбатов. Следовательно, механизм процесса адсорбции органических и неорганических ионов на поверхности сорбентов соответствует электростатическому. О том же свидетельствуют косвенные данные, приведенные в работе [28].

Полученные изотермы адсорбции были обработаны в координатах уравнений Ленгмюра и

Фрейндлиха [27], в табл. 2 приведены параметры адсорбции.

Из рассчитанных коэффициентов корреляции следует, что данные изотермы описываются уравнением Ленгмюра, то есть на поверхности магнетита образуется мономолекулярный слой [29]. Определена максимальная сорбционная емкость для всех катионов. Согласно данным табл. 2 для НЧМ/ SiO_2 она примерно 2 раза выше, чем для НЧМ. Определено число активных центров: $1,6 \cdot 10^{19}$; $2,8 \cdot 10^{19}$ для НЧМ и НЧМ/ SiO_2 , соответственно. Следовательно, модифицирование магнетита диоксидом кремния приводит к повышению сорбционной ёмкости для МГ, DOX и ионов никеля за счёт увеличения числа активных адсорбционных центров поверхности.

Таблица 2. Параметры адсорбции ионов на НЧМ и НЧМ/SiO₂
Table 2. Parameters of ion adsorptions on MNP and MNP/SiO₂

Адсорбат Adsorbate			НЧМ MNP	НЧМ/SiO ₂ MNP/SiO ₂
Метиленовый голубой Methylene blue	Модель Ленгмюра Langmuir Model	$A_{\max}$, мг·г ⁻¹ /мг·г ⁻¹	8,24	14,73
		K , л·мг ⁻¹ /л·мг ⁻¹	0,95	0,36
		R^2	0,99	0,99
	Модель Фрейндлиха Freundlich Model	K_F	4,04	3,57
		n	1,99	2,44
		R^2	0,95	0,89
Доксорубин Doxorubicin	Модель Ленгмюра Langmuir Model	$A_{\max}$, мг·г ⁻¹ /мг·г ⁻¹	8,56	18,76
		K , л·мг ⁻¹ /л·мг ⁻¹	0,83	0,51
		R^2	0,99	0,99
	Модель Фрейндлиха Freundlich Model	K_F	3,43	6,11
		n	1,36	2,46
		R^2	0,97	0,94
Ni ²⁺	Модель Ленгмюра Langmuir Model	$A_{\max}$, мг·г ⁻¹ /мг·г ⁻¹	13,59	22,32
		K , л·мг ⁻¹ /л·мг ⁻¹	0,14	0,16
		R^2	0,98	0,99
	Модель Фрейндлиха Freundlich Model	K_F	2,23	4,97
		n	2,03	2,52
		R^2	0,86	0,93

Таблица 3. Максимальная сорбционная ёмкость для различных адсорбатов, полученная в данной работе и другими авторами
Table 3. Maximum sorption capacity for various adsorbates obtained in this work and by other authors

Адсорбат Adsorbate	Максимальная сорбционная ёмкость, мг/г Maximum sorption capacity, mg/g	Адсорбент Adsorbent
Ni ²⁺	22,32	Магнетит покрытый SiO ₂ (данная работа) Magnetite coated with SiO ₂ (this work)
	1,25	Природный магнетит [2] Mineral magnetite
	11,53	Магнетит, обработанный соляной кислотой [1] Magnetite treated with hydrochloric acid
CrO ₄ ²⁻	0,75	Магнетит покрытый SiO ₂ (данная работа) Magnetite coated with SiO ₂ (this work)
	0,1	Природный магнетит [2] Mineral magnetite
	3,55	Магнетит, обработанный соляной кислотой [1] Magnetite treated with hydrochloric acid
МГ Methylene blue	14,73	Магнетит покрытый SiO ₂ (данная работа) Magnetite coated with SiO ₂ (this work)
	43,82	Магнетит/графен [15] Magnetite/graphene
DOX Doxorubicin	18,76	Магнетит покрытый SiO ₂ (данная работа) Magnetite coated with SiO ₂ (this work)
	53,21	Магнетит, модифицированный поливиниловым спиртом [14] Magnetite modified with polyvinyl alcohol

В табл. 3, для сравнения, приведены максимальные адсорбционные емкости для Ni²⁺, CrO₄²⁻, МГ, DOX, полученные на магнетите в данной работе и другими авторами.

Как видно из табл. 3, эти величины имеют разные значения, тем не менее прямое сравнение полученных данных с результатами других авторов затруднено, в связи с тем, что исследования проводятся в неодинаковых условиях и, кроме того, магнетит имеет разные модифицированные поверхности.

Выводы

1. Получены наночастицы магнетита, состоящие из кристаллического ядра Fe₃O₄ с модифицированной поверхностью цитрат-ионами и диоксидом кремния. Полученные частицы имеют узкое распределение по размерам от 10–20 нм. Определена намагниченность насыщения наночастиц магнетита для образцов, покрытых цитрат-ионами, она составляет 92 А·м²/кг. После нанесения слоя SiO₂, намагниченность насыщения уменьшается до 57 А·м²/кг из-за диэлектрического слоя диоксида кремния.
2. Модифицирование поверхности магнетита приводит к изменению знака заряда активных центров поверхности, это подтверждено экспериментально. Установлено, что взаимодействие между поверхностью магнетита и адсорбатом носит электростатический характер. Полученные результаты дают возможность моделировать процессы адсорбции в процессах водоочистки.
3. Изотермы сорбции для ионов Ni²⁺, метиленового голубого и доксорубина на модифицированном магнетите аппроксимируются уравнением Ленгмюра, это свидетельствует о том, что адсорбция локализована на отдельных адсорбционных центрах с образованием мономолекулярного слоя.
4. Порошки, модифицированные диоксидом кремния, обладают максимальной сорбционной емкостью по Ni²⁺ – 22,3 мг/г, метиленовому голубому 14,7 мг/г, доксорубину – 18,8 мг/г. Максимальная сорбционная емкость магнетита, покрытого диоксидом кремния, возросла приблизительно в 2 раза по сравнению с магнетитом, покрытым цитрат ионами.
5. Полученные результаты дают возможность использовать магнетит в качестве сорбента в процессах водоочистки от неорганических, органических соединений и утилизации фармацевтических препаратов на фармацевтических предприятиях и в онкологических центрах

Работа выполнена в рамках Программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sharma Y.C., Srivastava V. Comparative Studies of Removal of Cr(VI) and Ni (II) from Aqueous Solutions by Magnetic Nanoparticles // *Journal of Chemical and Engineering Data*. – 2011. – V. 56. – P. 819–825.
2. Мартемьянов Д.В., Галанов А.И., Юрмазова Т.А. Определение сорбционных характеристик различных минералов при извлечении ионов As^{5+} , Cr^{6+} , Ni^{2+} из водных сред // *Фундаментальные исследования*. – 2013. – № 8. – С. 666–670.
3. Aghdas Heidari, Habibollah Younesi, Zahra Mehraban. Removal of Ni(II), Cd(II), and Pb(II) from a ternary aqueous solution by amino functionalized mesoporous and nano mesoporous silica // *Chemical Engineering Journal*. – 2009. – V. 153. – P. 70–79.
4. Decolourization of textile industry wastewater by the photocatalytic degradation process / C. Hachem, F. Bocquillon, O. Zahraa, M. Bouchy // *Dyes and Pigments*. – 2001. – V. 49. – № 2. – P. 117–125.
5. Faisal Ibney Hai, Kazuo Yamamoto, Kensuke Fukushima. Hybrid Treatment Systems for Dye Wastewater // *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. – 2007. – V. 37. – № 4. – P. 315–377.
6. Mompelat S., Le Bot B., Thomas O. Occurrence and fate of pharmaceutical products and by-products, from resource to drinking water // *Environment International*. – 2009. – V. 35. – P. 803–814.
7. Jiefeng Zhang, Victor W.C. Chang, Apostolos Giannis, Jing-Yuan Wang. Removal of cytostatic drugs from aquatic environment: A review // *Science of the Total Environment*. – 2013. – V. 445–446. – P. 281–298.
8. Danilenko N.B., Yurmazova T.A., Tran Tuan Hoang, Nguyen Tuan Anh. Pulsed Electric Discharge in Active Metallic Grains for Water Purification Processes // *Procedia Chemistry*. – 2015. – V. 15. – P. 292–300.
9. Ebrahiem E. Ebrahiema, Mohammednoor N. Al-Maghrabib, Ahmed R. Mobarkia. Removal of organic pollutants from industrial wastewater by applying photo-Fenton oxidation technology // *Arabian Journal of Chemistry*. – 2017. – V. 10. – P. 1674–1679.
10. Ferrer O., Gibert O., Cortina J.L. Reverse osmosis membrane composition, structure and performance modification by bisulphite, iron (III), bromide and chlorite exposure // *Water Research*. – 2016. – V. 103. – P. 256–263.
11. Parag R. Gogate, Aniruddha B. Pandit. A review of imperative technologies for wastewater treatment II: hybrid methods // *Advances in Environmental Research*. – 2004. V. 8. – P. 553–597.
12. The role of dipole interaction in hyperthermia heating colloidal clusters of densely-packed superparamagnetic nanoparticles / Rong Fu, Yuying Yan, Clive Roberts, Zeyu Liu and Yiyi Chen // *Scientific reports*. – 2018 – V. 8. – № 4704. – P. 1–10.
13. Potential use of superparamagnetic iron oxide nanoparticles for in vitro and in vivo bio imaging of human myoblasts / K.R. Wierzbinski, T. Szymanski, N. Rozwadowska, J.D. Rybka, A. Zimna, T. Zalewski, K. Nowicka-Bauer, A. Malcher, M. Nowaczyk, M. Krupinski, M. Fiedorowicz, P. Bogorodzki, P. Grieb, M. Giersig, M.K. Kurpisz // *Scientific reports*. – 2018. – V. 8. – № 3682. – P. 1–17.
14. Kayal S., Ramanujan R.V. Doxorubicin loaded PVA coated iron oxide nanoparticles for targeted drug delivery // *Materials science and Engineering C*. – 2010. – V. 30. – P. 484–490.
15. Lunhong Ai, Chunying Zhang, Zhonglan Chen. Removal of methylene blue from aqueous solution by a solvothermal-synthesized graphene/magnetite composite // *Journal of Hazardous Materials*. – 2011. – V. 192. – P. 1515–1524.
16. Thiol modified Fe_3O_4/SiO_2 as a robust, high effective, and recycling magnetic sorbent for mercury removal / S. Zhang, Y. Zhang, J. Liu, Q. Xu, H. Xiao, X. Wang, H. Xu, J. Zhou // *Chemical Engineering Journal*. – 2013. – V. 226. – P. 30–38.
17. Hoang Vinh Tran, Lam Dai Tran, Thinh Ngoc Nguyen. Preparation of chitosan/magnetite composite beads and their application for removal of Pb(II) and Ni(II) from aqueous solution // *Materials science and engineering C*. – 2010. – V. 30. – P. 304–310.
18. Magnetic nanoparticles: design and characterization, toxicity and biocompatibility, pharmaceutical and biomedical applications / L.H. Reddy, J.L. Arias, J. Nicolas, P. Couvreur // *Chemical Reviews*. – 2012. – V. 112. – P. 5818–5878.
19. Biocompatible magnetite nanoparticles with varying silica-coating layer for use in biomedicine: physicochemical and magnetic properties, and cellular compatibility / R.K. Singh, T.H. Kim, K.D. Patel, J.C. Knowles, H.W. Kim // *Journal of Biomedical Materials Research*. – 2012. – Part A. – P. 1734–1742.
20. Казимирова К.О., Штыков С.Н. Синтез и функционализация магнитных наночастиц магнетита хитозаном // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Химия. Биология. Экология*. – 2018. – Т. 18. – Вып. 2. – С. 126–133.
21. Barrera C., Herrera A.P., Rinaldi C. Colloidal dispersions of monodisperse magnetite nanoparticles modified with poly (ethylene glycol) // *The Journal of Colloid and Interface Science*. – 2009. – V. 329. – P. 107–113.
22. Aqueous ferrofluid of citric acid coated magnetite particles / A. Godarzi, Y. Sahoo, M.T. Swihart, P.N. Prasad // *Materials Research Society Symposium Proceedings*. – 2004. – V. 789. – P. 1–6.
23. Ying Wan, Dongyuan Zhao. On the controllable soft-templating approach to mesoporous silicates // *Chemical reviews*. – 2007. – V. 107. – № 7. – P. 2821–2860.
24. Synthesis and Characterization of Superparamagnetic Fe_3O_4/SiO_2 Core-Shell Composite Nanoparticles / Meizhen Gao, Wen Li, Jingwei Dong, Zhirong Zhang, Bingjun Yang // *World Journal of Condensed Matter Physics*. – 2011. – № 1. – P. 49–54.
25. Кирсанова К.А., Темникова С.А., Ворончихина Л.И. Применение индикаторного метода при изучении поверхности частиц расширенного графита // *Фундаментальные исследования*. – 2008. – № 10. – С. 60–61.
26. Шарло Г. Методы аналитической химии. Ч. 2. – М.: Изд-во «Химия», 1969. – 774 с.
27. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии (Поверхностные явления и дисперсные системы). – М.: Изд-во «Химия», 1982. – 400 с.
28. Исследование механизма адсорбции противоопухолевых лекарственных на железокарбидных наночастицах / А.И. Галанов, Т.А. Юрмазова, В.А. Митькина, Г.Г. Савельев, Н.А. Яворовский // *Известия Томского Политехнического Университета*. – 2010. – Т. 317. – № 3. – P. 29–33.
29. Кучерова А.Е., Шубин И.Н., Пасько Т.В. Перспективные сорбенты на основе модифицированного наноструктурами цеолита для очистки водных сред от органических примесей // *Российские нанотехнологии*. – 2018. – Т. 13. – № 5–6. – С. 113–117.

Поступила 22.05.2019 г.

Информация об авторах

Чан Туан Хоанг, магистрант Инженерной школы ядерных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Юрмазова Т.А., кандидат химических наук, доцент отделения естественных наук Школы базовой инженерной подготовки Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Вайтулевич Е.А., кандидат химических наук, доцент отделения естественных наук Школы базовой инженерной подготовки Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 665.66.081.2

MAGNETITE WITH MODIFIED SURFACE FOR WATER TREATMENT

Hoang Tran Tuan¹,
cungbinh9327@gmail.com

Tatyana A. Yurmazova¹,
yur-tatyana@yandex.ru

Elena A. Vaitulevich¹,
rhodamine@tpu.ru

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

Relevance. Recently, interest in the synthesis of magnetite nanoparticles has been growing, which is due to the possibility of using it as a sorbent for protecting environment, such as, for purifying wastewater from organic compounds, drugs and inorganic heavy metals. The necessity to improve the efficiency of sorption and study mechanism of sorption makes this problem urgent.

The main aim of the research is to determine the sorption possibility of inorganic and organic ions, as well as drugs on magnetite powders with a modified surface obtained by a chemical method for further use in water purification.

Object: magnetic nanopowders based on Fe_3O_4 with modified surface with citrate ions and dioxide silica.

Methods: X-ray phase analysis, inductively coupled plasma atomic emission spectrometry, method of thermal desorption of nitrogen, indicator method.

Results. Magnetic powders based on magnetite Fe_3O_4 with a surface coated with citrate ions (MNP) and silicon dioxide (MNP/SiO_2) were obtained for sorption of organic and inorganic compounds from aqueous media. Their composition and magnetic properties were studied. It is shown that the obtained composition of magnetite coated with dioxide silica corresponds to the crystalline phase of Fe_3O_4 and amorphous phase of SiO_2 . Furthermore, the saturation magnetization M_s and average surface diameter of particles were determined. The sorption isotherms of organic and inorganic compounds on the surface of obtained nanopowders were described by the Langmuir equation, which indicates the formation of a monomolecular layer on the surface of the sorbents. The maximum sorption capacity of Ni^{2+} , methylene blue and doxorubicin on silicon dioxide-coated magnetite powders was determined, it is 22,3, 14,7 and 18,8 mg/g, respectively. The charge of surface active centers of the magnetite was determined by the indicator method. The obtained results make it possible to simulate sorption of organic, inorganic substances and drugs in water purification and utilization of chemical compounds in pharmaceutical plants and cancer centers.

Key words:

Adsorption, magnetic nanoparticles, surface modification, organic and non-organic ions, charge of surface active centers.

The research was carried out within the Competitiveness Enhancement Program of Tomsk Polytechnic University.

REFERENCES

- Sharma Y.C., Srivastava V. Comparative Studies of Removal of Cr(VI) and Ni(II) from Aqueous Solutions by Magnetic Nanoparticles. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 2011, vol. 56, pp. 819–825.
- Martemiyarov D.V., Galanov A.I., Yurmazova T.A. Determination of sorption characteristics of different minerals in extracting compounds of heavy metals from aqueous media. *Fundamental research*, 2013, no. 8, pp. 666–670. In Rus.
- Aghdas Heidari, Habibollah Younesi, Zahra Mehraban. Removal of Ni(II), Cd(II), and Pb(II) from a ternary aqueous solution by amino functionalized mesoporous and nano mesoporous silica. *Chemical Engineering Journal*, 2009, vol. 153, pp. 70–79.
- Hachem C., Bocquillon F., Zahraa O., Bouchy M. Decolourization of textile industry wastewater by the photocatalytic degradation process. *Dyes and Pigments*, 2001, vol. 49, no. 2, pp. 117–125.
- Faisal Ibney Hai, Kazuo Yamamoto, Kensuke Fukushi. Hybrid Treatment Systems for Dye Wastewater. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2007, vol. 37, no. 4, pp. 315–377.
- Mompelat S., Le Bot B., Thomas O. Occurrence and fate of pharmaceutical products and by-products, from resource to drinking water. *Environment International*, 2009, vol. 35, pp. 803–814.
- Jiefeng Zhang, Victor W.C. Chang, Apostolos Giannis, Jing-Yuan Wang. Removal of cytostatic drugs from aquatic environment: a review. *Science of the Total Environment*, 2013, vol. 445–446, pp. 281–298.
- Danilenko N.B., Yurmazova T.A., Tran Tuan Hoang, Nguyen Tuan Anh. Pulsed Electric Discharge in Active Metallic Grains for Water Purification Processes. *Procedia Chemistry*, 2015, vol. 15, pp. 292–300.
- Ebrahiem E. Ebrahiema, Mohammednoor N. Al-Maghrabib, Ahmed R. Mobarkia. Removal of organic pollutants from industrial wastewater by applying photo-Fenton oxidation technology. *Arabian Journal of Chemistry*, 2017, vol. 10, pp. 1674–1679.
- Ferrer O., Gibert O., Cortina J.L. Reverse osmosis membrane composition, structure and performance modification by bisulphite, iron (III), bromide and chlorite exposure. *Water Research*, 2016, vol. 103, pp. 256–263.
- Parag R. Gogate, Aniruddha B. Pandit. A review of imperative technologies for wastewater treatment II: hybrid methods. *Advances in Environmental Research*, 2004, vol. 8, pp. 553–597.
- Rong Fu, Yuying Yan, Clive Roberts, Zeyu Liu and Yiyi Chen. The role of dipole interaction in hyperthermia heating colloidal clusters of densely-packed superparamagnetic nanoparticles. *Scientific reports*, 2018, vol. 8, no. 4704, pp. 1–10.
- Wierzbinski K.R., Szymanski T., Rozwadowska N., Rybka J.D., Zimna A., Zalewski T., Nowicka-Bauer K., Malcher A., Nowaczyk M., Krupinski M., Fiedorowicz M., Bogorodzki P., Grieb P., Giersig M., Kurpisz M.K. Potential use of superparamagnetic

- iron oxide nanoparticles for in vitro and in vivo bioimaging of human myoblasts. *Scientific reports*, 2018, vol. 8, no. 3682, pp. 1–17.
14. Kayal S., Ramanujan R.V. Doxorubicin loaded PVA coated iron oxide nanoparticles for targeted drug delivery. *Materials science and Engineering C*, 2010, vol. 30, pp. 484–490.
 15. Lunhong Ai, Chunying Zhang, Zhonglan Chen. Removal of methylene blue from aqueous solution by a solvothermal-synthesized graphene/magnetite composite. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, vol. 192, pp. 1515–1524.
 16. Zhang S., Zhang Y., Liu J., Xu Q., Xiao H., Wang X., Xu H., Zhou J. Thiol modified $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ as a robust, high effective, and recycling magnetic sorbent for mercury removal. *Chemical Engineering Journal*, 2013, vol. 226, pp. 30–38.
 17. Hoang Vinh Tran, Lam Dai Tran, Thinh Ngoc Nguyen. Preparation of chitosan/magnetite composite beads and their application for removal of Pb (II) and Ni (II) from aqueous solution. *Materials science and engineering C*, 2010, vol. 30, pp. 304–310.
 18. Reddy L.H., Arias J.L., Nicolas J., Couvreur P. Magnetic nanoparticles: design and characterization, toxicity and biocompatibility, pharmaceutical and biomedical applications. *Chemical Reviews*, 2012, vol. 112, pp. 5818–5878.
 19. Singh R.K., Kim T.H., Patel K.D., Knowles J.C., Kim H.W. Biocompatible magnetite nanoparticles with varying silica-coating layer for use in biomedicine: physicochemical and magnetic properties, and cellular compatibility. *Journal of Biomedical Materials Research – Part A*, 2012, vol. 100A, no. 7, pp. 1734–1742.
 20. Kazimirova K.O., Shtykov S.N. Synthesis and functionalization of magnetic magnetite nanoparticles with chitosan. *News of Saratov University. New series. Chemistry series. Biology. Ecology*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 126–133. In Rus.
 21. Barrera C., Herrera A.P., Rinaldi C. Colloidal dispersions of monodisperse magnetite nanoparticles modified with poly (ethylene glycol). *The Journal of Colloid and Interface Science*, 2009, vol. 329, pp. 107–113.
 22. Goodarzi A., Sahoo Y., Swihart M.T., Prasad P.N. Aqueous ferrofluid of citric acid coated magnetite particles. *Materials Research Society Symposium Proceedings*, 2004, vol. 789, pp. 1–6.
 23. Ying Wan, Dongyuan Zhao. On the controllable soft-templating approach to mesoporous silicates. *Chemical reviews*, 2007, vol. 107, no. 7, pp. 2821–2860.
 24. Meizhen Gao, Wen Li, Jingwei Dong, Zhirong Zhang, Bingjun Yang. Synthesis and Characterization of Superparamagnetic $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ Core-Shell Composite Nanoparticles. *World Journal of Condensed Matter Physics*, 2011, no. 1, pp. 49–54.
 25. Kirsanova K.A., Temnikova S.A., Voronchikhina L.I. The use of indicator method in the study of the surface of expanded graphite particles. *Fundamental research*, 2008, no. 10, pp. 60–61. In Rus.
 26. Charlo G. *Metody analiticheskoy khimii*. Ch. 2 [Methods of analytical chemistry. P. 2]. Moscow, Khimiya Publ., 1969. 774 p.
 27. Frolov Yu.G. *Kurs kolloidnoy khimii (poverkhnostnye yavleniya i dispersnyye sistemy)* [Colloid Chemistry Surface Phenomena and Disperse Systems]. Moscow, Khimiya Publ., 1988. 400 p.
 28. Galanov A.I., Yurmazova T.A., Mitkina V.A., Saveliev G.G., Yavorovsky N.A. Study of the mechanism of adsorption of anticancer drugs on iron-carbide nanoparticles. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 317, no. 3, pp. 29–33. In Rus.
 29. Kucherova A.E., Shubin I.N., Pasko T.V. Promising sorbents based on modified zeolite with nanostructures for the purification of aqueous media from organic impurities. *Russian nanotechnologies*, 2018, vol. 13, no. 5–6, pp. 113–117. In Rus.

Received: 22 May 2019.

Information about the authors

Hoang Tran Tuan, master student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Tatyana A. Yurmazova, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Elena A. Vaitulevich, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 504.55.054: 622 (470.6)

ПАРАМЕТРЫ АКТИВАЦИИ ЗОЛЫ УНОСА В КАЧЕСТВЕ ВЯЖУЩЕГО ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ БЕТОНОВ

Голик Владимир Иванович^{1,2},
v.i.golik@mail.ru

Дмитрак Юрий Витальевич¹,
dmitrak@yandex.ru

Качурин Николай Михайлович³,
ecology_tsu_tula@mail.ru

Стась Галина Викторовна³,
galina_stas@mail.ru

¹ Северо-Кавказский государственный технологический университет,
Россия, 362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44.

² Геофизический институт Владикавказского научного центра,
Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а.

³ Тульский государственный университет,
Россия, 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92.

Актуальность исследования объясняется тем, что увеличение объемов использования товарного цемента при изготовлении бетонов, в том числе закладочных смесей для горного производства, сопровождается увеличением темпов добычи сырья для его изготовления и выбросов пылегазовых загрязнителей в атмосферу. Изыскиваются возможности замены его отходами смежных отраслей, например золой уноса от сжигания угля на тепловых электростанциях.

Целью исследования является доказательство того, что альтернативные источники вяжущих компонентов могут конкурировать с товарным цементом по основным показателям качества, будучи уже произведенными и наносящими ущерб в процессе хранения без утилизации.

Основным методом исследования является промышленный и лабораторный эксперимент с моделированием вяжущих свойств добавки к цементу. Полученные показатели систематизируются, интерпретируются графически и являются основанием для принятия решений.

Результаты. Доказана возможность и целесообразность частичной замены товарного цемента золой уноса от сжигания угля на тепловых электростанциях при соответствующей подготовке в активаторах-дезинтеграторах. Экспериментально определены количественные значения зависимости между расходом комплексного вяжущего и прочностью бетонной смеси, что позволяет скорректировать расход цемента при сохранении нужного качества бетона. Детализирована роль операции перемешивания для набора прочности смеси путем сравнения возможных способов перемешивания вручную и в дезинтеграторах. Установлен диапазон целесообразности режимов подготовки добавки к цементу.

Выводы. Добавка золы уноса при совместной активации с цементом может применяться в качестве вяжущего для изготовления бетонов в определенных диапазонах режимов подготовки, которые должны корректироваться для местных условий.

Ключевые слова:

Вяжущая компонента, зола уноса, дезинтегратор, цемент, бетон, экология.

Введение

Портландцемент в качестве вяжущего компонента, обладая универсальными технологическими и эксплуатационными свойствами, находит широкое применение практически во всех отраслях хозяйства [1, 2].

Однако, кроме дороговизны и дефицитности, производство цемента сопряжено с причинением экологического ущерба окружающей среде путем выбросов в атмосферу большого объема углекислого газа. Поэтому цемент пытаются заменять композитными минеральными добавками, из которых наиболее распространены доменные гранулированные шлаки, электро-термо-фосфорные шлаки, белитовые шламы и зола уноса, вводя их в состав цементов при совместном помоле с клинкером.

К наиболее распространенным промышленным отходам, пригодным для использования в качестве добавки, относится образующаяся при сжигании угля на тепловых электростанциях зола уноса (рис. 1).

Зола уноса составляет около 90 % угольной золы, из которых не более 40 % находит применение в различных отраслях, до 20 % используется при производстве бетона и только небольшая часть находит применение в производстве вяжущих.

Достоинства золы уноса в качестве добавки [3–5]:

- снижение расхода воды с обеспечением подвижности смеси;
- облегчение процесса укладки бетонной смеси;
- уменьшить тепловыделения и усадки бетона;
- уменьшение опасности трещинообразования.

Введение золы уноса замедляет сроки схватывания, что объясняется медленной скоростью гидратации.

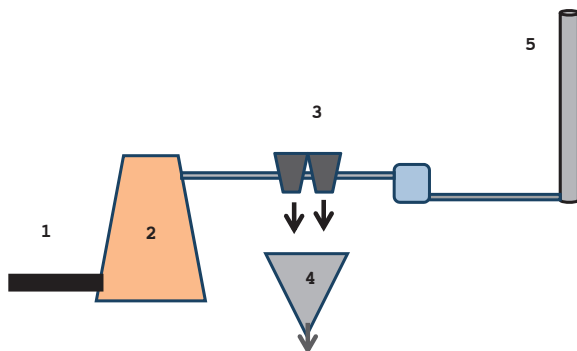


Рис. 1. Схема образования золы уноса: 1 – уголь; 2 – котел; 3 – фильтр; 4 – бункер; 5 – газы

Fig. 1. Scheme for fly ash formation: 1 is the coal; 2 is the boiler; 3 is the filter; 4 is the bunker; 5 are the gases

Бетоны с золой уноса характеризуются низким водоотделением, меньшей сегрегацией частиц, плотностью и весом бетона. Введение золы уноса в состав бетона снижает развитие усадочных деформаций при твердении.

Состав и структура золы уноса зависят от свойств сжигаемого топлива и особенностей его сгорания. Применение золы уноса как побочного материала позволяет существенно сократить затраты на сырье в процессе производства разного вида бетонов.

Область применения золы уноса:

- в составе тяжелых бетонов для монолитных конструкций как заменитель части песка или части цемента, или как активный улучшающий свойства бетона микро-наполнитель;
- в производстве стеновых блоков и строительстве для повышения агрегативной устойчивости смеси и формирования нужной структуры бетона.

Подавляющее большинство работающих на углях ТЭС и ТЭЦ не оборудованы фильтрами для улавливания пыли, и зола вместе со шлаками направляется в шламонакопители, что не позволяет эффективно утилизировать ее в производстве бетонов.

В состав золы ТЭЦ входят, %: SiO_2 – 34–75, Al_2O_3 – 2–34, Fe_2O_3 – 1,5–18,5, CaO – 2–14,5 и другие соединения [6–8].

Использование промышленных отходов горения угля относится к 90-м гг. прошлого века. Так, в Скандинавских странах уровень утилизации золы ТЭЦ доходит до 100 %. В Европейскую ассоциацию по утилизации продуктов горения угля входят 15 стран, выпускающих 90 % золошлаковых материалов.

Препятствием для расширения области использования зол уноса является наличие в них, как и других хвостах переработки, металлосодержащего сырья редкоземельных и других металлов. Поэтому утилизацию зол целесообразно начинать с из-

влечения металлов, что пока еще является непреодолимым препятствием для утилизации золошлаковых отходов. Зола является практически заменителем бокситов.

Схема выщелачивания редкоземельных металлов из золошлаковых отходов включает в себя предварительную подготовку золошлаков, химическое выщелачивание, а также концентрирование редкоземельных металлов в растворе (рис. 2).

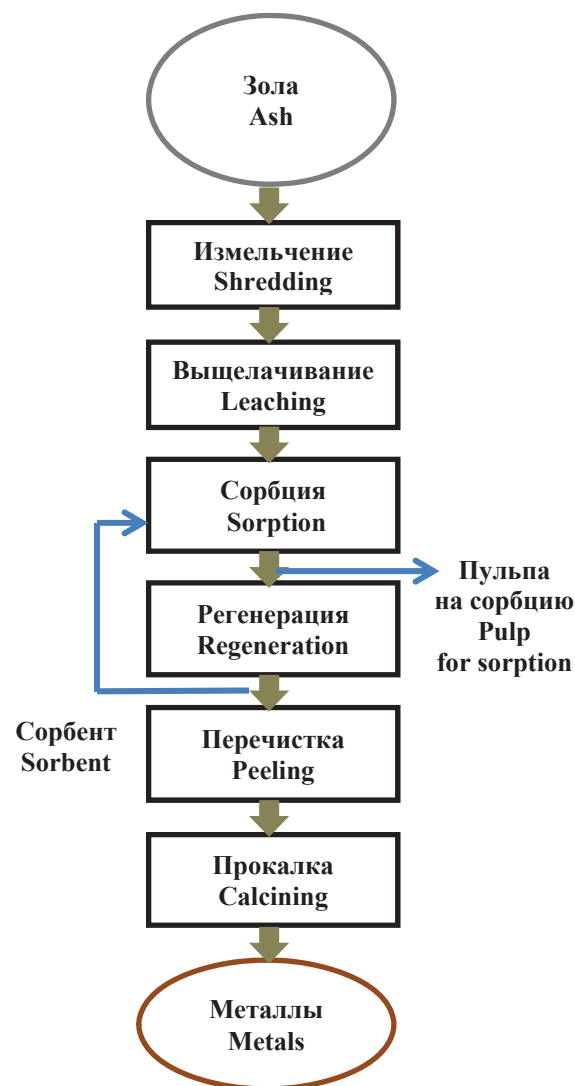


Рис. 2. Схема выщелачивания металлов

Fig. 2. Metal leaching scheme

Предварительная подготовка золошлаковых отходов включает измельчение и усреднение зол по диаметру частиц. Выщелачивание включает контакт измельченной золы с водными растворами кислот. В дальнейшем используют сорбенты для извлечения металлов из коллективного раствора. Недостатком схемы является продолжительность и неполное извлечение металлов.

Дезинтегратор-активатор выполняет операции выщелачивания на два порядка быстрее и с полным извлечением металлов. Запрессовывание

жидких реагентов в поры минералов осуществляется в рабочем органе дезинтегратора во время активации со скоростью более 250 м/с.

В России сухую золу перерабатывают практически полностью (10 %). В Омске на ТЭЦ-4 линия по отбору золы уноса обеспечивала сырьем два строительных завода. Золошлаки добавляют в цементы и в клинкер. На их основе делают зольные блоки, смешивая золу с цементом. Но в большинстве случаев золу используют для отсыпки оснований дорог и заполнения пазух в строительстве.

Хорошими гидравлическими свойствами обладают золы с показателями 0,9–1,2. Твердеющая смесь с добавкой такой золы обладает прочностью до 8,0 МПа и пластичностью 80–100 Па.

При одинаковом расходе цемента прочность закладки с увеличением добавки золы возрастает.

Результаты использования зол уноса на ряде горных предприятий сводятся к следующему [9, 10]:

- зола уноса, полученная от сжигания углей Канско-Ачинского бассейна, обладает вяжущими свойствами без добавления цемента;
- затворение твердеющих смесей 3 % растворами HCl и CaCl_2 увеличивает прочность смесей и ускоряет сроки схватывания;
- зола ирша-бородинских углей менее активна, чем зола «Зв», но более активна, чем зола хангорских углей.

Для получения составов с прочностью 3,0–3,5 МПа необходим расход цемента 20–30 кгм³ вместо 100–120 кгм³ при использовании золы хангорских углей и 220–240 кгм³ без добавки золы. Такую же прочность твердеющих смесей с применением в качестве добавок мокро-молотого доменного гранулированного карагандинского шлака можно достигнуть при большем расходе цемента – 50 кгм³.

При добавке ирша-бородинской золы экономится около 200 кг цемента на 1 м³ закладки.

Зола канско-ачинских углей с Новосибирской ТЭЦ-3 может заменить карагандинские шлаки, сократив при этом расход цемента на 10–20 кгм³. При замене цементных вяжущих на зольно-цементные с Гусиноозерской ТЭЦ расход цемента снижается до 0–40 кгм³.

Лучшими качествами обладает зола от сжигания бурых углей Канско-Ачинского угольного бассейна, которая представляет собой практически готовое к употреблению вяжущее. Состав вяжущих ингредиентов по массе представлен в табл. 1.

Таблица 1. Состав вяжущих ингредиентов

Table 1. Composition of astrigent ingredients

Наименование Name	Химический состав Chemical composition, %					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SiO ₃
Зола бурых углей Канско-Ачинского угольного бассейна Ash of brown coal of the Kansk-Achinsk coal basin	20–40	8–11	10–15	25–50	2–4	1–3
Портландцемент марки 500 Portland cement brand 500	8–26	4–9	0,3–6	62–68	≥5	1–3,5

Нами исследовано влияние количества добавок к цементу в комплексных вяжущих различного типа на прочность твердеющих смесей при использовании золы уноса от сжигания углей. Целью исследования было определить зависимость между расходом цемента с добавками золы уноса и прочностью бетона при различных параметрах подготовки, в частности скорости перемешивания компонентов бетонных смесей [11–16].

Экспериментальные смеси включали в себя портландцемент, золу уноса, хвосты обогатительного передела и воду.

Эксперимент включал в себя три этапа.

На первом этапе золу-унос совместно с цементом активировали в дезинтеграторе УДА-10 с интенсивным перемешиванием со скоростью вращения роторов 3000 об/мин или суммарной линейной скоростью – 46,5 м/с (рис. 3).

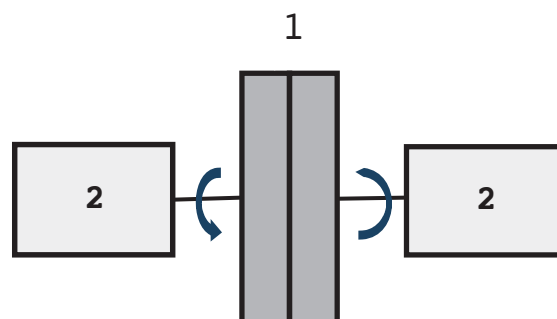


Рис. 3. Схема дезинтегратора: 1 – рабочая корзина с роторами; 2 – электродвигатели

Fig. 3. Disintegrator diagram: 1 is the working basket with rotors; 2 are the electric motors

При обработке в дезинтеграторе-активаторе частицы вяжущих получают быстро следующие друг за другом удары со скоростью удара более 250 м/с, что изменяет их технологические свойства.

Конструкция дезинтегратора включает в себя вращающиеся в противоположные стороны ротора, насаженные на соосные валы. Материал подается в рабочий орган и, перемещаясь к периферии, подвергается ударам вращающихся с частотой 500–1000 об/мин пальцев.

Активация гранулированных шлаков металлургии в дезинтеграторе открывает перспективы получения вяжущих аналогов цемента и сокращает стоимость продуктов горного производства. Проблема утилизации отходов горного производства перспективна в социально-экономическом плане, поскольку опасные в настоящее время хвосты переработки становятся сырьевым источником для решения вопросов выживания горных предприятий. Большая часть потребностей производства в минеральном сырье может быть удовлетворена использованием уже накопленных хвостов переработки минералов. Эффективность утилизации минеральных отходов складывается из стоимости полученных товаров, сырья для строительной индустрии и снижения величины ущер-

ба окружающей среде от хранения хвостов переработки.

Для дальнейших исследований была отобрана зола Канско-Ачинского бассейна. Результаты этапа сведены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры твердеющей смеси с интенсивным перемешиванием

Table 2. Parameters of hardening mixture with intensive mixing

Компоненты смеси, кг/м³ Mixture components, kg/m³				Прочность, МПа Strength, MPa		
Цемент Cement	Зола Ash	Хвосты Tails	Вода Water	Возраст, с/Age, s		
				7	14	28
170	–	1242	435	0,4	1,2	1,3
160	100	1093	490	1,0	1,6	2,0
160	200	944	495	1,4	2,6	3,5
160	300	796	500	2,2	3,6	5,3
150	200	966	490	1,2	1,9	2,9
150	300	818	495	1,6	2,4	4,0
150	400	669	500	1,9	3,5	5,2
150	500	520	505	2,5	4,1	6,5

При расходе цемента 150 и 160 кг/м³ и интенсивном перемешивании прочность смеси с увеличением количества золы уноса возрастает. Прочность смеси с добавкой золы в разы превышает исходную прочность без добавки цемента.

Образцы второго этапа исследования изготовили при тех же условиях, но компоненты смеси смешивали вручную. Прочность смеси оказалась в разы меньше, чем при интенсивном перемешивании, но при увеличении расхода золы также увеличилась (табл. 3).

Таблица 3. Прочность твердеющей смеси с перемешиванием вручную

Table 3. Strength of the hardening mixture with manual mixing

Компоненты смеси, кг/м³ Components of the mixture, kg/m³				Прочность, МПа Strength, MPa		
Цемент Cement	Зола Ash	Хвосты Tails	Вода Water	Возраст, с/Age, s		
				7	14	28
160	300	822	490	0,63	0,99	2,1
140	300	640	490	0,56	0,37	1,9
120	300	857	490	0,39	0,71	1,6
100	300	874	490	0,27	0,60	1,3
140	400	704	490	0,59	1,0	2,1
120	400	722	490	0,45	0,82	1,8
100	400	739	490	0,32	0,69	1,4
120	500	586	490	0,51	0,93	2,0
100	500	604	490	0,38	0,82	1,7

Так, в возрасте 28 дней добавка 200 кг/м³ золы позволила сэкономить 40200 кг/м³ портландцемента.

На третьем этапе эксперимента компоненты твердеющей смеси перемешивали вручную, а затем провели ее обработку при помощи лопастной быстроходной мешалки при режиме 3500 об/мин в течение трех минут (табл. 4).

Состав твердеющей смеси (на м³): цемент М 400 – 120 кг; зола уноса Рефтинской ГРЭС – 300 кг; хвосты обогащения – 357 кг; вода – 490 л.

Таблица 4. Прочность твердеющей смеси с перемешиванием вручную и активацией

Table 4. Hardening mixture strength at manual mixing and activation

Линейная встречная скорость, м/с Linear counter speed, m/s	Предельное напряжение сдвига, Па Ultimate shear stress, Pa	Коэффициент отстоя воды, % Water sedimentation coefficient, %	Прочность, МПа Strength, MPa		
			Возраст, с/Age, s		
			7	14	28
30	123	90,3	0,50	1,8	3,4
40	117	91,2	0,52	1,9	2,7
50	110	90,3	0,56	1,4	2,5
60	107	88,7	0,53	1,1	2,4
80	105	89,3	0,48	1,1	2,7
100	108	90,6	0,50	1,5	3,9

Максимальная скорость обработки 30–40 м/с (перемешивание) и 100 м/с (измельчение).

Прочность образцов, изготовленных при скоростях 30–40 м/с (табл. 3) и при перемешивании вручную (табл. 2), приведена в табл. 5.

Таблица 5. Прочность смеси при различных режимах перемешивания компонентов

Table 5. Mixture strength at different modes of mixing components

Линейная встречная скорость, м/с Linear counter speed, m/s	Предельное напряжение сдвига, Па Ultimate shear stress, Pa	Коэффициент отстоя воды, % Water sedimentation coefficient, %	Прочность смеси, МПа Strength, MPa		
			Возраст, с/Age, s		
			7	14	28
30	423	90,3	0,5	1,8	3,4
40	117	91,2	0,52	1,9	2,7
–	121	95,2	0,39	0,71	1,6

Определено, что при интенсивном перемешивании в дезинтеграторе прочность бетонной смеси увеличивается в 1,5–2 раза и более. Оптимальной для перемешивания смеси цемента и золы уноса является скорость 30–40 м/с. Дальнейшее увеличение скорости нецелесообразно.

Результаты исследования хорошо согласуются с выводами Российских и зарубежных специалистов [17–20].

Выводы

1. Возможность частичной замены цемента золой уноса от сжигания угля на тепловых электростанциях подтверждается экспериментально и должна корректироваться в конкретных условиях.
2. Вовлечение в производство альтернативных вяжущих позволяет увеличить сырьевую базу приготовления цемента и уменьшить ущерб окружающей среде.
3. Экспериментально определенные зависимости между расходом комплексного вяжущего и прочностью бетонной смеси позволяют скорректировать расход цемента при сохранении качества бетона.
4. Добавка золы уноса целесообразна для изготовления бетонов в определенных диапазонах режимов подготовки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Der Braunkohlentagebau Bedeutung, Planung, Betrieb, Technik, Umwelt / R.D. Stoll, Ch. Niemann-Delius, C. Drebenstedt, K. Müllensiefen. – Berlin: Springer-Verlag, 2009. – 605 p.
2. Анализ перспективности применения золы-уноса в технологии геополимеров / М.О. Коровкин, В.М. Володин, Н.А. Ерошкина, М.Ю. Чамурлиев, И.Ю. Лавров // Молодежный научный вестник. – 2017. – № 10 (23). – С. 70–77.
3. Bowman S.D. Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) // Background and Application: guidelines for investigating geologic hazards and preparing engineering geology reports, with a suggested approach to geologic-hazard ordinances in Utah. – Utah: The University of Utah, 2016. – P. 198–203.
4. The history of Russian Caucasus ore deposit development / V.I. Golik, Yu.I. Razorenov, V.N. Ignatov, Z.M. Khasheva // The Social Sciences (Pakistan). – 2016. – V. 11. – № 15. – P. 3742–3746.
5. 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.
6. Chen H.L. Brief analysis of the technical points about the tailings pond environmental impact assessment // Advanced Materials Research. – 2014. – V. 955–959. – P. 1685–1689.
7. Shaikh F.U.A., Supit S.W.M. Mechanical and durability properties of high volume fly ash (HVFA) concrete containing calcium carbonate (CaCO₃) nanoparticles // Construction and Building Materials. – 2014. – V. 70. – P. 309–321.
8. Комащенко В.И. Эколого-экономическая целесообразность утилизации горнопромышленных отходов с целью их переработки // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2015. – № 4. – С. 23–30.
9. High-volume fly ash concrete with and without hydrated lime: chloride diffusion coefficient from accelerated test / J.H. Filho, M.H.F. Medeiros, E. Pereira et al. // Journal of Materials in Civil Engineering. – 2013. – V. 25. – Iss. 3. – P. 411–418.
10. The effectiveness of combining the stages of ore fields development / V. Golik, V. Komashenko, V. Morkun, Z. Khasheva // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – V. 7. – № 5. – P. 401–405.
11. Голик В.И., Комащенко В.И., Качурин Н.М. Концепция комбинирования технологий разработки рудных месторождений // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2015. – № 4. – С. 76–88.
12. Ляшенко В.И., Стусь В.П. Охрана окружающей среды в зоне влияния уранового производства // Безопасность жизнедеятельности. – 2015. – № 3. – С. 37–44.
13. Rashad A.M. Potential use of phosphogypsum in alkaliactivated fly ash under the effects of elevated temperatures and thermal shock cycles // Journal of Cleaner Production. – 2015. – V. 87. – P. 717–725.
14. Прокопов А.Ю., Масленников С.А., Шинкарь Д.И. О влиянии специфических условий строительства вертикальных стволов на формирование прочностных характеристик бетона // Научное обозрение. – 2013. – № 11. – С. 102–107.
15. Silva P., De Brito J. Electrical resistivity and capillarity of self-compacting concrete with incorporation of fly ash and limestone filler // Advances in concrete construction. – 2013. – V. 1. – Iss. 1. – P. 65–84.
16. Mining Impact on Environment on the North Ossetian Territory / O.G. Burdzieva, V.B. Zaalishvili, O.G. Beriev, A.S. Kanukov, M.V. Maisuradze // International Journal of geomate. – 2016. – V. 10. – № 1. – P. 1693–1697.
17. Новые технологии подземных сооружений в рамках сдержанных городских условий / М. Плешко, А. Панкратенко, А. Ревякин, Е. Щекина, С. Холодова // ES Web of Conferences. – 2018. – V 33. – 02036.
18. Изыскание эффективной технологии утилизации отходов горно-обогатительного производства в составе твердеющих закладочных смесей / М.В. Рыльникова, Д.Н. Радченко, В.В. Григорьев, К.Ж. Рахматуллина // Недропользование: XXI век. – 2009. – № 3. – С. 33–37.
19. Morkun V., Morkun N., Tron V. Identification of control systems for ore-processing industry aggregates based on nonparametric kernel estimators // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 1. – P. 14–17.
20. Разработка технологии закладочных работ на основе цементно-шлакового вяжущего на Орловском руднике / Л.А. Крупник, Ю.Н. Шапошник, С.Н. Шапошник, Г.Т. Нуршайыкова, З.К. Тунгушбаева // Физико-технические проблемы разработки месторождений полезных ископаемых. – 2017. – № 1. – С. 58–64.

Поступила 31.05.2019 г.

Информация об авторах

Голик В.И., доктор технических наук, профессор, профессор кафедры горного дела Северо-Кавказского государственного технологического университета; главный научный сотрудник Геофизического института Владикавказского научного центра.

Дмитрак Ю.В., доктор технических наук, профессор, ректор Северо-Кавказского государственного технологического университета.

Качурин Н.М., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой геотехнологии и строительства подземных сооружений Тульского государственного университета.

Стась Г.В., кандидат технических наук, доцент кафедры геотехнологии и строительства подземных сооружений Тульского государственного университета.

UDC 504.55.054: 622 (470.6)

PARAMETERS OF ASH DRAIN ACTIVATION AS A BINDER WHEN MAKING A CONCRETE

Vladimir I. Golik^{1,2},
v.i.golik@mail.ru

Yury V. Dmitrak¹,
dmitrak@yandex.ru

Nikolay M. Kachurin³,
ecology_tsu_tula@mail.ru

Galina V. Stas³,
galina_stas@mail.ru

¹ North Caucasus State Technological University,
44, Nikolaev street, Vladikavkaz, 362021, Russia.

² Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Center,
93a, Markov street, Vladikavkaz, 362002, Russia.

³ Tula State University,
92, Lenin avenue, Tula, 300012, Russia.

The relevance of the study is explained by the fact that increase in using commodity cement in manufacture of concrete, including filling mixes for mining, is accompanied by growth in production rate of raw materials for its production and emission of dust-gas pollutants into the atmosphere. One try to find the ways of replacing it by waste from related industries, such as fly ash from coal combustion in thermal power plants.

The aim of the study is to prove that alternative sources of binding components can compete with commercial cement in basic quality indicators, already produced and damaging during storage without recycling.

The main research method is an industrial and laboratory experiment with modeling the cementitious binders. The obtained indicators are systematized, interpreted graphically and they are the basis for decision-making.

Results. The authors have proved the possibility and expediency of partial replacement of marketable cement by fly ash from coal combustion in thermal power plants with appropriate training in activators-disintegrators. The quantitative values of relationship between complex binder consumption and concrete mix strength are experimentally determined, which makes it possible to correct cement consumption while maintaining the desired quality of concrete. The role of mixing operation was detailed to improve the strength of the mixture by comparing possible methods of mixing manually and in disintegrators. The range of expediency of preparing additives for cement was established.

Findings. The addition of fly ash at joint activation with cement can be used as a binder for manufacturing concrete in certain ranges of preparation modes.

Key words:

Binder component, fly ash, disintegrator, cement, concrete, ecology.

REFERENCES

1. Stoll R.D., Niemann-Delius Ch., Drebenstedt C., Müllensiefen K. *Der Braunkohlentagebau Bedeutung, Planung, Betrieb, Technik, Umwelt* [Lignite mining. Meaning, planning, operation, technology, environment]. Berlin, Springer-Verlag, 2009. 605 p.
2. Korovkin M.O., Volodin V.M., Eroshkina N.A., Chamurli-ev M.Yu., Lavrov I.Yu. Analysis of the prospects of the use of fly ash in the technology of geopolymers. *Molodezhny nauchny vestnik*, 2017, no. 10 (23), pp. 70–77. In Rus.
3. Bowman S.D. Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR). *Background and Application: guidelines for investigating geologic hazards and preparing engineering geology reports, with a suggested approach to geologic-hazard ordinances in Utah*. Utah, The University of Utah, 2016. pp. 198–203.
4. Golik V.I., Razorenov Yu.I., Ignatov V.N., Khasheva Z.M. The history of Russian Caucasus ore deposit development. *The Social Sciences (Pakistan)*, 2016, vol. 11, no. 15, pp. 3742–3746.
5. Dmitrak Yu.V., Kamnev E.N. AO «Leading design and survey and research institute of industrial technology» The path length of 65 years. *Gorny zhurnal*, 2016, no. 3, pp. 6–12. In Rus.
6. Chen H.L. Brief analysis of the technical points about the tailings pond environmental impact assessment. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 955–959, pp. 1685–1689.
7. Shaikh F.U.A., Supit S.W.M. Mechanical and durability properties of high volume fly ash (HVFA) concrete containing calcium carbonate (CaCO₃) nanoparticles. *Construction and Building Materials*, 2014, vol. 70, pp. 309–321.
8. Komashchenko V.I. Ecological and economic feasibility of disposal of mining waste for the purpose of their processing. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, 2015, no. 4, pp. 23–30. In Rus.
9. Filho J.H., Medeiros M.H.F., Pereira E. High-volume fly ash concrete with and without hydrated lime: chloride diffusion coefficient from accelerated test. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2013, vol. 25, Iss. 3, pp. 411–418.
10. Golik V., Komashchenko V., Morkun V., Khasheva Z. The effectiveness of combining the stages of ore fields development. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, vol. 7, no. 5, pp. 401–405.
11. Golik V.I., Komashchenko V.I., Kachurin N.M. The concept of combining technology for the development of ore deposits. *Izves-*

- tiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, 2015, no. 4, pp. 76–88. In Rus.
12. Lyashenko V.I., Stus V.P. Environmental protection in the zone of influence of uranium production. *Bezopasnost zhiznedeyatel'nosti*, 2015, no. 3, pp. 37–44. In Rus.
 13. Rashad A.M. Potential use of phosphogypsum in alkali activated fly ash under the effects of elevated temperatures and thermal shock cycles. *Journal of Cleaner Production*, 2015, vol. 87, pp. 717–725.
 14. Prokopov A.Yu., Maslennikov S.A., Shinkar D.I. On the influence of specific conditions for the construction of vertical shafts on the formation of the strength characteristics of concrete. *Nauchnoe obozrenie*, 2013, no. 11, pp. 102–107. In Rus.
 15. Silva P., De Brito J. Electrical resistivity and capillarity of self-compacting concrete with incorporation of fly ash and limestone filler. *Advances in concrete construction*, 2013, vol. 1, Iss. 1, pp. 65–84.
 16. Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B., Beriev O.G., Kanukov A.S., Maisuradze M.V. Mining impact on environment on the north Ossetian territory. *International Journal of geomate*, 2016, vol. 10, no. 1, pp. 1693–1697.
 17. Pleshko M., Pankratenko A., Revyakin A., Shchekina E., Holodova S. New technologies of underground structures in a restrained urban environment. *ES Web of Conferences*, 2018, vol. 33, 02036. In Rus.
 18. Rylnikova M.V., Radchenko D.N., Grigorev V.V., Rahmatullina K.Zh. *Izyskanie effektivnoy tekhnologii utilizatsii otkhodov gorno-obogatitel'nogo proizvodstva v sostave tverdeyushchikh zakladochnykh smesey* [Search for an effective technology for disposal of waste mining and processing production in composition of hardening filling mixtures]. Moscow, Nedropolzovanie: XXI vek Publ., 2009. No. 3, pp. 33–37.
 19. Morkun V., Morkun N., Tron V. Identification of control systems for ore-processing industry aggregates based on nonparametric kernel estimators. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, no. 1, pp. 14–17.
 20. Krupnik L.A., Shaposhnik Yu.N., Shaposhnik S.N., Nurshaykova G.T., Tungushbaeva Z.K. Development of technology of backfilling on the basis of cement-slag binder at Orlovsky mine. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh*, 2017, no. 1, pp. 58–64. In Rus.

Received: 31 May 2019.

Information about the authors

Vladimir I. Golik, Dr. Sc., professor, North Caucasus State Technological University; chief researcher, Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Centre.

Yury V. Dmitrak, Dr. Sc., professor, rector, North Caucasus State Technological University.

Nikolay M. Kachurin, Dr. Sc., professor, head of the Department of Geotechnology and Underground Structures, Tula State University.

Galina V. Stas, Cand. Sc., associate professor, Tula State University.

УДК 624.131

КЛАССИФИЦИРОВАНИЕ ПО КОНСИСТЕНЦИИ ОРГАНОМИНЕРАЛЬНЫХ ГРУНТОВ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Крамаренко Виолетта Валентиновна¹,
kramarenko-v-v@mail.ru

Молоков Виктор Юрьевич¹,
vik3011347@vandex.ru

Абдель Азиз Эль Шинави²,
ageoabdelaziz@vahoo.com

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

² Университет Загазиг,
Египет, 44519, Загазиг.

Актуальность. Классификация органоминеральных грунтов по государственным стандартам давно требует корректирования, так как методы определения классификационных показателей консистенции дают завышенные значения влажности границ раскатывания и текучести из-за высокого содержания органического вещества. Вследствие несовершенства стандартов испытания проводятся субъективно, их результаты мало достоверны и грунты неправильно классифицируются, что приводит к ошибкам в расчетах оснований сооружений. Целесообразность определений консистенции содержащих органику грунтов сомнительна, и в целях снижения затрат при инженерно-геологических изысканиях авторы предлагают детально рассмотреть проблему классификации органоминеральных грунтов на примере многочисленных экспериментальных данных, полученных для грунтов Западно-Сибирского региона, и рекомендуют внести изменения в действующие стандарты.

Цель: на базе экспериментальных исследований органоминеральных грунтов Западной Сибири выявить взаимосвязи между показателями консистенции и содержанием органического вещества и обосновать правомочность использования классификаций по пределам Аттерберга, применяемых для минеральных грунтов.

Объект: органоминеральные глинистые грунты, типичные для Западной Сибири, отобранные на территории окрестностей г. Томска, нефтегазовых месторождений Томской области и Ханты-Мансийского автономного округа

Методы: методы определения влажности на границе текучести и раскатывания (w_L и w_p), содержания органического вещества (I), а также анализ результатов в MS Excel and Statistica

Результаты. Проведен обзор и анализ зарубежных методов определения классификационных показателей консистенции при инженерно-геологических изысканиях, рассмотрены проблемы их получения и применения для грунтов, содержащих органику. Проведены определения органического вещества, показателей влажности и консистенции, получены значимые взаимосвязи между показателями, и составлены регрессионные уравнения. В итоге выявлены несоответствия с действующей классификацией органоминеральных глинистых грунтов из-за завышения показателей консистенции, поэтому в связи с их неинформативностью рекомендуется отказаться от их применения для грунтов, содержащих органику.

Ключевые слова:

Органические и органоминеральные грунты, пределы текучести и раскатывания, содержание органического вещества, индекс пластичности, классификация торфов и органоминеральных грунтов.

Введение

При инженерных изысканиях в районах заболоченных территорий Западной Сибири с широким развитием слабых органических и органоминеральных грунтов большое значение уделяется их классифицированию на основе оценки содержания органического вещества и показателей консистенции глинистых грунтов. Многолетняя практика работы с грунтами показала необоснованность применения классификаций глинистых грунтов по числу пластичности и показателю текучести, согласно ГОСТ 25100 [1], для грунтов органоминеральных. Поводом для статьи послужила неопределенность и неоднозначность классификаций органических и органоминеральных грунтов действующих нормативных документов, в результате чего определяются несущественные параметры для расчетов при проектировании оснований со-

оружений и неоправданно завышаются объемы и стоимость работ при инженерно-геологических изысканиях, в связи с этим цель корректировки классификации весьма актуальна.

Цель работы – выявить на базе экспериментальных исследований взаимосвязи между показателями консистенции и содержанием органического вещества органоминеральных грунтов Западной Сибири, чтобы обосновать (или опровергнуть) применение для них классификаций по пределам Аттерберга.

Задачи включали научный обзор отечественных и зарубежных методик определения показателей консистенции, проблем, связанных с их применением при классифицировании органоминеральных грунтов; проведение лабораторных исследований органоминеральных грунтов разных объектов территории Западной Сибири, а также выявление за-

висимостей между количеством органического вещества и показателями консистенции.

Обзор ранее проведенных исследований

Методики получения показателей пластичности и проблемы, связанные с процедурой их определения и дальнейшим применением, приведены в работах [1–18]. В России наиболее ранние данные о консистенции торфов приведены И.И. Вихляевым в отчете о строительстве канала Москва–Волга [2]. В работах М.П. Воларовича, С.Н. Маркова, А.А. Багрова приводятся данные по определению нижнего предела пластичности на коническом пластометре Кп-3 [3] и пенетрометрах [3–7]. И.Д. Беловидов и Н.Г. Горячкин определяли показатель пластичности торфов на кулачковом пластиметре как отношение диаметра образца после деформации d к его исходному диаметру d_n : $K=d/d_n$ [6]. Так как нижний предел пластичности соответствует максимальной молекулярной влагоемкости, А.Ф. Лебедевым предложены методы центрифугирования, высоких колонн, пленочного равновесия (прессования) [7, 8], основанные на удалении свободной воды и определении остаточной влажности, принимаемой за связанную. Еще два метода предложены в патентах: один основан на взаимосвязи показателей пластичности и текучести [9], второй предлагает оборудование для определения влажности «максимальной молекулярной влагоемкости» [10]. На Российском рынке отечественное оборудование для определения границы пластичности представлено следующими приборами: устройствами для автоматического определения границы пластичности методом раскатывания и методом прессования (ГТ 1.8.2 и ГТ 1.8.1 ООО «НПП Геотек») по ГОСТ 5180 [12]; балансирными конусами Васильева КБВ [14] и ШПВ [15], пенетрометром грунтовым П.О. Бойченко ПБ-1Ф (ООО «РНПО «РосПрибор») [13].

Согласно ГОСТ 25100 [1], заторфованные грунты относятся к глинистым или пескам, соответственно, для определения разновидностей первых необходимо определять показатели консистенции, а для вторых – фракционный состав. Для органоминеральных грунтов из других классификаций стандарта ГОСТ 25100, по-видимому, определение этих показателей не предусмотрено, но постоянно проводится. В России, согласно ГОСТ 5180 [12], определение верхнего предела пластичности w_L (влажности грунта на границе текучести) осуществляется методом балансирного конуса Васильева КБВ, нижнего предела пластичности w_p (влажности грунта на границе раскатывания) – методом раскатывания, а также методом прессования под давлением 2 МПа до завершения водоотдачи грунта. Актуализация ГОСТ 5180 усложнила процедуру тестирования – дистиллированная вода должна соответствовать стандарту ГОСТ 6709 [14], по-видимому, влияние ее pH и УЭС на результаты определения консистенции грунтов весьма значительны. Согласно ГОСТ 21216.1–93 [15], определение

верхнего предела пластичности осуществляется при помощи прибора конструкции Васильева с наконечником в виде усеченного клина, а влажности грунта на границе раскатывания w_p – методом раскатывания.

За рубежом предел текучести LL определяют методом падающего конуса по ИСО/ТС 178–92–12–2094 [17] и методом Казагранде по ASTM D-4318–2000 [18]. Предел пластичности PL определяют, так же как в ГОСТ 5180 [12], методом раскатывания. Для сопоставления результатов применяется формула: $w_L=(LL+8,3)/1,48$, согласно ГОСТ 25100 [1]. Приведенные в таблице Е.3.2. актуализированного ГОСТ 25100 [1] наименования тонкодисперсных органоминеральных и органических грунтов по ASTM D 2487 (ISO 14668) [16] сопоставляются с минеральными грунтами по ГОСТ 25100 [1].

Для заторфованных грунтов рекомендуется определение показателей консистенции, хотя их пластичность имеет совершенно иную природу, чем пластичность минеральных грунтов, и обусловлена наличием битумов, восков и других весьма специфических веществ. Общеизвестно, что содержание органики завышает значения показателей влажности и консистенции, но в то же время большинство классификаций рекомендует их определение, хотя дальнейшее их классифицирование теряет смысл: суглинки называются глинами, супеси – суглинками или глинами, а также консистенция не совпадает с полевым описанием. Подобный вывод подтверждают работы Н.В. Hobbs [19], отметившего, что высокая катионообменная способность остатков растений-торфообразователей усиливает адсорбцию грунтов и увеличивает естественную влажность (обычно в диапазоне 500–2000 %), а также значения предела текучести [19].

А.О. Landva также отмечает, что торф и заторфованные грунты, содержащие значительное количество волокнистого материала, вряд ли имеют четко выраженные пределы текучести, определяемые по методу Казагранде [20]. В отличие от контактов трения в минеральных грунтах, связь между волокнами в торфяном материале с низким содержанием гумуса обеспечивается соединениями клеток и волокон [21], а сама жидкость попадает в поры клеток растительных остатков. Волокна имеют относительно высокую прочность при растяжении, открывая каналы для проникновения и движения жидкости. Подобное строение клеток с двухуровневой структурой микро- и макропор делает их пористыми, гибкими и сжимаемыми [22–24]. Физика и химия торфа и природа его органической матрицы оказывает важное влияние на получаемые значения пределов Аттерберга [25, 26].

Проблемы при определении показателей пластичности наиболее точно описаны в работах В.С. O'Kelly «О непригодности пределов Аттерберга для заторфованных грунтов» и «Пределы Аттерберга и торф» [27, 28]. Как отмечает автор, определения консистенции торфа и других органических

грунтов (осадков сточных вод, биосолидов и материалов для обработки воды) регулярно проводятся на практике при инженерных изысканиях и исследовательской работе, несмотря на серьезные проблемы пригодности для них пределов Аттерберга, неоднозначных процедур их определений и противоречивые точки зрения в литературе о ценности и значимости подобного тестирования. По мнению автора, есть принципиальные моменты, которые делают пределы Аттерберга непригодными для классификации органических и органоминеральных грунтов, структура и свойства которых существенно отличаются от минеральных из-за присутствия в составе как свежего волокнистого, так разложившегося аморфного торфа. На основе экспериментальных наблюдений O'Kelly доказывает, что испытания органоминеральных и органических материалов провести проблематично, тесты не дают существенных результатов, а полученные значения пределов пластичности не являются надежными индикаторами консистенции. Как отмечает автор, в классификациях ASTM [29], BSI [30] и многих других стандартах диапазоны предела текучести LL и числа пластичности PI на графике Казагранде ограничены значениями до 100/120 и 60/70 %, соответственно. Для грунтов органических и органоминеральных этих пределов не достаточно, следовательно, установленные критерии для минеральных грунтов нельзя использовать для органоминеральных [27, 28].

Н.Н. Морарескул также отметил, что понятие консистенции и методика определения ее показателей совершенно не применимы к торфу – у торфа волокнистая структура, внутри волокон вода, и изменение формы без изменения объема не возможно [31].

Процедура определения консистенции торфов и органоминеральных грунтов также вызывает сомнение многих авторов, проводивших подобные испытания. Landva отметил, что, как правило, значения PL следует применять только для образцов, ведущих себя как тонкодисперсные грунты во время проведения данного теста [20].

М. Long сообщает, что из-за влияния волокнистости невозможно определить показатель LL торфа, используя либо чашку Казагранде, либо метод падения конуса [32]. По данным E.R. Farrell, показатель PL может быть установлен только для торфов с определенным количеством глинистой фракции [33]: небольшое содержание глины может не дать достоверных результатов [34]. A.W. Skempton и D.J. Petley [35] сообщают, что показатель PL сложно определить для торфа, даже при высокой степени гумификации. Кроме того, тест, несомненно, зависит от действий оператора и поэтому субъективен. Из торфа можно сформировать слабый, губчатый или волокнистый жгут, и даже если ему придать требуемую форму с необходимыми размерами, при попытке ее раскатывания в соответствии со стандартизированной процедурой он рассыпается [36]. В этом контексте, поскольку торфяной жгут не может быть раскатан до определенно-

го стандартного диаметра (т. е. 3,0 мм) по британскому стандарту [30] или 3,2 мм (1/8 дюйма) по американскому [18], материал определяется как непластичный.

Применение теста LL к другим волокнистым органическим грунтам (осадкам отходов бумажной фабрики [37], осадкам сточных вод/биосолидам [38] и веществам для обработки воды [39]) также подвергается сомнению. Например,

Н.К. Moo-Young и Т.Ф. Zimmie выявили, что бумажные волокна и ткани в шлеме бумажной мельницы вызвали проблемы при резке бороздки в чашке Казагранде при определении показателя текучести [37].

Особенно проблематична задача определения пределов Аттерберга для осадков сточных вод и копроса, в отчетах изыскателей называемых торфами и заторфованными грунтами. Авторам пришлось работать на нескольких объектах с подобными погребенными отложениями. На одном из них встречены отложения мощностью до 8 м, в которых содержание органики варьировало в широких пределах, поэтому были определены и показатели консистенции для органоминеральных грунтов, и степень разложения для органических.

Наиболее интересна с данной точки зрения работа А.И. Сергеева [40], в которой приводятся значения показателей консистенции для наиболее распространенных видов торфа верховых, переходных и низинных залежей. Автор отмечает, что в естественном сложении они находятся в текучем и текучепластичном состоянии; слабо разложившиеся торфа с влажностью более 1000 % непластичны, а с увеличением степени разложения пластичность, как способность торфа изменять форму, увеличивается. В целом, отмечает автор, методика не характеризует настоящую пластичность торфа [40].

Другая проблема заключается в применении итоговых результатов определения характеристик консистенции органических и органоминеральных грунтов (их необходимости и достоверности). Как отмечает Е.Н. Богданов [41], пределы пластичности для этих грунтов не поддаются определению либо, будучи полученными с переходом на показатель текучести, не поддаются осмыслению.

Экспериментальные данные, представленные для псевдоволокнистого торфа [42] и аморфной органической глины, с I_p , равным 98,6 и 57,0 %, соответственно, продемонстрировали, что при определенном давлении они могут легко раскатываться в жгуты при содержании воды значительно ниже измеренных значений PL . Следовательно, измеренные диапазоны пластичности условны, а рассчитанные значения индекса текучести также не являются надежными индикаторами.

Hobbs пришел к выводу, что показатели пластичности торфов (там, где они могут быть получены), не информативны, так как не коррелируют с механическим поведением грунта и, следовательно, определение показателя PL не имеет смысла. Что касается предела текучести LL , Hobbs [19] от-

метил, что он может быть полезным индикатором морфологии (исходная катионообменная способность зависит от типа растительного детрита) и степени гумификации, например значения $LL=800-1500$ % типичны для верховых торфов, а $200-600$ % – для низинных залежей [19]. Однако другие классификации торфа (например, классификация L. von Post [43]) могут выполнять эту роль с большим эффектом [29].

Связи с механическими показателями и показателями консистенции у органических и органоминеральных грунтов, исходя из рекомендаций отечественных нормативов, проявляются в пределах содержания органических веществ только до 25 %: значения показателей физико-механических свойств четвертичных грунтов прогнозируются при содержании I_r менее 5 % (п. А.2 и таблицы А.1, А.2 и А.3. Приложения А СП 22.133330–2016) [44], а характеристики органоминеральных глинистых грунтов с учетом показателя I_L даны в только в интервалах значений $0,05 \leq I_r \leq 0,1$ и $0,1 \leq I_r \leq 0,25$ (таблица А.4 приложения А СП 22.133330–2016) [45]. Расчетные значения сопротивления в таблице Б.5 приложения Б СП 22.133330–2016 [45] даны для песков с содержанием органики до 40 % и при степени разложения до 20 %! Степень разложения песков ставит под сомнение содержание таблицы Б.5 из-за проблематичности ее определения.

Обзор ранее проведенных исследований показал, что характеристики консистенции у органических и органоминеральных грунтов в соответствии с требованиями нормативов для глинистых грунтов определять сложно, классифицировать их по консистенции нецелесообразно, а для прогноза механических показателей их применять не рекомендуется из-за их недостоверности. Судя по действующим нормативам, связи показателей пластичности и механических свойств слабые и носят достоверный характер лишь в грунтах с небольшим содержанием органики. Подтвердить или опровергнуть вышеприведенные выводы помогут экспериментальные исследования консистенции органоминеральных грунтов одного из самых заболоченных регионов мира – Западной Сибири.

Методы исследований

Чтобы выявить взаимосвязи показателей консистенции с содержанием органического вещества для грунтов авторами были исследованы более 1000 образцов заторфованных грунтов с объектов на территориях г. Томска и нефтегазовых месторождений Томской области (Ломовое, Полуденное, Даненберговское, Двуреченское, Крапивинское, Калиновое и др.) и ХМАО (Эльгинское, Мамонтовское и др.). Опробованы грунты с глубиной до 20 м, образцы представлены погребёнными отложениями торфа и заторфованных грунтов, высокозольными бурыми углями. Показатели консистенции определялись согласно ГОСТ 5180 [12], содержание органического вещества – по ГОСТ 23740 [45].

Содержание органики в образцах предварительно определялось визуально, после чего проводились испытания по регламентам действующих методик. Необходимо отметить, что не всегда цвет является индикатором органики – образцы, отобранные при обустройстве месторождений, имели светлую палевую окраску, а содержание в них органики определялось для всех образцов исходя из опыта работ на нефтепромысловых объектах в регионе.

Результаты

По полученным данным были построены графики зависимости влажности на границе текучести и влажности на границе раскатывания от содержания органического вещества отдельно для грунтов г. Томска и его окрестностей (рисунок, а) и территорий нефтегазовых месторождений (рисунок, б) из-за разных интервалов насыщения органическим веществом.

На всех графиках зависимости показателей консистенции от содержания органики отмечается стабильная положительная корреляция. Показатель w_L имеет больший разброс и более существенный рост значений, по сравнению с w_p , что объясняется неоднородностью и разнообразием органического материала, его способностью впитывать и удерживать влагу. Минимальный разброс значений влажности на границе раскатывания, как было отмечено, предопределила выбранная авторами более точная методика прессования грунта. Во всех случаях коэффициенты корреляции имеют значения более 50, подтверждая наличие значимых связей, на основе которых получены следующие регрессионные уравнения для органоминеральных грунтов

- города Томска и его окрестностей:
 $w_L = 2,2I_r + 24,1$ ($r=0,53$);
 $w_p = 1,5I_r + 15,3$ ($r=0,56$);
- территорий нефтегазовых месторождений ХМАО и Томской области:
 $w_L = 0,83I_r + 18,9$ ($r=0,52$);
 $w_p = 0,55I_r + 10,8$ ($r=0,58$).

Полученные регрессионные уравнения позволяют вычислить изменения значений влажности границ текучести и раскатывания с ростом органики на каждый процент и подтверждают, что для Западносибирского региона также нельзя использовать действующие классификации глинистых грунтов для грунтов, содержащих органику. Из зависимостей следует, что по консистенции супеси классифицируются как суглинки при минимальном содержании органики, а при 10–15 % суглинки именуются глинами, и все это происходит при неизменном фракционном составе.

Анализ графика (рисунок, а) показал, что рост характеристик начинается уже при содержании органического вещества 1 %, поэтому предлагается принять это значение как начальное граничное для классификации органоминеральных грунтов, после 20 % предлагается грунты называть органи-

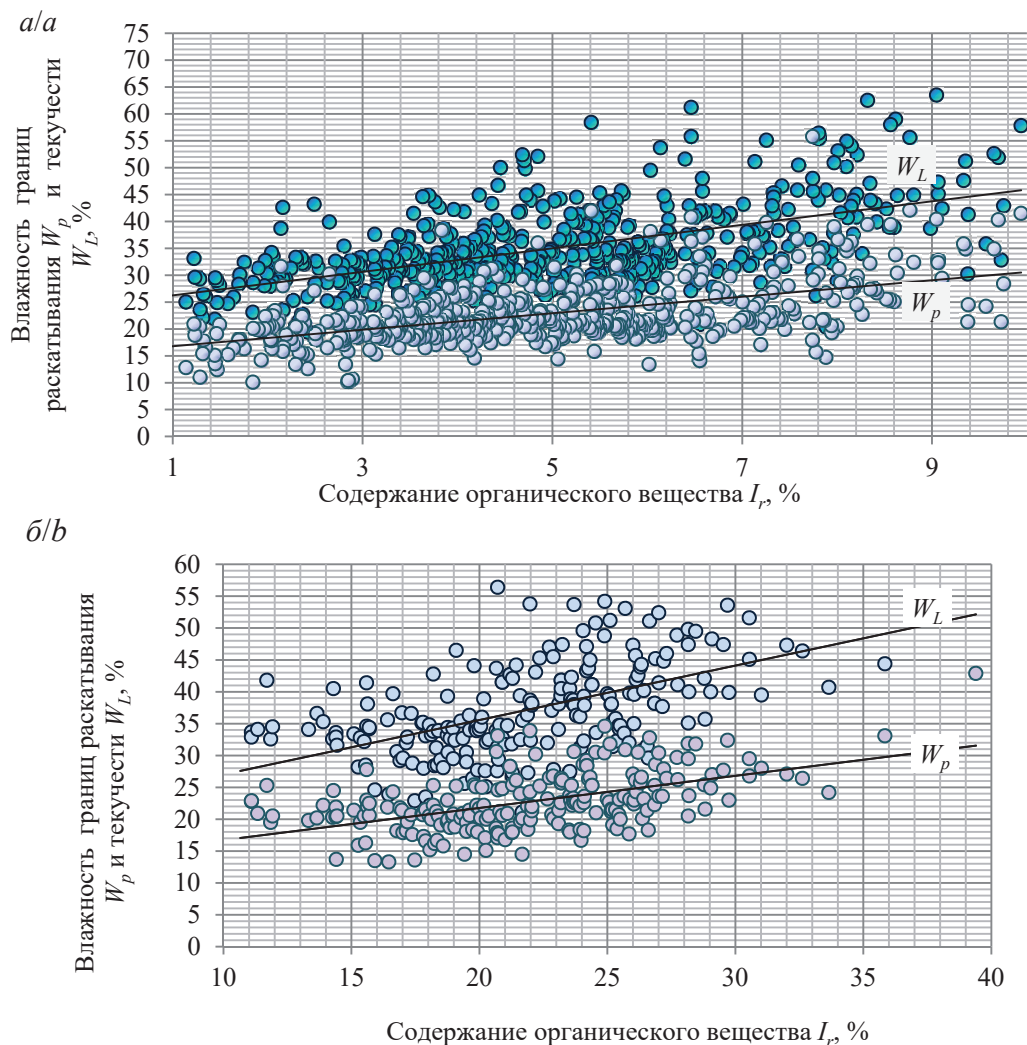


Рисунок. Зависимость влажности границ раскатывания и текучести от содержания органического вещества в грунтах территорий г.Томска (а) и нефтегазовых месторождений (б)

Figure. Dependence of limits of liquid and plasticity on organic matter content in soils of the territories of Tomsk (a) and oil and gas fields (b)

ческими, и не классифицировать их по консистенции.

Таким образом, проведенные исследования подтвердили рост значений показателей консистенции с ростом содержания органики, в связи с этим достоверность числа пластичности и показателя текучести вызывает сомнения, как и дальнейшая классификация органоминеральных грунтов по данным показателям.

Выводы

Анализ ранее проведенных работ и многочисленные испытания авторов подтвердили, что показатели консистенции органоминеральных грунтов сложно определять в соответствии с требованием действующих стандартов, полученные результаты не надежны и неинформативны, носят субъективный характер и не позволяют правильно классифицировать грунты, так как влажность пределов

текучести и раскатывания увеличивается с ростом органического вещества. В работе выявлено, что рост характеристик консистенции начинается при содержании органического вещества 1 %, поэтому предлагается принять значение как начальное граничное для органоминеральных грунтов, классифицировать их по консистенции при содержании органики до 10 %, или не применять для органоминеральных грунтов данную методику, что позволит значительно уменьшить объемы работ при инженерно-геологических изысканиях в заболоченных регионах. Данная работа стала первым шагом по корректировке классификации органических и органоминеральных грунтов и выбору методик определения классификационных показателей.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 25100–2011. Грунты. Классификация. – М.: Стандартинформ, 2013. – 39 с.
2. Канал Москва–Волга. Торф на строительстве канала. 1932–1937 гг. – М.; Л.: Государственное издательство строительной литературы, 1940. – 189 с.
3. Волярович М.П., Марков С.Н. Определение предельного напряжения сдвига торфа методом конического пластометра // Заводская лаборатория. – 1951. – Т. 17. – № 12. – С. 1461–1464.
4. Волярович М.П., Багров А.А. Исследование вязкопластических свойств верхового и низинного видов торфа в широком интервале влажности / Труды КТИ. – 1960. – Вып. 11. – С. 227–241.
5. Лиштван И.И., Король Н.Т. Основные свойства торфа и методы их определения. – Минск: Наука и техника, 1975. – 319 с.
6. Беловидов И.Д., Горячкин В.Г. Классификация консистенций переработанного торфа сырца и метод определения границ нормально-пластической консистенции торфа // Труды Московского торфяного института. Вып. 8. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1958. – С. 35–49.
7. РД 34.15.073–91. Руководство по геотехническому контролю за подготовкой оснований и возведением грунтовых сооружений в энергетическом строительстве. – Л.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 1991. – 421 с.
8. Лабораторные работы по грунтоведению. Изд. 3-е испр. и доп. / под ред. В.Т. Трофимова, В.А. Королёва. – М.: КДУ, 2017. – 654 с.
9. Способ определения границы раскатывания глинистых грунтов: пат. Рос. Федерация № 2305284; заявл. 20.03.2007; опубл. 27.08.2007, Бюл. № 24.
10. Способ определения границы раскатывания глинистых грунтов: пат. Рос. Федерация № 2453840; заявл. 29.07.2009; опубл. 20.06.2012. Бюл. № 48.
11. Смоляницкий Л.А. Ускоренный способ определения границы раскатывания грунта // Вестник Воронежского Государственного Университета. Геология. – 2007. – Т. № 2. – С. 195–200.
12. ГОСТ 5180–16 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. – М.: Стандартинформ, 2016. – 18 с.
13. РИ 06–2015 Методы лабораторной пенетрации. – СПб.: Открытое акционерное общество «Трест геодезических работ и инженерных изысканий», 2015. – 18 с.
14. ГОСТ 6709–72. Вода дистиллированная. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 1972. – 12 с.
15. ГОСТ 21216.1–93. Сырье глинистое. Метод определения пластичности. – М.: Стандартинформ, 1993. – 6 с.
16. ASTM D 2487–17: Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification). – West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017. URL: <https://www.astm.org/Standards/D2487.htm> (дата обращения 14.07.2018).
17. PKN CEN ISO/TS 17892–1:2009. ISO 17892–12:2018 Geotechnical investigation and testing. Laboratory testing of soil. P. 12: Determination of liquid and plastic limits. URL: <https://www.iso.org/standard/72017.html> (дата обращения 14.07.2018).
18. ASTM D4318 – 17e1: Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017. URL: <https://www.astm.org/Standards/D4318.htm> (дата обращения 14.07.2018).
19. Hobbs N.B. Mire morphology and the properties and behaviour of some British and foreign peats // Quarterly Journal of Engineering Geology. – 1986. – V. 19. – P. 7–80.
20. Structures on peatland – geotechnical investigations / A.O. Landva, P.E. Pheneey, P. La Rochelle, J.L. Briaud // Proceedings of the Advances in Peatlands Engineering Conference. – Ottawa, Canada: National Research Council of Canada, 1986. – P. 31–52.
21. Adams J.I. A comparison of field and laboratory measurements in peat // Proc. Ninth Muskeg Research Conf. and Ontario Hydro-Research. – Canada, 1963. – V. 15. – P. 1–7.
22. Berry P.L., Poskitt T.J. The consolidation of peat // Geotechnique. – 1972. – V. 22 (1). – P. 25–52.
23. Dhowian A.W., Edil T.B. Consolidation behavior of peats // Geotech. Test. J. – 1980. – V. 3 (3). – P. 105–114.
24. Asadi A., Huat B.B.K., Hanafi M.M., Mohamed T.A., Shariatmadari N. Chemico-geomechanical sensitivities of tropical peat to pore fluid pH related to controlling electrokinetic environment // Journal of the Chinese Institute of Engineers. – 2011. – V. 34 (4). – P. 481–487.
25. Yang J., Dykes A.P. The liquid limit of peat and its application to the understanding of Irish blanket bog failures // Landslides. – 2006. – V. 3 (3). – P. 205–216.
26. Hobbs N.B. Mire morphology and the properties and behaviour of some British and foreign peats // Quarterly Journal of Engineering Geology. – 1986. – V. 19 (1). – P. 7–80.
27. O'Kelly B.C. Atterberg limits and peat // Environmental Geotechnics. – 2014. URL: <http://dx.doi.org/10.1680/envgeo.15.00003> (дата обращения 14.07.2018).
28. O'Kelly B.C. Atterberg limits are not appropriate for peat soils // Environmental Geotechnics. – 2015. URL: https://www.researchgate.net/publication/287973227_Atterberg_limits_are_not_appropriate_for_peat_soils (дата обращения 14.07.2018).
29. ASTM D2487–17, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). – West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017. URL: <https://www.astm.org/Standards/D2487.htm> (дата обращения 14.07.2018).
30. BSI (British Standards Institution). Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes classification tests, BS1377: P. 2. – Milton Keynes, UK: British Standards Institution, 1990. – 110 p.
31. Морарескул Н.Н. Основания и фундаменты в торфяных грунтах. – Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1979. – 80 с.
32. Long M., Boylan N. In-situ testing of peat – a review and update on recent developments // Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA. – 2012. – V. 43 (4). – P. 41–45.
33. Farrell E.R. Organics/Peat Soils // ICE Manual of Geotechnical Engineering. V. 1 / Eds. J. Burland, T. Chapman, H. Skinner, M. Brown. – London: ICE Publishing, 2012. – P. 463–479.
34. Whitlow R. Basic Soil Mechanics. 4th ed. – London: Pearson Education, 2001. – 592 p.
35. Skempton A.W., Petley D.J. Ignition loss and other properties of peats and clays from Avonmouth, King's Lynn and Cranberry Moss // Geotechnique. – 1970. – V. 20 (4). – P. 343–356.
36. New technique assessment of plastic limit of soft clay particularly peat soils / R. Adon, N. Yasufuku, R. Ishikura, D. Wijeyesekera // Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University (Fukuoka, Japan). – 2013. – V. 73 (1). – P. 47–55.
37. Moo-Young H.K., Zimmie T.F. Geotechnical properties of paper mill sludges for use in landfill covers // Journal of Geotechnical Engineering ASCE. – 1996. – V. 122 (9). – P. 768–776.
38. O'Kelly B.C., Zhang L. Consolidated-drained triaxial compression testing of peat // Geotechnical Testing Journal. – 2013. – V. 36 (3). – P. 310–321.
39. O'Kelly B.C. Characterisation and undrained strength of amorphous clay // Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering. – 2014. – V. 167 (3). – P. 311–320. URL: <http://dx.doi.org/10.1680/geng.11.00025> (дата обращения 14.07.2018).
40. Сергеев А.И. Методика инженерно-геологического изучения торфяных массивов. – М.: Наука, 1974. – 126 с.
41. Богданов Е.Н. О физико-механических свойствах заторфованных грунтов торфов // Грунтоведение. – 2014. – № 2. – С. 43–52.
42. Zhang L., O'Kelly B.C. The principle of effective stress and triaxial compression testing of peat // Proceedings of the Institu-

- tion of Civil Engineers – Geotechnical Engineering. – 2014. – V. 167 (1). – P. 40–50. URL: <http://dx.doi.org/10.1680/geng.12.00038> (дата обращения 14.07.2018).
43. Von Post L. Sveriges Geologiska Undersoknings torvinventering och nogra av dess hittils vunna resultat (SGU peat inventory and some preliminary results). – Sweden, Jonkoping: Svenska Moskulturföreningens Tidskrift, 1922. – P. 1–37.
44. СП 22.133330–2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция взамен СНиП 2–02.01–83 – М.: НИИОСП им.Н.М.Герсеванова, 2016. – 225 с.
45. ГОСТ 23740–2016 Методы определения содержания органических веществ – М.: Стандартинформ, 2016. – 18 с.

Поступила 14.05.2019 г.

Информация об авторах

Крамаренко В.В., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского Политехнического университета.

Молоков В.Ю., ассистент отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского Политехнического университета.

Шинави А.Э., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры инженерной и экологической геологии Факультета естественных наук Университета Загазиг.

UDC 624.131

CLASSIFICATION ON CONSISTENCY OF ORGANOMINERAL SOILS OF WESTERN SIBERIA

Violetta V. Kramarenko¹,

kramarenko-v-v@mail.ru

Viktor Yu. Molokov¹,

vik3011347@yandex.ru

Abdel Aziz El Shinawi²,

ageoabdelaziz@yahoo.com

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

² Zagazig University,
44519 Zagazig, Egypt.

Relevance. Classification of organomineral soils according to state standards require correction. Methods for determining classification consistency indicators give excessive values moisture content of the plasticity and liquid limits due to the high content of organic matter. Due to imperfect standards, their results are unreliable and the grounds are incorrectly classified, which leads to errors in calculations of the base of constructions. The expediency of determining the consistency of organics containing soils is doubtful, and in order to reduce costs in engineering and geological investigations, the authors propose to consider in detail the problem of classification of organomineral soils by the example of numerous experimental data obtained for soils in the West Siberian region and recommend the changes to existing standards.

The main aim of the research is to identify the relationship between consistency indicators and organic matter content based on the experimental studies of organic-mineral soils of Western Siberia and justify the use of the Atterberg limits applied for mineral soils.

Object: organomineral clay soils typical for Western Siberia, picked on the territory surroundings of the city of Tomsk, oil and gas fields of Tomsk region and Khanty-Mansiysky Autonomous District.

Research methods include a method for determining limits of liquid and plasticity (w_L and w_p) and organic content (I_o), as well as by analyzing the results using MS Excel and Statistica.

Results. The authors have carried out the review and analysis of foreign methods for determining the classification indexes of consistency in engineering-geological surveys and considered the problems of their carrying out and applications for soils containing organic substances. The determinations of organic matter, moisture content and consistency were carried out, significant interrelations between the indices were obtained and regression equations were compiled. As a result, inconsistencies with the current classification of organomineral clay soils due to overestimation of the consistency indices are revealed, therefore, in relation to their uninformiveness, it is recommended to abandon their use for organics containing soils.

Key words:

Organic and organomineral soils, liquid and plasticity limits, organic content, plasticity index, classification of peats and organomineral soils.

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

REFERENCES

1. GOST 25100–2011. Grunty. Klassifikatsiia [State Standard 25100–2011. Soils. Classification]. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 39 p.
2. Vikhlyayev I.I. Kanal Moskva–Volga. Torf na stroitelstve kanala. 1932–1937 [Channel Moscow–Volga. Peat in the construction of the canal. 1932–1937]. Leningrad, Gosudarstvennoe izdatelstvo stroitelnoy literatury Publ., 1940. 189 p.
3. Volarovich M.P., Markov S.N. Opredelenie predelnogo napryazheniya sdviga torfa metodom konicheskogo plastometra [Determination of the maximum shear stress of peat by a conical plastometer]. Zavodskaya laboratoriya, 1951, vol. 17, no. 12, pp. 1461–1464.
4. Volarovich M.P., Bagrov A.A. Issledovanie vyazkoplasticheskikh svoystv verkhovogo i nizinnogo vidov torfa v shirokom intervale vlazhnosti [Study of visco-plastic properties of upper and lower peat species in a wide range of humidity]. Trudy KTI, 1960, Iss. 11, pp. 227–241.
5. Lishtvan I.I., Korol N.T. Osnovnye svoystva torfa i metody ikh opredeleniya [Main properties of peat and methods of their definition]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1975. 319 p.
6. Belovidov I.D., Goriachkin V.G. Klassifikatsiya konsistentiy pererabotannogo torfa syrta i metod opredeleniya granits normalno-plasticheskoy konsistentii torfa [Classification of raw processed peat consistencies and method of determining the boundaries of normal plastic peat consistency]. Trudy Moskovskogo torfyanogo instituta [Proceedings of Moscow Peat Institute]. Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1958. pp. 35–39.
7. RD 34.15.073–91 Rukovodstvo po geotekhnicheskomu kontrolyu za podgotovkoy osnovaniy i vozvedeniyem gruntovykh sooruzheniy v energeticheskoy stroitelstve [RD 34.15.073–91 Guidelines for geotechnical control of Foundation preparation and construction of ground structures in power engineering]. Leningrad, B.E. Vedenev VNIIG Publ, 1991. 427 p.
8. Korolev V. A., Trofimov V.T., Samarin E.N. Laboratornye raboty po gruntovedeniyu. [Laboratory works on soil science]. Moscow, KDU Publ., 2017. 654 p.
9. Ermolaeva A.N., Sokurov V.V., Ivanov A.A. Sposob opredeleniya granitsy raskatyvaniya glinistykh gruntov [Method for determining the boundary of rolling clay soils]. Patent RF, no. 2305284, 2007.

10. Kalbergenov R.G., Kutergin V.N., Novikov P.I., Frolov S.I. *Sposob opredeleniya granitsy raskatyvaniya glinistykh gruntov* [Method for determining the boundary of rolling clay soils]. Patent RF, no. 2453840, 2009.
11. Smolyanitskiy L.A. Accelerated method for determining the boundary of soil rolling. *Bulletin of Voronezh state University. Geology*, 2007, vol. 2 pp. 195–200. In Rus.
12. GOST 5180–16. *Grunt. Metody laboratornogo opredeleniya fizicheskikh kharakteristik* [State Standard 5180–16. Soils. Methods of laboratory determination of physical characteristics.]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 18 p.
13. RI 06–2015. *Metody laboratornoy penetratsii* [Working instruction 06–2015. Methods of laboratory penetration]. St-Petersburg, Trest geodezicheskikh rabot i inzhenernykh izyskaniy Publ., 2018. 18 p.
14. GOST 6709–72. *Voda distillirovannaya. Tekhnicheskie usloviya* [State Standard 6709–72. Water distilled. Technical conditions.]. Moscow, Standartinform Publ., 1972. 12 p.
15. GOST 21216.1–93. *Syre glinistoe. Metod opredeleniya plastichnosti* [State Standard 21216.1–93. Raw clay. Method for the determination of plasticity.]. Moscow, Standartinform Publ., 1993. 6 p.
16. ASTM D 2487–17. *Standard practice for classification of soils for engineering purposes* (Unified Soil Classification). West Conshohocken, PA, ASTM International, 2017. Available at: <https://www.astm.org/Standards/D2487.htm> (accessed 14 July 2018).
17. PKN CEN ISO/TS 17892–1:2009. *ISO 17892–12:2018 Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil. P. 12: Determination of liquid and plastic limits*. Available at: <https://www.iso.org/standard/72017.html> (accessed 14 July 2018).
18. ASTM D4318 – 17e1. *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. West Conshohocken, PA, ASTM International, 2017. Available at: <https://www.astm.org/Standards/D4318.htm> (accessed 14 July 2018).
19. Hobbs N.B. Mire morphology and the properties and behaviour of some British and foreign peats. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 1986, vol. 19, pp. 7–80.
20. Landva A.O., Pheeney P.E., La Rochelle P., Briaud J.L. Structures on peatland – geotechnical investigations. *Proceedings of the Advances in Peatlands Engineering Conference*. Ottawa, Canada, National Research Council of Canada, 1986. pp. 31–52.
21. Adams J.I. A comparison of field and laboratory measurements in peat. *Proc. Ninth Muskeg Research Conf. and Ontario Hydro Research*. Canada, 1963. Vol. 15, pp. 1–7.
22. Berry P.L., Poskitt T.J. The consolidation of peat. *Geotechnique*, 1972, vol. 22 (1), pp. 25–52.
23. Dhowian A.W., Edil T. B. Consolidation behavior of peats. *Geotech. Test. J.*, 1980, vol. 3 (3), pp. 105–114.
24. Asadi A., Huat B.B.K., Hanafi M.M., Mohamed T.A., Shariatmadari N. Chemico-geomechanical sensitivities of tropical peat to pore fluid pH related to controlling electrokinetic environment. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 2011, vol. 34 (4), pp. 481–487.
25. Yang J., Dykes A.P. The liquid limit of peat and its application to the understanding of Irish blanket bog failures. *Landslides*, 2006, vol. 3 (3), pp. 205–216.
26. Hobbs N.B. Mire morphology and the properties and behaviour of some British and foreign peats. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 1986, vol. 19 (1), pp. 7–80.
27. O'Kelly B.C. Atterberg limits and peat. *Environmental Geotechnics*, 2014. Available at: <http://dx.doi.org/10.1680/envgeo.15.00003> (accessed 14 July 2018).
28. O'Kelly B.C. Atterberg limits are not appropriate for peat soils. *Environmental Geotechnics*, 2015. Available at: https://www.researchgate.net/publication/287973227_Atterberg_limits_are_not_appropriate_for_peat_soils (accessed 14 July 2018).
29. ASTM D2487–17. *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes* (Unified Soil Classification System). West Conshohocken, PA, ASTM International, 2017. Available at: <https://www.astm.org/Standards/D2487.htm> (accessed 14 July 2018).
30. BSI (British Standards Institution). *Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes* (Shear Strength Tests: Total Stress), BS1377. P. 7. Milton Keynes, UK, British Standards Institution, 1990. 110 p.
31. Morareskul H.H. *Osnovaniya i fundamenty v torfyanykh gruntakh* [Bases and foundations in peat soils]. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1979. 80 p.
32. Long M., Boylan N. In-situ testing of peat – a review and update on recent developments. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 2012, vol. 43 (4), pp. 41–45.
33. Farrell E.R. Organics/Peat Soils. *ICE Manual of Geotechnical Engineering*. Eds. J. Burland, T. Chapman, H. Skinner, M. Brown. London, ICE Publ., 2012. Vol. 1, pp. 463–479.
34. Whitlow R. *Basic Soil Mechanics*. 4th ed. London, Pearson Education, 2001. 592 p.
35. Skempton A.W., Petley D.J. Ignition loss and other properties of peats and clays from Avonmouth, King's Lynn and Cranberry Moss. *Geotechnique*, 1970, vol. 20 (4), pp. 343–356. Available at: <http://dx.doi.org/10.1680/geot.1970.20.4.343> (accessed 14 July 2018).
36. Adon R., Yasufuku N., Ishikura R., Wijeyesekera D. New technique assessment of plastic limit of soft clay particularly peat soils. *Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University (Fukuoka, Japan)*, 2013, vol. 73 (1), pp. 47–55.
37. Moo-Young H.K., Zimmie T.F. Geotechnical properties of paper mill sludges for use in landfill covers. *Journal of Geotechnical Engineering ASCE*, 1996, vol. 122 (9), pp. 768–776.
38. O'Kelly B.C., Zhang L. Consolidated-drained triaxial compression testing of peat. *Geotechnical Testing Journal*, 2013, vol. 36 (3), pp. 310–321.
39. O'Kelly B.C. Characterisation and undrained strength of amorphous clay. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering*, 2014, vol. 167 (3), pp. 311–320. Available at: <http://dx.doi.org/10.1680/geng.11.00025> (accessed 14 July 2018).
40. Sergeev A.I. *Metodika inzhenerno-geologicheskogo izucheniya torfianyykh massivov* [Methods of engineering-geological study of peat massifs]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 126 p.
41. Bogdanov E.N. O fiziko-mekhanicheskikh svoystvakh zatorfovanyykh gruntov torfov [About physical and mechanical properties of the ground peat]. *Gruntovedenie*, 2014, no. 2, pp. 43–52.
42. Zhang L., O'Kelly B.C. The principle of effective stress and triaxial compression testing of peat. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering*, 2014, vol. 167 (1), pp. 40–50. Available at: <http://dx.doi.org/10.1680/geng.12.00038> (accessed 14 July 2018).
43. Von Post L. *Sveriges Geologiska Undersoknings torvinventering och nogra av dess hittills vunna resultat* [SGU peat inventory and some preliminary results]. Jonkoping, Sweden, Svenska Mosskulturforeningens Tidskrift, 1922. pp. 1–37.
44. SP 22.133330–2016. *Osnovaniya zdaniy i sooruzheniy. Aktualizirovannaya redaktsiya vzamen SNiP 2–02.01–83* [Set of rules 22.133330–2016. Bases of buildings and structures. Updated version instead of Building codes and regulations 2–02.01–83]. Moscow, NIOSP im. N.M. Gersevanova Publ., 2016. 225 p.
45. GOST 23740–2016 *Metody opredeleniya soderzhaniya organicheskikh veshchestv* [State Standard 23740–2016 Methods for determination of organic matter]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 18 p.

Received: 14 May 2019.

Information about the authors

Violetta V. Kramarenko, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Victor Yu. Molokov, senior laboratory assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

Abdelaziz El Shinawi, PhD, associate professor of engineering and environmental geology, Zagazig University.

УДК 624.131

К ВОПРОСУ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ЗА ОСАДКАМИ СООРУЖЕНИЙ

Кулешов Александр Петрович¹,
kuleshov@inzhgeos.ru

Пендин Вадим Владимирович¹,
pendin@yandex.ru

¹ Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе,
Россия, 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23.

Актуальность работы обусловлена обеспечением сохранности существующей застройки, находящейся в зоне влияния нового строительства. После того, как выявлены инженерно-геологические процессы, негативно влияющие на условия функционирования сооружения, и определены параметры, от которых зависит развитие таких процессов, возникает необходимость оценки уровня рисков. В последнее время наиболее часто используется корреляционно-регрессионный анализ данных режимных наблюдений, основанный на вероятностно-статистической группе методов – закономерно случайном характере развития процессов во времени и пространстве.

Цель: статистический анализ характеристик величин деформаций зданий, возникающих под влиянием нового строительства, нахождение и описание связи между осадочными марками и деформационными знаками, расположенными на зданиях, оценка режима функционирования элементарных природно-технических систем в сложных инженерно-геологических условиях, анализ накопленной инженерно-геологической информации по объекту, в том числе результаты предпостроечных изысканий.

Методы: анализ режимных наблюдений с помощью автокорреляционной функции, сравнение результатов с данными натурных многолетних наблюдений, представление объекта исследования в виде сложной системы, состоящей из совокупности элементов, между которыми существуют связи и взаимодействия, установление совокупности опасности, выделение зон риска для определенного объекта в виде возможных потерь во времени, оценка уязвимости поражаемых объектов от каждого из выявленных процессов, прогноз развития техноприродных опасностей в пространстве, деформационная съемка.

Результаты. Один из важнейших компонентов обеспечения надежной и безопасной эксплуатации любого сооружения – система мониторинга. На основе данных, полученных в ходе реализации литомониторинга, осуществляется контроль за состоянием системы посредством сравнения значений наблюдаемых показателей со стандартной системой критериев, а также вырабатываются управляющие решения по оптимизации ее функционирования. Анализ всех собранных материалов, а также результатов диагностики состояния литотехнической системы на текущий момент времени, позволяет выявить парагенезис инженерно-геологических процессов, определяющих возможность развития экстремальных ситуаций, создающих угрозу безопасной эксплуатации объекта. Целесообразно построение карт разностей, отражающих изменения показателей свойств взаимодействия технического объекта и геологического тела и определяющих направление дальнейшего развития состояния системы.

Ключевые слова:

Геотехнический мониторинг, система наблюдений, корреляционный анализ, грунт, напряженно-деформированное состояние, процесс деформации, осадки сооружений, режимные наблюдения.

Введение

Для современного этапа экономического и общественного развития в России характерно расширение строительного производства и проведение масштабного строительства в крупных городах, сопровождающееся постоянным ростом сложности возводимых объектов и условий, в которых осуществляется их строительство [1]. Это неизбежно порождает новые задачи, связанные с обеспечением безопасной жизнедеятельности в условиях мегаполиса, определяющейся, во-первых, надежностью самих строящихся сооружений, и, во-вторых, влиянием проводимого строительства на уже существующую инфраструктуру [2].

Пренебрежение безопасностью может привести к проявлению в ранее построенных зданиях трещин в стенах, перекосов, сдвигу плит перекрытий, разрушению конструкций, т. е. нарушению нормальной эксплуатации зданий, к авариям, а в некоторых случаях даже к катастрофам.

Опасность возникновения подобных явлений увеличивается при сочетании плотной окружаю-

щей застройки с наличием сложных инженерно-геологических условий в местах нового строительства или реконструкции зданий и сооружений из-за возможного развития целого ряда негативных и техногенных процессов [3].

Поэтому новое строительство или реконструкция уже существующих зданий сопровождаются обследованием этих зданий в зоне влияния нового строительства, организацией наблюдений за поведением строящегося или реконструируемого здания и окружающей его существующей застройки [4].

При этом очевидно, что контроль технического состояния несущих конструкций должен носить систематический характер и позволять осуществлять оценку происходящих изменений на основе количественных критериев, т. е. базироваться на процедурах выявления соответствия фактической прочности, жесткости и устойчивости конструктивных элементов нормативным требованиям [5].

В настоящее время в крупных мегаполисах (например, г. Москва, Санкт-Петербург, Новосибирск, Красноярск) проводятся работы по обсле-

дованию технического состояния отдельных объектов. Однако большое количество зданий и сооружений не охвачено вообще никаким контролем, хотя жизнедеятельность города динамично приводит как к ухудшению свойств грунтов, так и к негативным воздействиям силового и не силового характера на наземные конструкции зданий и сооружений [6]. Все это в условиях исчерпания нормативных сроков эксплуатации большого количества объектов недопустимо и требует системно организованных наблюдений.

Всем этим обусловлено появление в нормативных документах указаний, регламентирующих проведение геотехнического мониторинга на объектах нового строительства и реконструкции [7].

Появление геотехнического мониторинга в перечне работ, сопровождающих строительство, обусловлено особенностями развития урбанизированных территорий.

Организация режимных наблюдений (геотехнического мониторинга) за состоянием литотехнической системы, в совокупности с квалифицированным анализом получаемой в процессе мониторинга информации, позволяют своевременно принять верное управленческое решение и избежать непредвиденных экономических потерь [8].

В нормативных документах существует несколько определений геотехнического мониторинга.

В соответствии с СП 305.1325800.2017 «Здания и сооружения. Правила проведения геотехнического мониторинга при строительстве» [9] и СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений» [10], геотехнический мониторинг – комплекс работ, основанный на натурных наблюдениях за поведением конструкций вновь возводимого или реконструируемого сооружения, его основания, в т. ч. грунтового массива, окружающего (вмещающего) сооружение, и конструкций сооружений окружающей застройки.

В соответствии с ТСН 50–304–2001 г. Москвы (МГСН 2.07–01) «Основания, фундаменты и подземные сооружения» [11]: «Геотехнический мониторинг – система наблюдений и контроля за состоянием и изменением грунтовых, природных и техногенных условий в процессе строительства и эксплуатации объекта».

Другим документом, регламентирующим организацию режимного контроля за состоянием строящихся и существующих зданий и сооружений, а также вмещающим его грунтовым массивом, является «Правила подготовки и производства земляных работ, обустройства и содержания земляных площадок в городе Москве», однако в этом документе данный комплекс наблюдений определяется как «система инженерного мониторинга».

Необходимость проведения мониторинга существующей застройки, попадающей в зону влияния нового строительства, регламентируется «Инструкцией по наблюдениям за движениями земной поверхности и расположенными на ней объектами при строительстве в Москве подземных сооруже-

ний», а также Постановлением Правительства Москвы № 857-ПП от 7 декабря 2004 г.

Помимо отраслевых нормативных документов и регионального законодательства, необходимость проведения мониторинга с 2009 г. прописана на федеральном уровне в ФЗ № 384 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».

Несмотря на разные названия и формулировки, суть требований и цель производства работ по геотехническому (инженерному) мониторингу остается одинаковой – предупреждение возникновения аварийных ситуаций [12].

В соответствии с требованиями СП 22.13330.2016 и п. 6.1 ГОСТ 31937–2011 [13] – геотехнический мониторинг осуществляется в период проведения реконструкции сооружения и на начальном этапе эксплуатации реконструируемого объекта.

Цель настоящей работы: оценка влияния нового строительства на соседние существующие здания и сооружения, прогноз изменения в сложных инженерно-геологических условиях и корреляционный анализ данных мониторинговых наблюдений.

В задачи исследования входило: проведение анализа результатов наблюдений по режимным сетям мониторинга с целью его оптимизации, применение и оценка корреляционного метода в рамках геотехнического мониторинга, качественное рассмотрение оценки вероятности риска развития негативных инженерно-геологических процессов.

Предметом исследования является взаимодействие между структурными элементами локальной природно-технической системы «сооружение–основание–грунт» [14].

Для организации работ по выполнению инструментального геодезического мониторинга за осадками фундаментов, кренами и горизонтальными перемещениями отдельных конструкций окружающих зданий в период строительства создана система геотехнического мониторинга, состоящая из стальных и плитных марок, установленных на несущих стенах по периметру и подвальной части зданий, на опорах теплотрассы и ограждающих конструкциях локальной литотехнической системы в условиях стесненной городской застройки, в районе строительства многофункционального делового центра с подземной автостоянкой по адресу: г. Москва, ул. Большая Садовая, д. 5, стр. 1, 2; ул. 2-я Брестская, д. 1, стр. 1; ул. Гашека, вл. 12 часть стр. 1 (подъезды 1–4), стр. 5–7.

Конструктивные особенности сооружений

Рассматриваемая локальная литотехническая система взаимодействия «основание–грунт» состоит из следующих составных частей (рис. 1):

- многофункциональный деловой центр с подземной автостоянкой;
- здание по адресу: ул. Гашека, д. 12, стр. 2;
- здание по адресу: ул. Гашека, д. 12, стр. 8;
- здание по адресу: ул. Большая Садовая, д. 5, стр. 1, 2.

Здание гостиничного комплекса «Пекин» по адресу ул. Большая Садовая, д. 5, стр. 1, 2 спроектировано архитектором Д.Н. Чечулиным в конце 30-х гг. XX в. Работы по строительству здания начались в 1939 г. и закончились в 1958 г. Статус здания – «старое». Фундаменты здания под наружными и внутренними несущими стенами ленточные, из монолитного железобетона. Минимальное расстояние от здания до ограждения котлована строящегося объекта составляет ~17,3 м.

Верхнеюрские породы оксфордского яруса (J_{ox}) представлены глинами твердой и полутвердой консистенции, мощностью 6,5...9,0 м. Под верхнеюрскими отложениями, на глубине 23,1...26,0 м и залегают породы касимовского яруса верхнего отдела каменноугольной системы (C_{ks}), представленного следующими подsvитами

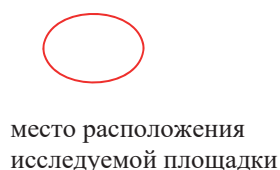


Fig. 1. *Situational plan of the research area*

(сверху вниз): измайловской (C_{izm}); мешеринской (C_{msc}); перхуровской (C_{pr}); неверовской (C_{nv}); ратмировской (C_{rt}); воскресенской (C_{vs}).

Гидрогеологические условия участка характеризуются наличием надъюрского и трех верхнекаменноугольных водоносных горизонтов – измайловского, перхуровского и ратмировского [16].

Организация мониторинга

В состав работ по геотехническому мониторингу входит: проектируемое новое строительство комплекса зданий; ограждение котлована «стена в грунте»; здания окружающей застройки; инженерные коммуникации.

Для организации работ по геодезическому мониторингу на несущих стенах по периметру зданий окружающей застройки и на опорах тепло-трассы были установлены осадочные и деформационные марки (рис. 3). Ситуационный план окружающей застройки, попадающей в зону влияния нового строительства, представлен на рис. 2.

Методика инструментальных геодезических наблюдений заключается в периодическом (по циклам) высокоточном нивелировании ственных марок по программе II класса двойными ходами «прямо» и «обратно» [17].

Работы по геотехническому мониторингу выполнялись посредством визуально-инструментального наблюдения за техническим состоянием окружающей застройки и наблюдением за осадками посредством геодезических измерений перемещений деформационных марок, установленных на ограждающие конструкции.

В каждом цикле наблюдений вычисляются отметки всех установленных марок. По разности отметок одноименных марок в смежных циклах измерений получают осадки марок, которые выписываются в сводные таблицы с нарастающим итогом за весь период наблюдений (раз в месяц) [18]. При выполнении наблюдений использовался высокоточный цифровой нивелир Trimble DINI 12 и комплект штрихкодовых нивелирных реек с инварной полосой. Нивелирная сеть строилась в виде системы полигонов, схема которых одинакова во всех циклах наблюдений. Невязки в полигонах нивелирной сети не превышают величин, вычисленных по формуле $Fh = \pm 0,5 \text{ мм} \sqrt{n}$, где n – количество штативов в полигонах. После выполнения полевых измерений все данные нивелирования обрабатываются по компьютерной программе строгого уравнивания STAR*LEV [19].

велирной сети не превышают величин, вычисленных по формуле $Fh = \pm 0,5 \text{ мм} \sqrt{n}$, где n – количество штативов в полигонах. После выполнения полевых измерений все данные нивелирования обрабатываются по компьютерной программе строгого уравнивания STAR*LEV [19].



Рис. 2. Ситуационный план окружающей застройки, попадающей в зону влияния объекта нового строительства: «Реставрация с приспособлением к современным требованиям гостиничного комплекса «Пекин» и застройка прилегающей территории»

Fig. 2. Situational plan of the surrounding buildings, which fall into the zone of influence of the new construction object: «Restoration with adaptation to modern requirements of the hotel complex «Beijing» and the construction of the adjacent territory»

При обследовании строительных конструкций производилось изучение трещин, выявление причин их возникновения и динамики развития [20]. На каждой трещине устанавливался маяк, который при развитии трещины разрывается. Маяк устанавливался в местах наибольшего развития трещины (фото).



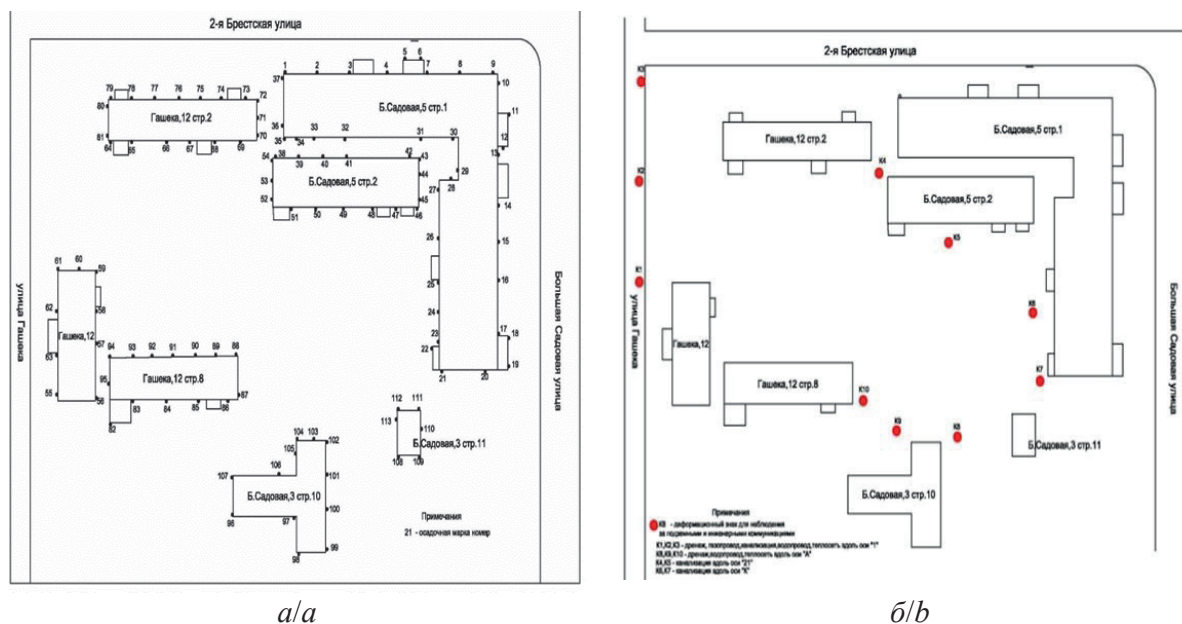
а/а



б/б

Фото. Фотофиксация гипсовых маяков № 5-1-1 (а) и 5-1-20 (б), установленных на ограждающие конструкции здания по адресу: ул. Большая Садовая, д. 5, стр. 1

Photo. Photofixation of gypsum beacons № 5-1-1 (a) and 5-1-20 (b), installed on the building envelope at Bolshaya Sadovaya street, 5, bld. 1



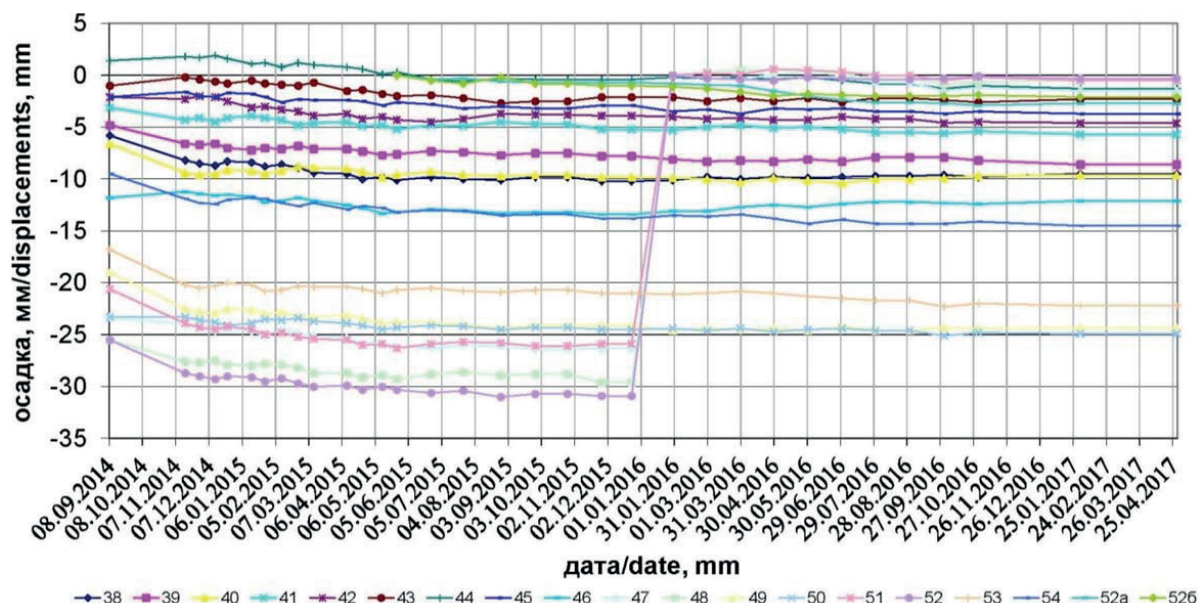


Рис. 5. График осадок деформационных марок, установленных на здании по адресу: ул. Большая Садовая, д. 5 стр. 2

Fig. 5. Graph of accumulated settlements of the deformation marks installed on the building at Bolshaya Sadovaya street, 5, bld. 2

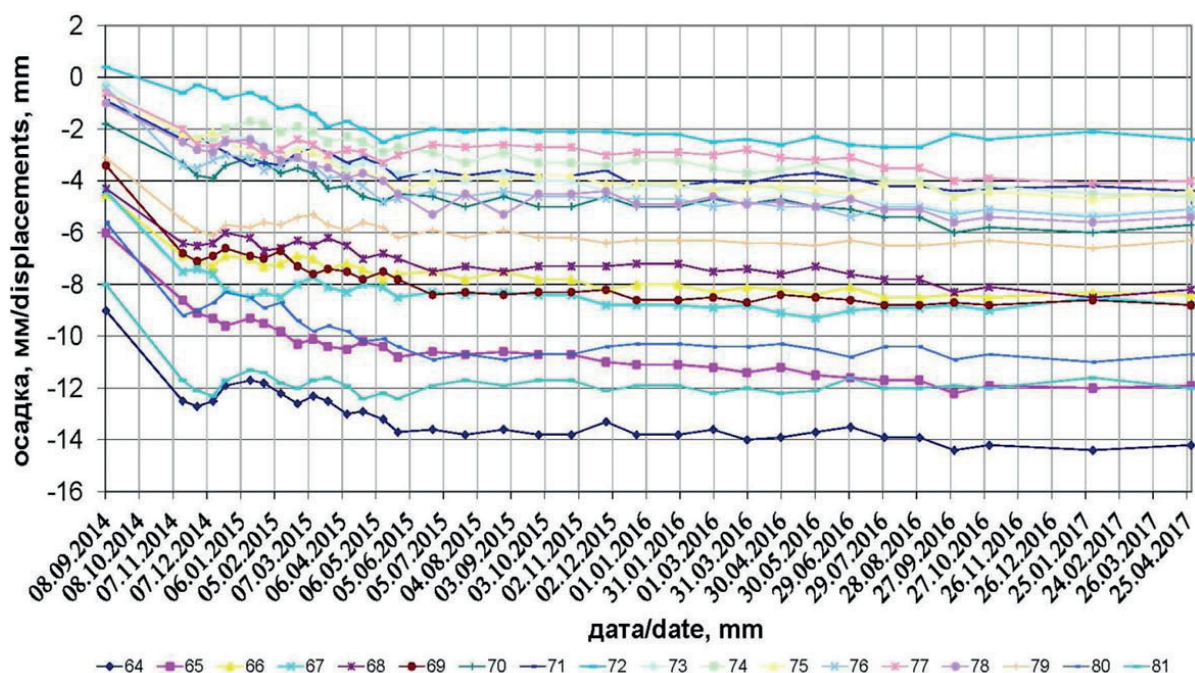


Рис. 6. График осадок деформационных марок, установленных на здании по адресу: ул. Гашека, д. 12, стр. 2

Fig. 6. Graph of accumulated settlements of the deformation marks installed on the building at 12, Gashek street, bld. 2

Осредненные суммарные осадки большинства ственных марок для рассматриваемых зданий по результатам инструментальных геодезических наблюдений (мониторинга) за окружающей застройкой приведены в табл. 1.

Для здания по адресу: ул. Гашека, д. 12, стр. 2, максимальная осадка деформационных марок составляет 14,2 мм (марка № 64), максимальная величина раскрытия трещин на контролируемых гипсовых маяках не превышает 0,3 мм. По результатам анализа установлено что с «нулевого» цикла

измерений до настоящего времени максимальный прирост осадок составил 5,9 мм (марка № 65).

Для здания по адресу: ул. Большая Садовая, д. 5, стр. 2, максимальная осадка деформационных марок составляет 24,9 мм (марка № 50), максимальная величина раскрытия трещин на контролируемых гипсовых маяках не превышает 0,1 мм. По результатам анализа установлено что с «нулевого» цикла измерений до настоящего времени максимальный прирост осадок составил 5,4 мм (марка № 53).

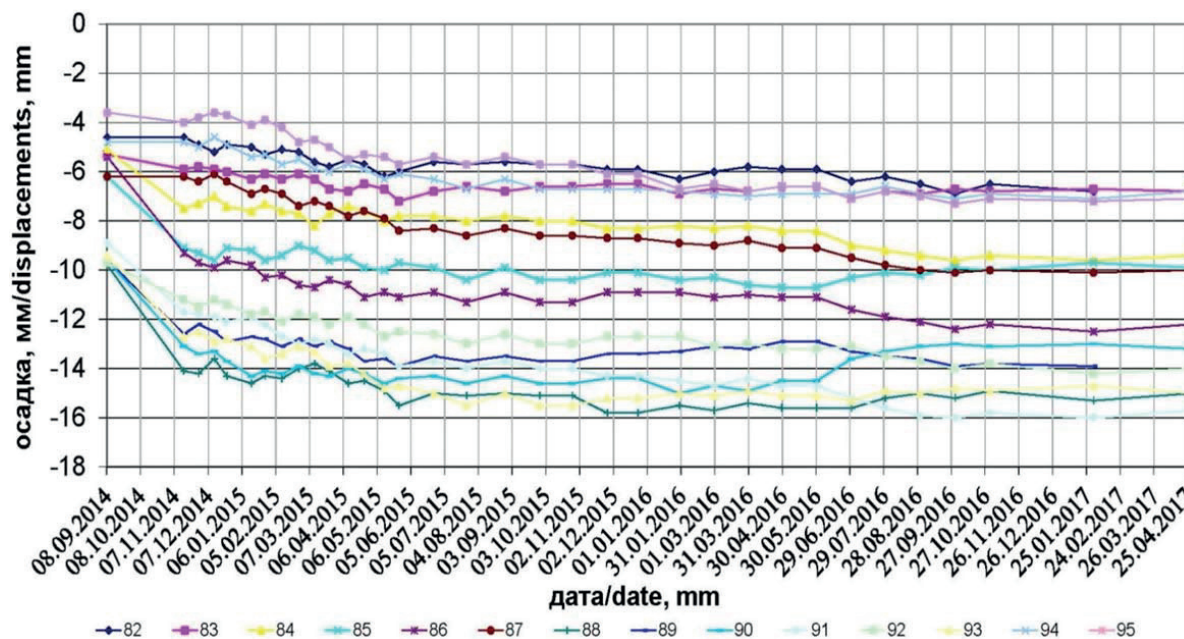


Рис. 7. График осадок деформационных марок, установленных на здании по адресу: ул. Гашека, д. 12, стр. 8

Fig. 7. Graph of accumulated settlements of the deformation marks, installed on the building at Gashek street, 12, bld. 8

Таблица 1. Осредненные суммарные осадки зданий

Table 1. Average total building settlement

Наименование объекта (здание по адресу) Object name (building at)	Осредненная суммарная осадка, мм Averaged total settlement, mm	
	Без учета нового строительства Without regard to new construction	С учетом нового строительства Taking into account new construction
ул. Гашека, д. 12, стр. 2 Gashek street, 12, bld. 2	5,2	7,2
ул. Гашека, д. 12, стр. 8 Gashek street, 12, bld. 8	6,0	11,1
ул. Большая Садовая, д. 5, стр. 1 Bolshaya Sadovaya street, 5, bld. 1	1,2	2,1
ул. Большая Садовая, д. 5, стр. 2 Bolshaya Sadovaya street, 5, bld. 2	4,8	7,9

Для здания по адресу: ул. Большая Садовая, д. 5, стр. 1, максимальная осадка деформационных марок составляет 5,2 мм (марка № 30), максимальная величина раскрытия трещин составляет 0,5 мм (ГМ 5–1–11). Согласно геодезическим наблюдениям, на марках, установленных в области данного гипсового маяка, зафиксированы максимальные значения осадок и по результатам анализа установлено, что с «нулевого» цикла измерений до настоящего времени максимальный прирост осадок составил 3,0 мм (марка № 6).

Для здания по адресу: ул. Гашека, д. 12, стр. 8, максимальная осадка деформационных марок составляет –15,7 мм (марка № 91), максимальная величина раскрытия трещин на контролируемых гипсовых маяках не превышает 0,3 мм. По результатам анализа установлено, что с «нулевого» цикла измерений до настоящего времени максимальный прирост осадок составил 6,8 мм (марки № 86 и 91).

За весь период инженерно-геодезических исследований по контролируемым деформационным маркам в общем объеме не зафиксировано превышение предельно допустимого значения осадки фундаментов наблюдаемых зданий. Исключение составляют подземные инженерные коммуникации, расположенные в зоне влияния объекта нового строительства.

Анализ данных мониторинговых наблюдений методом корреляционно-регрессионного анализа

В научных исследованиях часто возникает необходимость в нахождении связи между результативными и факторными переменными, т. е. описанием совокупности взаимосвязей. Вторые представляют собой признаки, способствующие изменению таковых, связанных с первыми [21].

Если эти зависимости стохастичны, а анализ осуществляется по выборке из генеральной совокупности, то данная область исследований относится к задачам статистического исследования зависимостей [22], которые включают в себя корреляционный, регрессионный, дисперсионный, ковариационный анализ и анализ таблиц сопряженности.

Корреляционный анализ – это метод, применяющийся с целью проверки гипотезы о статистической значимости двух и более переменных, если исследователь их может измерять, но не изменять. Корреляционная зависимость – это изменения, которые вносят значения одного признака в вероятность появления разных значений другого признака [23].

Цель анализа состоит в обеспечении получения некоторой информации об одной переменной с помощью другой переменной. Переменные коррелируются, когда возможно достижение цели.

Задачи корреляционного анализа сводятся к выделению важнейших факторов, которые влияют на результативный признак, измерению тесноты связи между факторами, выявлению неизвестных причин связей и оценке факторов, оказывающих максимальное влияние на результат.

Обязательное условие – массовость значений изучаемых показателей, что позволяет выявить тенденцию, закономерность развития, форму взаимосвязи между признаками.

Количественная оценка тесноты взаимосвязи двух случайных величин осуществляется с помощью коэффициента корреляции. Значение коэффициента корреляции может изменяться в диапазоне от -1 до $+1$. Абсолютное значение коэффициента корреляции показывает силу взаимосвязи.

Чем меньше его абсолютное значение, тем слабее связь [24]. Если он равен нулю, то связь вообще отсутствует.

Чем больше значение модуля коэффициента корреляции, тем сильнее связь и тем меньше разброс в значениях при каждом фиксированном значении. Знак коэффициента корреляции определяет направленность взаимосвязи: минус – отрицательная, плюс – положительная [25].

Достаточно условно может быть использована следующая классификация взаимосвязей по значению коэффициента корреляции (табл. 2). Данная классификация не является строгой.

С помощью программных средств (MS Excel) произвели многофакторный корреляционный анализ для рассматриваемых выше зданий и сооружений, результаты которого представлены в виде матрицы коэффициентов корреляции (табл. 3–6).

Таблица 2. Интерпретация значений коэффициента корреляции
Table 2. Interpretation of the correlation coefficient values

$r=1$	Функциональная зависимость Perfect linear relationship
$0,7 \leq r \leq 0,99$	Сильная статическая взаимосвязь Strong linear relationship
$0,5 \leq r \leq 0,69$	Средняя статическая взаимосвязь Moderate relationship
$0,20 \leq r \leq 0,49$	Слабая статическая взаимосвязь Weak linear relationship
$0,09 \leq r \leq 0,19$	Очень слабая статическая взаимосвязь Very weak linear relationship
$r=0$	Корреляции нет (линейной) No linear relationship

Результаты вычисления ошибки коэффициента корреляции результатов геотехнического мониторинга по рассматриваемым зданиям приведены в табл. 7.

Оценка достоверности коэффициента корреляции с помощью t -критерия Стьюдента приводится в табл. 8.

Статистический корреляционный анализ, примененный к замерам вертикальных перемещений по стенным маркам, показывает следующее. Так как расчетное значение t -критерия Стьюдента выше табличного ($t_{\text{расч}} > t_{\text{табл}}$), то можно сделать заключение о том, что величина коэффициента корреляции является значимой, связь существенная и нулевая гипотеза отклоняется. Поскольку (фактическое) во всех случаях выше t -табличного, связь между результативным и факторными показателями является надежной, а величина коэффициентов корреляции значимой. Величина коэффициента корреляции считается достоверной, так как не менее чем в 3 раза превышает свою среднюю ошибку. Таким образом, коэффициент корреляции достоверен, что не вызывает необходимости увеличения числа наблюдений.

Таблица 3. Матрица коэффициента корреляции для здания по адресу: ул. Большая Садовая, д. 5, стр. 2

Table 3. Matrix of correlation coefficient for the building at Bolshaya Sadovaya street, 5, bld. 2

Номера марок Marks no.	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	52а	52б
38	1,00	0,82	0,81	0,77	0,78	0,69	0,67	0,65	0,72	-0,28	-0,28	0,93	0,68	-0,25	-0,26	0,75	0,82	-0,74	-0,67
39	0,82	1,00	0,84	0,85	0,80	0,73	0,80	0,79	0,45	-0,66	-0,66	0,92	0,86	-0,64	-0,65	0,89	0,92	0,66	0,76
40	0,81	0,84	1,00	0,70	0,52	0,53	0,53	0,56	0,37	-0,48	-0,48	0,90	0,63	-0,46	-0,46	0,84	0,81	0,34	0,50
41	0,77	0,85	0,70	1,00	0,82	0,71	0,82	0,80	0,38	-0,63	-0,63	0,85	0,82	-0,61	-0,63	0,86	0,93	0,74	0,68
42	0,78	0,80	0,52	0,82	1,00	0,79	0,88	0,83	0,61	-0,51	-0,52	0,77	0,79	-0,50	-0,52	0,69	0,79	0,56	0,51
43	0,69	0,73	0,53	0,71	0,79	1,00	0,91	0,88	0,69	-0,56	-0,57	0,72	0,85	-0,56	-0,56	0,55	0,78	0,30	0,22
44	0,67	0,80	0,53	0,82	0,88	0,91	1,00	0,94	0,56	-0,61	-0,63	0,74	0,89	-0,61	-0,62	0,70	0,84	0,79	0,68
45	0,65	0,79	0,56	0,80	0,83	0,88	0,94	1,00	0,53	-0,72	-0,74	0,75	0,85	-0,72	-0,73	0,68	0,83	0,73	0,79
46	0,72	0,45	0,37	0,38	0,61	0,69	0,56	0,53	1,00	0,03	0,02	0,53	0,50	0,03	0,03	0,24	0,43	-0,90	-0,86
47	-0,28	-0,66	-0,48	-0,63	-0,51	-0,56	-0,61	-0,72	0,03	1,00	1,00	-0,51	-0,65	1,00	1,00	-0,56	-0,63	-0,76	-0,86
48	-0,28	-0,66	-0,48	-0,63	-0,52	-0,57	-0,63	-0,74	0,02	1,00	1,00	-0,52	-0,66	1,00	1,00	-0,56	-0,64	-0,77	-0,87
49	0,93	0,92	0,90	0,85	0,77	0,72	0,74	0,75	0,53	-0,51	-0,52	1,00	0,77	-0,49	-0,50	0,89	0,93	0,56	0,64
50	0,68	0,86	0,63	0,82	0,79	0,85	0,89	0,85	0,50	-0,65	-0,66	0,77	1,00	-0,65	-0,66	0,75	0,86	0,78	0,72
51	-0,25	-0,64	-0,46	-0,61	-0,50	-0,56	-0,61	-0,72	0,03	1,00	1,00	-0,49	-0,65	1,00	1,00	-0,54	-0,62	-0,77	-0,87
52	-0,26	-0,65	-0,46	-0,63	-0,52	-0,56	-0,62	-0,73	0,03	1,00	1,00	-0,50	-0,66	1,00	1,00	-0,55	-0,63	-0,78	-0,87
53	0,75	0,89	0,84	0,86	0,69	0,55	0,70	0,68	0,24	-0,56	-0,56	0,89	0,75	-0,54	-0,55	1,00	0,91	0,93	0,79
54	0,82	0,92	0,81	0,93	0,79	0,78	0,84	0,83	0,43	-0,63	-0,64	0,93	0,86	-0,62	-0,63	0,91	1,00	0,91	0,84
52а	-0,74	0,66	0,34	0,74	0,56	0,30	0,79	0,73	-0,90	-0,76	-0,77	0,56	0,78	-0,77	-0,77	0,93	0,91	1,00	0,90
52б	-0,67	0,76	0,50	0,68	0,51	0,22	0,68	0,79	-0,86	-0,86	-0,87	0,64	0,72	-0,87	-0,87	0,79	0,84	0,90	1,00

Таблица 4. Матрица коэффициента корреляции для здания по адресу: ул. Гашека, д. 12, стр. 2

Table 4. Matrix of correlation coefficient for the building at Gashek street, 12, bld. 2

Номера марок Mark no.	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81
64	1,00	0,93	0,93	0,82	0,93	0,96	0,94	0,89	0,86	0,93	0,91	0,91	0,95	0,79	0,93	0,91	0,95	0,73
65	0,93	1,00	0,95	0,89	0,92	0,95	0,93	0,93	0,90	0,97	0,91	0,95	0,94	0,88	0,92	0,88	0,90	0,67
66	0,93	0,95	1,00	0,91	0,92	0,95	0,91	0,91	0,86	0,95	0,91	0,91	0,96	0,88	0,87	0,95	0,88	0,74
67	0,82	0,89	0,91	1,00	0,79	0,89	0,73	0,89	0,77	0,83	0,72	0,86	0,87	0,78	0,75	0,92	0,80	0,79
68	0,93	0,92	0,92	0,79	1,00	0,92	0,94	0,90	0,81	0,96	0,95	0,91	0,94	0,86	0,93	0,85	0,90	0,61
69	0,96	0,95	0,95	0,89	0,92	1,00	0,90	0,91	0,87	0,93	0,87	0,92	0,95	0,79	0,92	0,91	0,96	0,74
70	0,94	0,93	0,91	0,73	0,94	0,90	1,00	0,88	0,87	0,96	0,96	0,90	0,93	0,86	0,94	0,82	0,89	0,56
71	0,89	0,93	0,91	0,89	0,90	0,91	0,88	1,00	0,86	0,93	0,86	0,94	0,91	0,82	0,89	0,86	0,84	0,59
72	0,86	0,90	0,86	0,77	0,81	0,87	0,87	0,86	1,00	0,89	0,82	0,93	0,91	0,71	0,90	0,73	0,87	0,55
73	0,93	0,97	0,95	0,83	0,96	0,93	0,96	0,93	0,89	1,00	0,96	0,94	0,95	0,87	0,95	0,87	0,89	0,58
74	0,91	0,91	0,91	0,72	0,95	0,87	0,96	0,86	0,82	0,96	1,00	0,86	0,91	0,84	0,91	0,82	0,83	0,50
75	0,91	0,95	0,91	0,86	0,91	0,92	0,90	0,94	0,93	0,94	0,86	1,00	0,96	0,81	0,94	0,84	0,92	0,62
76	0,95	0,94	0,96	0,87	0,94	0,95	0,93	0,91	0,91	0,95	0,91	0,96	1,00	0,84	0,92	0,90	0,94	0,70
77	0,79	0,88	0,88	0,78	0,86	0,79	0,86	0,82	0,71	0,87	0,84	0,81	0,84	1,00	0,76	0,81	0,74	0,64
78	0,93	0,92	0,87	0,75	0,93	0,92	0,94	0,89	0,90	0,95	0,91	0,94	0,92	0,76	1,00	0,79	0,92	0,53
79	0,91	0,88	0,95	0,92	0,85	0,91	0,82	0,86	0,73	0,87	0,82	0,84	0,90	0,81	0,79	1,00	0,83	0,81
80	0,95	0,90	0,88	0,80	0,90	0,96	0,89	0,84	0,87	0,89	0,83	0,92	0,94	0,74	0,92	0,83	1,0	0,71
81	0,73	0,67	0,74	0,79	0,61	0,74	0,56	0,59	0,55	0,58	0,50	0,62	0,70	0,64	0,53	0,81	0,71	1,00

Таблица 5. Матрица коэффициента корреляции для здания по адресу: ул. Большая Садовая, д. 5, стр. 1

Table 5. Correlation coefficient matrix for the building at Bolshaya Sadovaya street, 5, bld. 1

Номера марок Mark no.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37
1	1																																				
2		1																																			
3			1																																		
4				1																																	
5					1																																
6						1																															
7							1																														
8								1																													
9									1																												
10										1																											
11											1																										
12												1																									
13													1																								
14														1																							
15															1																						
16																1																					
17																	1																				
18																		1																			
19																			1																		
20																				1																	
21																					1																
22																						1															
23																							1														
24																								1													
25																									1												
26																										1											
27																											1										
28																												1									
29																													1								
30																														1							
31																															1						
32																																1					
33																																	1				
34																																		1			
35																																			1		
36																																				1	
37																																					1

Значение коэффициента корреляции

$R=0,20...0,99$ $R=0,00...0,19$ $R=-0,01...-0,09$ $R=-0,10...-0,90$

Таблица 6. Матрица коэффициента корреляции для здания по адресу: ул. Гашека, д. 12, стр. 8

Table 6. Matrix of correlation coefficient for the building at Gashek street, 12, bld. 8

Номера марок Mark no.	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
82	1,00	0,80	0,87	0,60	0,82	0,92	0,62	0,68	0,18	0,92	0,90	0,74	0,87	0,92
83	0,80	1,00	0,71	0,74	0,80	0,79	0,77	0,80	0,52	0,83	0,80	0,86	0,80	0,80
84	0,87	0,71	1,00	0,68	0,92	0,87	0,74	0,77	0,26	0,95	0,94	0,75	0,79	0,85
85	0,60	0,74	0,68	1,00	0,83	0,62	0,93	0,80	0,78	0,77	0,76	0,93	0,72	0,65
86	0,82	0,80	0,92	0,83	1,00	0,80	0,84	0,93	0,51	0,93	0,92	0,88	0,76	0,77
87	0,92	0,79	0,87	0,62	0,80	1,00	0,65	0,64	0,15	0,95	0,94	0,78	0,94	0,98
88	0,62	0,77	0,74	0,93	0,84	0,65	1,00	0,85	0,76	0,79	0,77	0,91	0,71	0,67
89	0,68	0,80	0,77	0,80	0,93	0,64	0,85	1,00	0,64	0,79	0,80	0,87	0,65	0,61
90	0,18	0,52	0,26	0,78	0,51	0,15	0,76	0,64	1,00	0,34	0,34	0,68	0,36	0,20
91	0,92	0,83	0,95	0,77	0,93	0,95	0,79	0,79	0,34	1,00	0,97	0,86	0,90	0,94
92	0,90	0,80	0,94	0,76	0,92	0,94	0,77	0,80	0,34	0,97	1,00	0,86	0,91	0,91
93	0,74	0,86	0,75	0,93	0,88	0,78	0,91	0,87	0,68	0,86	0,86	1,00	0,85	0,77
94	0,87	0,80	0,79	0,72	0,76	0,94	0,71	0,65	0,36	0,90	0,91	0,85	1,00	0,94
95	0,92	0,80	0,85	0,65	0,77	0,98	0,67	0,61	0,20	0,94	0,91	0,77	0,94	1,00

Таблица 7. Значение средней ошибки коэффициента корреляции

Table 7. Value of the average error of the correlation coefficient

Значение средней ошибки коэффициента корреляции для зданий по адресам Value of the average error of the correlation coefficient for buildings at			
ул. Гашека, д. 12, стр. 2 Gashek street, 12, bld. 2	ул. Гашека, д. 12, стр. 8 Gashek street, 12, bld. 8	ул. Большая Садовая, д. 5, стр. 1 Bolshaya Sadovaya street, 5, bld. 1	ул. Большая Садовая, д. 5, стр. 2 Bolshaya Sadovaya street, 5, bld. 2
0,12	0,18	0,13	0,23

Таблица 8. Оценка достоверности коэффициента корреляции

Table 8. Evaluation of the correlation coefficient reliability

Значение t-критерия Стьюдента/Value of Student's t-test			
Здание по адресу/Building at			
ул. Гашека, д. 12, стр. 2 Gashek street, 12, bld. 2	ул. Гашека, д. 12, стр. 8 Gashek street, 12, bld. 8	ул. Большая Садовая, д. 5, стр. 1 Bolshaya Sadovaya street, 5, bld. 1	ул. Большая Садовая, д. 5, стр. 2 Bolshaya Sadovaya street, 5, bld. 2
8,30	5,70	7,96	4,36

Наличие высокосвязной (сильной) $R=0,99...0,70$, значимой (средней) $R=0,50...0,69$ и слабой $R=0,20...0,49$ прямой корреляции между перемещениями марок говорит о едином характере перемещения и, следовательно, об одинаковой «работе» элементов конструкции, на которых установлены марки.

Наличие высокосвязной (сильной) $R=0,99...0,70$, значимой (средней) $R=0,50...0,69$ и слабой $R=0,20...0,49$ обратной корреляции между перемещениями марок свидетельствует о противоположном характере перемещения марок, а значит о перекосе конструкции, что является признаком напряженного состояния конструкции и предвестником развития деформаций.

Коэффициент корреляции близкий к $0,00...0,19$ (связи нет) свидетельствует об отсутствии статистической взаимосвязи между коррелируемыми величинами, а значит о независимой друг от друга работе элементов конструкций, на которых расположены марки.

Результаты проведенного корреляционного анализа представлены в виде матрицы значений

(табл. 3–6) и карты взаимосвязи осадок различных марок с выделением зон риска (рис. 8). Расчёты показали следующее:

- Значимая (средняя), высокосвязная (сильная) и слабая корреляция с $R=0,20...0,99$ присутствует между всеми марками, расположенными на здании по адресу: ул. Гашека д. 12 стр. 2 (марки № 64–81) и отдельных марок по адресу: ул. Гашека, д. 12 стр. 8 (марки № 82–89, 91–94), ул. Б. Садовая, д. 5, стр. 1 (марки № 1–19; 24–31, 33), ул. Б. Садовая, д. 5, стр. 2 (марки № 38–46).
- По некоторым маркам здания по адресу: ул. Гашека, д. 12, стр. 8 (марки № 90, 95) корреляционный анализ показал незначимые величины коэффициента корреляции $R=0,00...0,19$, что говорит о независимой работе разных строительных конструкций или свидетельствует о независимой друг от друга работе элементов конструкции.
- Отрицательные значения R , незначительные по величине, получились между марками № 21, 22, 30, 36, 37 для здания по адресу: ул. Б. Садовая, д. 5, стр. 1.
- Расчет коэффициента корреляции между перемещениями марок № 20, 23, 32, 34, 35 для здания по адресу: ул. Б. Садовая, д. 5, стр. 1 и № 47–54 – ул. Б. Садовая, д. 5, стр. 2 показал значение $R=-0,10...-0,90$, что говорит о наличии достаточно тесной взаимосвязи в движении марок, а поскольку марки установлены на одном конструктивном элементе, то и о возможных деформациях, «зонах риска».

Анализ значений коэффициента корреляции (таблицы № 3–6) подтвердил выявленную неравномерность перемещения ряда марок по принципу «качелей». Это относится к маркам № 20, 23, 32, 34, 35 ($R=-0,10...-0,90$) и марки № 1–19; 24–31, 33 ($R=0,2...0,99$) для здания по адресу: ул. Б. Садовая, д. 5, стр. 1; № 47–54 ($R=-0,10...-0,90$) и марки № 38–46 ($R=0,20...0,99$) – ул. Б. Садовая, д. 5, стр. 2.

Таким образом, участки конструкций, на которых расположены вышеуказанные марки, могут

считаться вероятными зонами риска по развитию деформаций. Полученные результаты подтверждают предположения о напряженном состоянии конструкции и вероятной (возможной) блоковой структуре строения внутренних и наружных стен для зданий по адресу: ул. Б. Садовая, д. 5, стр. 1, 2. Между перемещениями марок № 21, 22, 30, 36, 37 и № 20, 23, 32, 34, 35 коэффициент корреляции имеет отрицательную величину $R_{21, 22, 30, 36, 37} = -0,01$ и $R_{20, 23, 32, 34, 35} = -0,29$ соответственно для здания по адресу: ул. Б. Садовая, д. 5 стр. 1, что свидетельствует об обратной корреляционной зависимости и отсутствии статистической взаимосвязи между коррелируемыми величинами, а значит, о независимой работе конструктивных элементов. Корреляционный анализ подтвердил качественные выводы, сделанные ранее, о закономерной неравномерности перемещений марок разных конструктивных элементов и выявил зоны, где вероятнее всего могут произойти деформации [26]. Полученные результаты проведенного корреляционного анализа свидетельствуют об эффективности его применения при анализе результатов наблюдений за вертикальными перемещениями конструкций. Неравномерное перемещение марок после проведенных работ – свидетельство неравномерной осад-

ки и развития разрывной деформации между разновременными конструкциями. Можно сказать, что здания по адресу: ул. Б. Садовая, д. 5, стр. 1, 2, находятся в переходном режиме функционирования, состоянии адаптации системы к новым условиям. Процесс адаптации идет, отмечаются внешние незначительные нарушения, зафиксированные в ходе всего периода мониторинга (осадки значительные). Влияние колебаний уровня грунтовых вод, их взвешивающего действия на фундаменты пока не подтверждается.

На устойчивость конструкций в данное время более всего могут влиять: значительная неоднородность грунтов, начало нового строительства и эволюционные процессы в основании. Зафиксированные деформации к концу инструментальных наблюдений стабилизировались, и отпала необходимость в дальнейшем проведении работ за наблюдением перемещений марок [27].

Оперативный мониторинг позволил выявить основные этапы адаптации сооружения к происходящим взаимодействиям на основании изменения измеряемых параметров (в данном случае величины перемещения ственных марок) и их контроля (были выявлены «зоны риска» – участки, где конструкции находятся в напряженном состоянии).

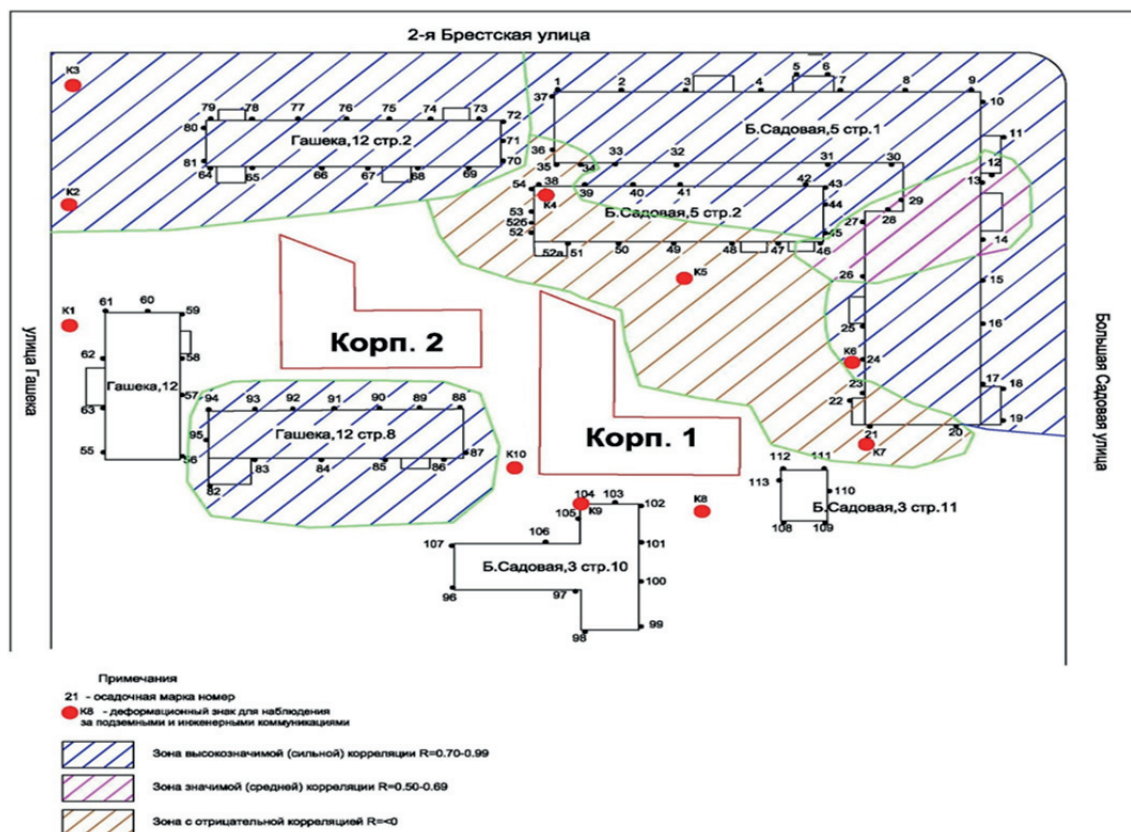


Рис. 8. Карта взаимосвязи осадок различных марок в зоне окружающей застройки многофункционального делового центра с подземной автостоянкой по адресу: г. Москва, ул. Большая Садовая, д. 5, стр. 1, 2; ул. 2-я Брестская, д. 1, стр. 1; ул. Гашека, вл. 12 часть стр. 1 (подъезды 1–4), стр. 5–7

Fig. 8. Map of relationship of sediment of different brands in the area of the surrounding development of a multifunctional business center with underground parking in Moscow, Bolshaya Sadovaya street, 5, bld. 1, 2; 2-ya Brestskaya street, 1, bld. 1; Gashek street, 12 part, bld. 1 (entrances 1–4), blds. 5–7

Заключение

Наличие системы мониторинга для элементарных ПТС, составных частей ЛПТС, до, во время и после управляемых техногенных взаимодействий приводит к корректной оценке эффективности проведенных работ и делает прогнозируемой стабильность работы сооружений в дальнейшем [28].

Результаты работы, предлагаемый алгоритм концепции, может быть использован в качестве одной из составляющих общей концепции устойчивости зданий и сооружений. Применение алгоритма «Статистического корреляционного анализа» к локальным ПТС позволяет обобщить разновозрастный фактический материал, составить актуализированные модели строения сферы взаимодействия, что дает возможность скорректировать и оптимизировать управляющие мероприятия, а также проектные решения.

Полученные значения коэффициента корреляции (R) могут служить индикатором напряженности конструкций или конструкции, что дает возможность оконтурить зоны повышенной потенциальной опасности, выявить зоны риска.

Применительно к сложным, потенциально опасным объектам использование анализа риска осуществляется с целью получения возможности принятия научно обоснованных решений по уменьше-

нию негативных воздействий инженерно-геологических процессов на основе количественных оценок.

Проведение геотехнического мониторинга существующей застройки, попадающей в зону влияния нового строительства, обусловлено необходимостью обеспечения своевременного информирования о выявленных отклонениях контролируемых параметров (в том числе тенденций их изменений, превышающие ожидаемые) от проектных значений.

Данная схема анализа мониторинга призвана обеспечить решение ряда задач: создание системы накопления и обработки информации, получаемой в результате функционирования режимных сетей; организация блока, ответственного за выдачу прогнозных математических моделей, разработка сценариев для принятия управляющих рекомендаций по обеспечению надежного функционирования сооружения.

Использование метода статистического моделирования в результате проявления негативных инженерно-геологических процессов позволяет предварительно спрогнозировать дальнейшее изменение состояния ПТС и ее теоретический срок функционирования в пределах области допустимых состояний, дает возможность получить систему критериев безопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамова Т.Т. Экомониторинг подземного археологического музея г. Москвы // Природные условия строительства и сохранения храмов Православной Руси. Московская Патриархия Троице-Сергиева Лавра: Сборник трудов 6-го Международного научно-практического симпозиума. – Сергиев Посад, 2016. – С. 117–130.
2. ГОСТ Р 56198–2014 Мониторинг технического состояния объектов культурного наследия. Недвижимые памятники. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2014. – 28 с.
3. ГОСТ 24846–2012 Грунты. Методы измерений деформаций оснований зданий и сооружений. – М.: Стандартинформ, 2014. – 18 с.
4. ГОСТ 31937–2011 Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. – М.: Стандартинформ, 2014. – 54 с.
5. Никифоров А.А., Дмитриев В.В. Исторические фундаменты как элемент историко-культурного наследия // Природные условия строительства и сохранения храмов Православной Руси. Московская Патриархия Троице-Сергиева Лавра: Сб. трудов 6-го Международного научно-практического симпозиума. – Сергиев Посад, 2016. – С. 91–97.
6. Подборская В.О., Невечера В.В. Обобщение результатов режимных наблюдений за процессом криогенного пучения грунтов на территории Кирилло-Белозерского музея – заповедника // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2016. – № 6. – С. 60–66.
7. Пендин В.В. Комплексный количественный анализ информации в инженерной геологии. – М.: КДУ, 2009. – 350 с.
8. Системы мониторинга локальных исторических природно-технических систем (ИПТС) – как основа мероприятий по долговременному сохранению объектов культуры / В.В. Пендин, Л.В. Завоткина, В.О. Подборская, В.В. Невечера // Геоэкология. – 2016. – № 1. – С. 81–93.
9. СП 305.1325800.2017. Здания и сооружения. Правила проведения геотехнического мониторинга при строительстве. – М.: Стандартинформ, 2017. – 69 с.
10. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. – М.: Стандартинформ, 2016. – 69 с.
11. ТСН 50–304–2001 г. Москвы (МГСН 2.07–01) Основания, фундаменты и подземные сооружения. – М.: ГУП города Москвы «НИАЦ», 2003. – 41 с.
12. Пашкин Е.М., Бессонов Е.Б. Диагностика деформаций памятников архитектуры. – М.: Стройиздат, 1984. – 151 с.
13. Пургина Д.В., Строкова Л.А., Кузеванов К.И. Моделирование гидрогеологических условий для обоснования противооползневых мероприятий на участке набережной реки Камы в городе Пермь // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 1. – С. 116–127.
14. Строкова Л.А., Елифанова 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.
15. Улицкий В.М., Шашкин А.Г. Геотехническое сопровождение реконструкции городов. – М.: Изд-во АСВ, 1999. – 327 с.
16. Решение задач геодезического мониторинга колонн и ферм покрытия / Е.Н. Хмырова, О.Г. Бесимбаева, Е.А. Олейникова, Р.В. Синяк // Кадастр недвижимости и мониторинг природных ресурсов: Труды Международной научно-технической интернет-конференции. – Тула, 2016. – Т. 1. – С. 581–586.
17. Brakorenko N.N. Impact of oil on groundwater chemical composition // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – № 27. – 6 p.
18. Katzenbach R., Schmitt A., Ramm K. Basic principles of design and monitoring of high-rise buildings in Frankfurt-on-Main. Practical cases // Rekomstr. Gorodov Geotekh. Stroit. – 2005. – № 9. – P. 80–99.

19. Mayne P.W. Keynote lecture: in-situ geocharacterization of soils in the year 2016 and beyond // *Advances in Soil Mechanics: Geotechnical Synergy: Proc. 15 PCSMGE*. – Buenos Aires, 2015. – Amsterdam: IOS Press, 2015. – V. 5. – P. 139–161.
20. Hiller Bernd. Technology of geodetic deformation monitoring-experience use // *Safety of construction and operation of facilities: Open town-planning forum, the session*. – Novosibirsk, 2010. – P. 111–115.
21. Pythoud S.R. Determination experimentale des parametres de securite des produits chimiques // *Chimia*. – 2003. – V. 57. – № 12. – P. 766–769.
22. Strokova L.A., Ermolaeva A.V., Golubeva V.V. The Investigation of Dangerous Geological Processes Resulting In Land Subsidence While Designing the Main Gas Pipeline in South Yakutia // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2016. – V. 43. – 6 p.
23. Strokova L.A. Modeling of tunneling induced ground surface movement / *Scientific and Technical Challenges in the Well Drilling Progress* // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2015. – № 24. – 6 p.
24. Yang H., Xu X., Neumann I. Laser scanning based updating of a finite element model for structural health monitoring // *IEEE Sensor*. – 2016. – V. 7. – P. 2100–2104.
25. Terrestrial Laser Scanning Technology for Deformation Monitoring and Surface Modeling of Arch Structures / H. Yang, M. Omidiazarandi, X. Xu, I.I. Neumann // *Composite Structures*. – 2016. – V. 149. – P. 93–105.
26. 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.
27. 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.
28. 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.

Поступила 10.07.2018 г.

Информация об авторах

Кулешов А.П., аспирант кафедры инженерной геологии Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе.

Пендин В.В., доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой инженерной геологии Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе.

UDC 624.131

ON THE ISSUE OF PROCESSING THE RESULTS OF GEOTECHNICAL MONITORING OF STRUCTURE SETTLEMENT

Alexander P. Kuleshov¹,
kuleshov@inzhgeos.ru

Vadim V. Pendin¹,
pendin@yandex.ru

¹ Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University,
23, Miklukho-Maklay street, Moscow, 117997, Russia.

The relevance of the work is caused by preservation of the existing building, which is in the zone of influence of new construction. After identification of engineering-geological processes affecting adversely the conditions of operation of the facility, and determination of parameters on which the development of such processes depend, there is a need to assess the level of risk. Recently, the correlation and regression analysis of data regime observations, based on the probability-statistical group of methods – naturally random nature of the development of processes in time and space, is the most frequently used one.

The main aim of the research is the statistical analysis of the characteristics of building deformation values under the influence of new construction, finding and description of the relationship between sedimentary marks and deformation signs located on the buildings, evaluation of operation mode of elementary natural and technical systems in complex engineering-geological conditions, analysis of accumulated engineering-geological information on the object, including the results of pre-construction surveys.

Methods: analysis of regime observations with the help of autocorrelation function, comparison of the results with the data of natural long-term observations, representation of the object of study in the form of a complex system consisting of a set of elements between which there are relations and interactions, establishment of a set of dangers, allocation of risk zones for a certain object in the form of possible losses in time, assessment of the vulnerability of affected objects from each of the identified processes, the forecast of the development of technopriodic hazards in space, deformation shooting.

Results. One of the most important components of ensuring reliable and safe operation of any facility is a monitoring system. On the basis of the data obtained during the implementation of lithomonitoring, the system state is monitored by comparing the values of the observed indicators with the standard system of criteria; the management solutions are developed to optimize its operation. Analysis of all the collected materials, as well as the results of diagnostics of the lithotechnical system at the current time, allows identifying the pathogenesis of engineering-geological processes that determine the possibility of developing extreme situations that pose a threat to the safe operation of the facility. It is advisable to build maps of the differences that reflect changes in the properties of the interaction of the technical object and the geological body and determine the direction of further development of the state of the system.

Key words:

Geotechnical monitoring, observation system, correlation analysis, soil, stress-strain state, deformation process, settlement of structures, regime observations.

REFERENCES

1. Abramova T.T. Ekomonitoring podzemnogo arkhelogicheskogo muzeya g. Moskvy [Ecomonitoring of the underground archaeological Museum of Moscow]. *Prirodnye usloviya stroitelstva i sokhraneniya khramov Pravoslavnoy Rusi. Moskovskaya Patriarkhiya Troitse-Sergieva Lavra. Sbornik trudov 6-go Mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo simpoziuma* [Natural conditions of construction and preservation of churches of Orthodox Russia. Moscow Patriarchate of the Trinity-Sergius Lavra. Proceedings of the 6th International scientific and practical Symposium]. Sergiev Posad, 2016. pp. 117–130.
2. GOST R 56198–2014. *Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya obektov kulturnogo naslediya. Nedvizhimye pamyatniki. Obshchie trebovaniya* [State standard of Russia 56198–2014. Monitoring of technical state of the cultural heritage objects. Immovable monuments. General requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 28 p.
3. GOST 24846–2012 *Grunt. Metody izmereniy deformatsiy osnovany zdaniy i sooruzheniy* [State standard of Russia 24846–2012 Soils. Methods of measuring the strains of structure and building bases]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 18 p.
4. GOST 31937–2011 *Zdaniya i sooruzheniya. Pravila obsledovaniya i monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya* [State standard of Russia 31937–2011. Buildings and constructions. Rules of inspection and monitoring of the technical condition]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 54 p.
5. Nikiforov A.A., Dmitriev V.V. Istoricheskie fundamenty kaka element istoriko-kulturnogo naslediya [The historical foundations as an element of historical and cultural heritage]. *Prirodnye usloviya stroitelstva i sokhraneniya khramov Pravoslavnoy Rusi. Moskovskaya Patriarkhiya Troitse-Sergieva Lavra: Sbornik trudov 6-go Mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo simpoziuma* [Proc. papers of 6-th International scientific-practical Symposium. The Natural conditions of the construction and preservation of the churches of Orthodox Russia]. Sergiev Posad, 2016. pp. 91–97.
6. Podborskaya V.O., Nevicare V. V. Generalization of the results of monitoring the process of cryogenic heaving of soils on the territory of the Kirillo-Belozersky museum – reserve. *Proceedings of higher educational institutions. Geology and exploration*, 2016, no. 6, pp. 60–66. In Rus.
7. Pendin V.V. *Kompleksny kolichestvenny analiz informatsii v inzhenernoy geologii* [Complex quantitative analysis of information in engineering Geology]. Moscow, KDU Publ., 2009. 350 p.
8. Pendin V.V., Zabolotkina L.V., Podborskaya V.O., Nevicherya V.V. Monitoring System for local historical natural-technical systems (IPSTs) as a framework for long-term preservation of objects of culture. *Geoecology*, 2016, no. 1, pp. 81–93. In Rus.
9. SP 305.1325800.2017. *Zdaniya i sooruzheniya. Pravila povedeniya geotekhnicheskogo monitoring pri stroitelstve* [Code of rules 305.1325800.20. Buildings and structures. The rules of geotechnical monitoring under construction]. Moscow, Standartinform Publ., 2017. 69 p.

10. 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.
11. TSN 50–304–2001 Moscow (MGSN 2.07–01). *Osnovaniya, fundamenty i podzemnye sooruzheniya* [The system of normative documents in construction Moscow city building codes 50–304–2001. The bases, foundations and underground structures]. Moscow, GUP goroda Moskvy «NIATS», 2003. 41 p.
12. Pashkin E.M., Bessonov E.B. *Diagnostika deformatsiy pamyatnikov arkhitektury* [Diagnostics of deformations of architectural monuments]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1984. 151 p.
13. 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.
14. 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.
15. Ulitsky B.M., Shashkin A.G. *Geotekhnicheskoe soprovozhdenie rekonstruktsii gorodov* [Geotechnical support urban renewal]. Moscow, publishing DIA, 1999. 327 p.
16. Khmyrova E.N., Besembaeva O.G., Oleinikova E.A., Sinyak R.V. Reshenie zadach geodezicheskogo monitoring kolonn i ferm pokrytiya [The decision of the task of geodetic monitoring of columns and girders of the covering]. *Kadastr nedvizhimosti i monitoring prirodnykh resursov. Trudy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy internet-konferentsii* [Kadistr real estate and monitoring of natural resources. Proceedings of the International scientific and technical Internet-conference]. Tula, 2016. Vol. 1, pp. 581–586.
17. Brakorenko N.N. Impact of oil on groundwater chemical composition. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, no. 27, 6 p.
18. Katzenbach R., Schmitt A., Ramm K. Basic principles of design and monitoring of high-rise buildings in Frankfurt-on- Main. Practical cases. *Rekomstr. Gorodov Geotekh. Stroit.*, 2005, no. 9, pp. 80–99.
19. Mayne P.W. Keynote lecture: in-situ geocharacterization of soils in the year 2016 and beyond. *Advances in Soil Mechanics: Geotechnical Synergy: Proc. 15 PCSMGE*. Buenos Aires, 2015. Amsterdam, IOS Press, 2015. Vol. 5, pp. 139–161.
20. Hiller Bernd. Technology of geodetic deformation monitoring-experience use. *Open town-planning forum, the session. Safety of construction and operation of facilities*. Novosibirsk, 2010. pp. 111–115.
21. Pythoud S.R. Determination experimentale des parametres de securite desproduits chimiques. *Chimia*, 2003, vol. 57, no. 12, pp. 766–769.
22. Strokova L.A., Ermolaeva A.V., Golubeva V.V. The investment of Dangerous Geological Processes Result in Land Subsidence While Designing the Main Gas Pipeline in South Yakutia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43, 6 p.
23. Strokova L.A. Modeling of tunnelinginduced ground surface movement / Scientific and Technical Challenges in the Well Drilling Progress. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, no. 24, 6 p.
24. Yang H., Xu X., Neumann I. Laser scanned updating of a financial element model for structural health monitoring. *IEEE Sensor*, 2016, vol. 7, pp. 2100–2104.
25. Yang H., Omidalizarandi 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.
26. 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.
27. 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.
28. Kuleshov A.P., Pendin V.V. Influence of the method for determining soil properties in numerical calculations of deformations. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 12, pp. 63–74. In Rus.

Received: 10 July 2018.

Information about the authors

Alexander P. Kuleshov, postgraduate, Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University.

Vadim V. Pendin, Dr. Sc., professor, head of the department, Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University.

УДК 665.522.2

ВЛИЯНИЕ ПОПУТНОГО НЕФТЯНОГО ГАЗА НА СТЕПЕНЬ ИЗВЛЕЧЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ C_{3+} ПРИ СОВМЕСТНОЙ ПОДГОТОВКЕ С ГАЗОКОНДЕНСАТНЫМ СЫРЬЕМ

Гатиятов Артур Рамильевич¹,
arthuro_94@mail.ru

Шишмина Людмила Всеволодовна¹,
shishmina@tpu.ru

Зятиков Павел Николаевич¹,
zpavel@tpu.ru

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

Актуальность. В Томской области сложились благоприятные условия для реализации такого рационального пути использования попутного нефтяного газа, как его совместная подготовка с природным газом по технологии низкотемпературной сепарации. Это направление будет развиваться. Компания «Газпромнефть-Восток» реализует масштабный инвестиционный проект, направленный на достижение 95 %-го уровня полезного использования попутного нефтяного газа группы месторождений. Добываемый на этих активах газ будет направлен на установку комплексной подготовки газа и конденсата Мыльджинского нефтегазоконденсатного месторождения. С другой стороны, для подготовки газа газоконденсатных месторождений актуальной задачей является увеличение выхода стабильного углеводородного конденсата. Для ее решения необходима оптимизация технологических схем низкотемпературной сепарации с учетом компонентных составов сырьевого газа. Поэтому исследование влияния нефтяного газа на степень извлечения конденсирующихся компонентов при подготовке смеси газов разного происхождения является актуальным.

Цель: установить влияние попутного нефтяного газа на степень извлечения углеводородов C_{3-4} и C_{5+} при совместной подготовке газов газоконденсатного и нефтяного месторождений по технологии низкотемпературной сепарации.

Объект: установка комплексной подготовки газа и конденсата.

Метод: технологическое моделирование в среде программы Aspen HYSYS.

Результаты. Максимальный эффект детандирования наблюдается у сухого газа газового месторождения: 11–22 °С/МПа; снижение содержания метана в газах газоконденсатных и нефтяных месторождений приводит к снижению эффекта детандирования; при понижении температуры газа перед детандером от –5 до –20 °С величина эффекта детандирования уменьшается для газов газового и газоконденсатных месторождений, а для газов нефтяных месторождений увеличивается; совместная подготовка попутного нефтяного и природного газов позволяет исключить явление ретроградного испарения конденсата; совместная подготовка исследованных газоконденсатного и попутного нефтяного газов при давлении перед детандером 6 МПа увеличивает степень извлечения в нестабильный конденсат углеводородов C_{5+} на 1,9 %, но снижает степень извлечения углеводородов C_{3-4} на 7,9 % относительно ожидаемых величин.

Ключевые слова:

Природный газ, попутный нефтяной газ, низкотемпературная сепарация, состав, степень извлечения, конденсат.

Введение

Одним из вариантов рационального использования попутного нефтяного газа (ПНГ) является его совместная подготовка с природным газом на установках комплексной подготовки газа и конденсата (УКПГиК) по технологии низкотемпературной сепарации (НТС). Природным газом принято называть газ газовых и газоконденсатных месторождений [1]. Такой способ использования ПНГ позволяет нефтедобывающим предприятиям выполнить Постановление Правительства Российской Федерации, устанавливающее требование к нефтегазовым компаниям по утилизации 95 % добываемого попутного нефтяного газа. Технология подготовки смеси ПНГ и природного газа реализована на УКПГиК Мыльджинского нефтегазоконденсатного месторождения.

Одной из проблем установок подготовки газа и конденсата является непостоянство состава сырья. Изменение состава сырого газа вследствие прео-

бладания какого-либо из видов сырья ведет к необходимости изменения технологического режима аппаратов установки с целью обеспечения требуемого качества товарного газа и конденсата.

Объектом настоящего исследования является установка комплексной подготовки газа и конденсата.

Цель исследования – установить влияние состава попутного нефтяного газа на эффект детандирования и степень извлечения углеводородов C_{3+} при совместной подготовке газов газоконденсатного и нефтяного месторождений по технологии НТС.

В настоящее время одной из самых эффективных технологий подготовки газа газоконденсатных месторождений является низкотемпературная сепарация [2–5]. Обычно для получения низкой температуры газа и последующей конденсации жидкости используются такие аппараты, как дроссель, эжектор или детандер [6–11]. В работе

[12] представлен анализ влияния различных факторов на эффективность технологии НТС. В настоящее время наблюдается тенденция к внедрению турбодетандерных агрегатов на УКПГК [13–20]. Поэтому задачей исследования является анализ влияния состава газа, давления и температуры сырья на эффект детандирования и степень извлечения целевых компонентов.

Влияние состава газа на эффект детандирования

Исследование проводилось на основе принципиальной технологической схемы процесса НТС (рис. 1). В этой части работы проведено моделирование технологии низкотемпературной сепарации газов различного состава. Расчеты фазового равновесия выполнены по уравнению состояния Пенга–Робинсона в программном комплексе Aspen HYSYS [21–24]. Для исследования взяты составы газов газового, двух газоконденсатных и двух нефтяных месторождений. Объемная доля метана в их составе приведена в табл. 1. Диапазоны исследованных входных давлений и температур потока газа перед детандером составляют 3–6 МПа, $-4...-20^{\circ}\text{C}$, соответственно.

Таблица 1. Составы газов

Table 1. Gas compositions

Месторождения Fields	Газовое Gas	Газоконденсатные Gas condensate		Нефтяные Oil	
		1	2	1	2
Содержание метана, % об. Methane content, % vol.	97,8	88,5	81,6	80,5	78,7

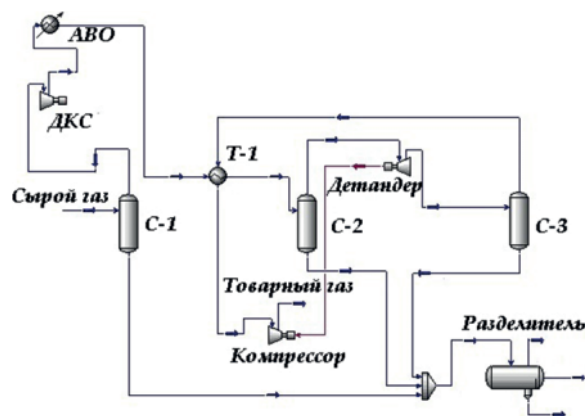


Рис. 1. Моделирующая схема процесса низкотемпературной сепарации газа

Fig. 1. Modeling scheme of the low-temperature gas separation

Адекватность модели оценивалась сравнением компонентных составов товарного газа, полученного в процессе моделирования, и товарного газа реального УКПГ. Как следует из табл. 2, относительная погрешность по основным компонентам не превышает 10 %.

Под эффектом детандирования понимается изменение температуры газа на единицу изменения давления, $^{\circ}\text{C}/\text{МПа}$. Результаты исследования пред-

ставлены на рис. 2, 3. Наиболее сильный эффект детандирования наблюдается у более сухого газа газового месторождения. Снижение содержания метана в составе газов газоконденсатных месторождений приводит к снижению эффекта детандирования. Попутный нефтяной газ обладает наиболее низким эффектом детандирования.

Таблица 2. Сравнение составов реального товарного газа и рассчитанного по программе HYSYS

Table 2. Comparison of compositions of the real commercial gas and gas calculated in the software HYSYS

Состав газа, % об. Gas composition, % vol.	Производственный режим Production mode	Расчет Calculation	Абсолютная погрешность Absolute error	Относительная погрешность Relative error
			%	
CH_4	87,34	87,33	0,01	0,01
C_2H_6	4,60	4,57	0,03	0,65
C_3H_8	2,98	3,13	0,15	5,03
C_4H_{10}	1,18	1,11	0,07	5,93
C_5H_{12}	0,20	0,18	0,02	10,00
C_{6+}	0,03	0,02	0,01	33,33
N_2	2,83	2,79	0,04	1,41
CO_2	0,82	0,84	0,02	2,44

Для выбранных диапазонов давления наблюдается тенденция к увеличению эффекта детандирования с уменьшением входного давления (при условии, что во всех случаях перепад давлений на детандере одинаков и равен 1,19 МПа). Для газа газового месторождения при входной температуре минус 5°C и давлении 6 МПа коэффициент детандирования равен $11,2^{\circ}\text{C}/\text{МПа}$, а при давлении 3 МПа он почти в два раза выше и составляет $22,2^{\circ}\text{C}/\text{МПа}$. Данная зависимость прослеживается и для других газов. Причиной этого является то, что на величину эффекта детандирования оказывает влияние множество различных характеристик газа, таких как теплоемкость газовой и жидкой фаз, теплота конденсации компонентов.

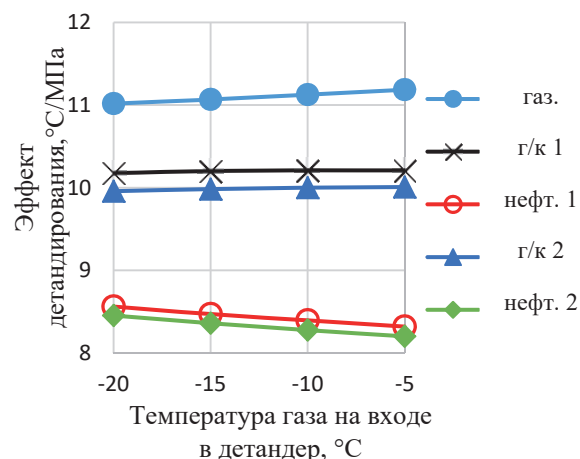


Рис. 2. Зависимости эффекта детандирования от состава газа при входном давлении 6 МПа

Fig. 2. Dependence of the expander effect on gas composition at input pressure of 6 МПа

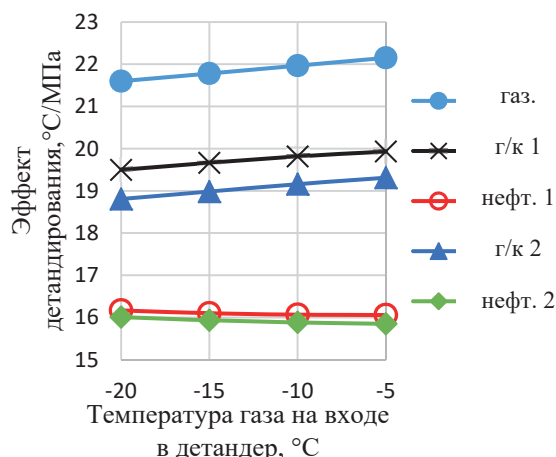


Рис. 3. Зависимости эффекта детандирования от состава газа при входном давлении 3 МПа

Fig. 3. Dependence of the expander effect on gas composition at input pressure of 3 MPa

Кроме того, для исследованных газов установлена различная динамика величины эффекта детандирования при изменении температуры газа на входе в детандер. Это проявляется в том, что для газов газового и газоконденсатных месторождений по мере понижения температуры наблюдается уменьшение эффекта детандирования, а для попутных нефтяных газов – эффект детандирования увеличивается (рис. 2, 3).

Влияние состава газа на критическое давление

Газ Мыльджинского нефтегазоконденсатного месторождения характеризуется невысоким конденсатным фактором, что может привести к ретроградному испарению выпавшего конденсата в условиях действующего режима низкотемпературного сепаратора [25–27]. Для исследования возможности проявления ретроградного испарения, снижающего степень извлечения целевых углеводородов и повышающего вследствие этого точку росы по углеводородам подготовленного газа, проведен анализ фазовых диаграмм «давление–температура» газа газоконденсатного месторождения, ПНГ и их смеси в соотношении 1:1 для составов, соответствующих состоянию газов перед детандером (рис. 4–6).

Критическая точка для газа газоконденсатного месторождения соответствует давлению 5,58 МПа и температуре минус 74 °С. Эти параметры находятся в диапазоне рабочего давления технологической линии, а значит при температурах ниже минус 70 °С и давлении, превышающем критическое, будет возникать эффект ретроградного испарения жидких углеводородов, что повлечет за собой снижение степени извлечения C_{5+} . Однако такие низкие температуры не применяются на действующей установке.

Для ПНГ характерно более высокое критическое давление и температура: 10,2 МПа, минус 33 °С, соответственно. Критическое давление – выше области рабочих давлений сепарации. С понижением температуры газа в области рабочих давлений количество жидкой фазы будет увеличи-

ваться и для данного состава газа ретроградное испарение не возникнет.

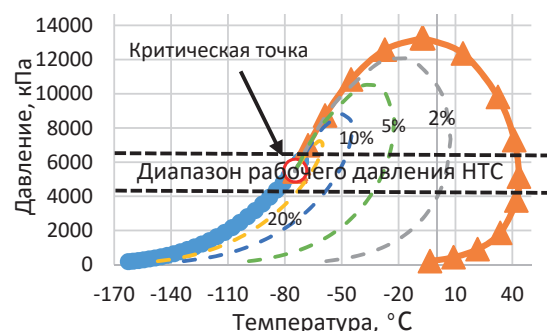


Рис. 4. Фазовая диаграмма для газа газоконденсатного месторождения

Fig. 4. Phase diagram for the gas from a gas condensate field

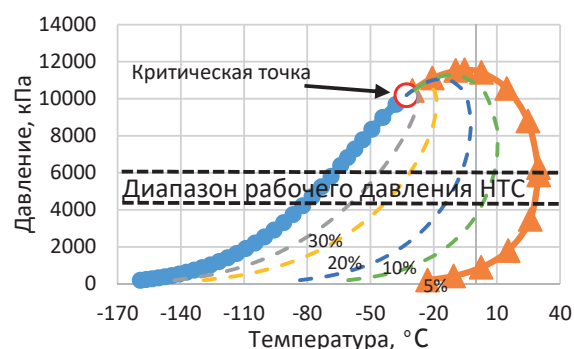


Рис. 5. Фазовая диаграмма для попутного нефтяного газа

Fig. 5. Phase diagram for the associated petroleum gas

Для смеси газов газоконденсатного месторождения и ПНГ критическая точка лежит выше диапазона рабочего давления и соответствует 8,56 МПа и температуре минус 52,7 °С (рис. 6), что исключает явление ретроградного испарения при подготовке газа. Таким образом, влияние попутного нефтяного газа на процесс НТС в смеси с природным газом заключается в значительном снижении возможности проявления ретроградного испарения конденсата в условиях действующих технологических параметров низкотемпературного сепаратора.

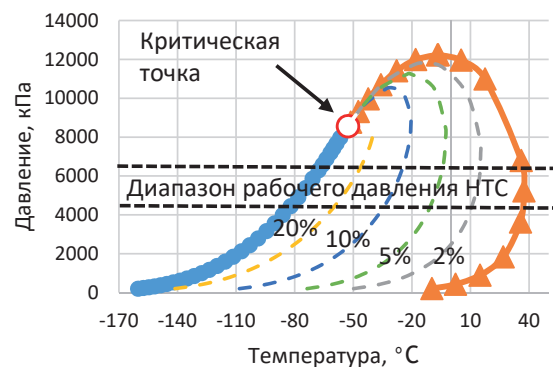


Рис. 6. Фазовая диаграмма для смеси газов газоконденсатного и нефтяного месторождений в соотношении 1:1

Fig. 6. Phase diagram for a gas mixture of the gas condensate and oil fields in the ratio of 1:1

Так как сырой газ газоконденсатного месторождения и ПНГ содержат в своём составе ценные для химической отрасли углеводороды C_{3+} , дальнейшее исследование направлено на изучение влияния состава смеси газов на их степень извлечения.

Влияние состава газа на степень извлечения углеводородов C_{3+}

Для оценки влияния состава смеси газов газоконденсатного и нефтяного месторождений на степень извлечения углеводородов C_{3+} по результатам моделирования составлены материальные балансы процесса НТС для отдельных газов и для их смеси в соотношении 1:1 (табл. 3, 4). Термобарические параметры во всех исследуемых случаях оставались неизменными и составляли:

- диапазон давлений газа на входе в детандер 2–12 МПа;
- температура в низкотемпературном сепараторе -20°C ;
- перепад давления на детандере 1,19 МПа;
- массовый расход газа 100 тыс. кг/ч.

Таблица 3. Расчетная степень извлечения углеводородов C_{5+} при давлении перед детандером 6 МПа

Table 3. Calculated recovery rate of hydrocarbon C_{5+} at pressure of 6 MPa

Газ месторождения Gas of field	Содержание углеводородов C_{5+} , кг/ч Hydrocarbon content C_{5+} , kg/h		Степень извлечения, % Recovery rate, %
	в исходном газе in original gas	в нестабильном конденсате in instable condensate	
Газоконденсатное 1 Gas condensate 1	6626	5693	85,9
Нефтяное 1 Oil 1	4753	4501	94,7
Смесь 1:1 Mix 1:1	11379	10194 (ожидаемое) (expected)	89,6
		10411 («фактическое») (calculated)	91,5

Из результатов расчета следует, что степень извлечения компонентов C_{5+} при подготовке газоконденсатного сырья составляет 85,9 %, для нефтяного газа – 94,7 % (табл. 3). Предполагая, что взаимное влияние при совместной подготовке газа отсутствует, при тех же технологических параметрах получили бы значение степени извлечения «ожидаемой» равное 89,6 %. Однако расчет показал, что степень извлечения выше ожидаемого значения на 1,9 %. Это говорит о положительном влиянии ПНГ на степень извлечения углеводородов C_{5+} из смеси газов.

Зависимости степени извлечения компонентов C_{5+} от давления приведены на рис. 7. В рабочем диапазоне давлений фактическая степень извлечения C_{5+} выше ожидаемой. Максимальная степень извлечения составляет 91,5 % при давлении газа перед детандером 6 МПа. В целом степень извлечения углеводородов C_{5+} при рабочем давлении доста-

точно высокая. При давлениях 2, 3 и 10 МПа ожидаемая и «фактическая» степени извлечения практически одинаковы. При давлении газов 11 МПа наблюдается уменьшение «фактической» степени извлечения C_{5+} из смеси газов относительно ожидаемой.

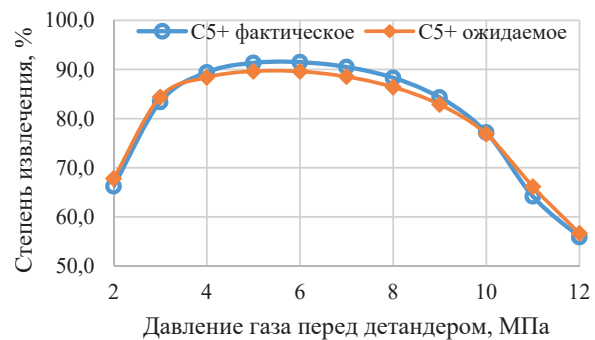


Рис. 7. Зависимости степени извлечения углеводородов C_{5+} от давления смеси газов перед детандером

Fig. 7. Dependences of the recovery rate of hydrocarbons C_{5+} on gas pressure before the expander

Аналогичные расчеты проведены для оценки степени извлечения углеводородов C_{3-4} (табл. 4). Степень извлечения пропан-бутановой фракции, как и следовало из теории [28, 29], значительно ниже, чем углеводородов C_{5+} . Для исследуемого газоконденсатного сырья она составляет 20,8 %, для нефтяного – 57 %. При совместной подготовке газов степень извлечения углеводородов C_{3-4} ниже ожидаемой на 7,9 %. Такая зависимость прослеживается для диапазона давлений 3–11 МПа (рис. 8).

Таблица 4. Расчетная степень извлечения углеводородов C_{3-4} при давлении перед детандером 6 МПа

Table 4. Calculated recovery rate of hydrocarbon C_{3-4} at pressure of 6 MPa

Газ месторождения Gas of field	Содержание углеводородов C_{3-4} , кг/ч Hydrocarbon content C_{3-4} , kg/h		Степень извлечения, % Recovery rate, %
	в исходном газе in original gas	в нестабильном конденсате in instable condensate	
Газоконденсатное 1 Gas condensate 1	8644	1802	20,8
Нефтяное 1 Oil 1	22665	12910	57,0
Смесь 1:1 Mix 1:1	31309	14713 (ожидаемое) (expected)	47,0
		12240 (фактическое) (calculated)	39,1

При давлениях 2 и 12 МПа «фактическая» степень извлечения приближается к ожидаемой.

Таким образом, при совместной подготовке газов разного происхождения по технологии НТС их потенциал в отношении извлечения углеводородов C_{3-4} в нестабильный конденсат реализован не полностью.

Зависимость количества нестабильного конденсата от давления показана на рис. 9. Количество

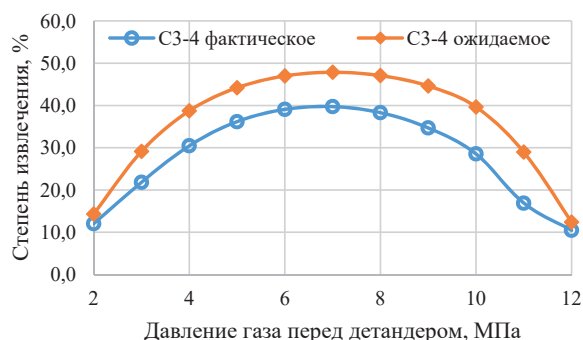


Рис. 8. Зависимость степени извлечения углеводородов C_{3-4} от давления смеси газов перед детандером

Fig. 8. Dependence of the recovery rate of hydrocarbons C_{3-4} on gas pressure before the expander

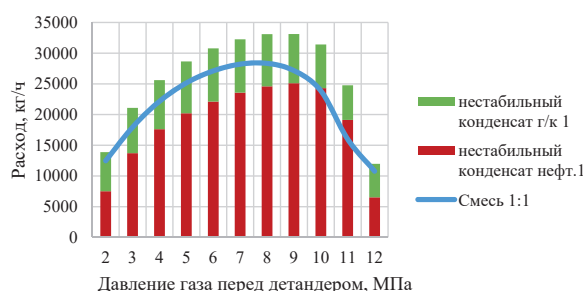


Рис. 9. Зависимость количества нестабильного конденсата от давления газа перед детандером

Fig. 9. Dependence of unstable condensate amount on gas pressure before the expander

извлекаемого нестабильного конденсата при минимальном (2 МПа) и максимальном давлении газа перед детандером (12 МПа) в наибольшей степени

соответствует ожидаемой величине. Но при этом его абсолютная величина минимальна, что свидетельствует о нерациональном использовании сырьевого газа. Кроме того, можно заметить, что ни при одном режиме работы низкотемпературного сепаратора ожидаемое количество конденсата не достигается, главным образом из-за низкой степени извлечения углеводородов C_{3-4} .

Заключение

По результатам технологического моделирования процесса низкотемпературной сепарации газов в среде программного комплекса Aspen HYSYS установлено:

- максимальный эффект детандирования наблюдается у сухого газа газового месторождения: 11–22 °С/МПа;
- снижение содержания метана в газах газоконденсатных и нефтяных месторождений приводит к снижению эффекта детандирования;
- при понижении температуры газа перед детандером от –5 до –20 °С величина эффекта детандирования уменьшается для газов газового и газоконденсатных месторождений, а для газов нефтяных месторождений увеличивается;
- совместная подготовка ПНГ и природного газа позволяет исключить явление ретроградного испарения конденсата;
- совместная подготовка исследованных газоконденсатного и попутного нефтяного газов при давлении перед детандером 6 МПа увеличивает степень извлечения в нестабильный конденсат углеводородов C_{5+} на 1,9 %, но снижает степень извлечения углеводородов C_{3-4} на 7,9 % относительно ожидаемых величин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Oilfield Glossary. URL: https://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/r/raw_natural_gas.aspx (28.05.2019).
2. Кидни А., Парриш У.Р., Маккартни Д. Основы переработки природного газа / Перевод с англ. яз. 2-го издания / под ред. О.П. Лыкова, И.А. Голубевой. – СПб.: ЦОП «Профессия», 2014. – 664 с.
3. Колокольцев С.Н. Совершенствование технологий подготовки и переработки углеводородных газов. – М.: ЛЕНАНД, 2015. – 584 с.
4. Прокопов А.В., Истомин В.А., Федулов Д.М. Выделение углеводородов C_{3+} из газоконденсатной смеси при промышленной подготовке пластового флюида // Вести газовой науки: научно-технический сборник. – 2016. – № 4 (28). – С. 202–206.
5. Технологические процессы и методы расчета оборудования установок подготовки углеводородных газов: учебное пособие / Г.К. Зиберт, Е.П. Запорожец, А.Г. Зиберт, И.М. Валиуллин, Н.Н. Андреева. – М.: Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина, 2015. – 447 с.
6. Арнольд К., Стюарт М. Справочник по оборудованию для комплексной подготовки газа. Промысловая подготовка углеводородов / Перевод с англ. – М.: ООО «Премиум Инжиниринг», 2012. – 630 с.
7. Петрухин В.В., Петрухин С.В. Справочник по газопромысловому оборудованию. – М.: Инфа-Инженерия, 2013. – 928 с.
8. Регулярные процессы и оборудование в технологиях сбора, подготовки и переработки нефтяных и природных газов: учебное пособие / Е.П. Запорожец, Д.Г. Антониади, Г.К. Зиберт, И.М. Валиуллин, Е.Е. Запорожец, А.И. Гриценко, В.В. Ключко, О.В. Савенков. – Краснодар: ИД «Юг», 2012. – 620 с.
9. Ahmed Abd El-Kader Bhran, Mohamed Hassan Hassanean, Mohamed Galal Helal. Maximization of natural gas liquids production from an existing gas plant // Egyptian Journal of Petroleum. – 2015. – V. 380. – P. 333–341.
10. Kherbeck L., Chebbi R. Optimizing ethane recovery in turboexpander processes // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. – 2015. – V. 351. – P. 292–297.
11. Parametric studies on floating pad journal bearing for high speed cryogenic turboexpanders / A. Jain, M.M. Jadhav, S. Karimulla, A. Chakravarty // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – V. 278. – P. 1–8.
12. Анализ влияния характеристик газа на эффективность узла редуцирования / Н.Л. Елизарьева, А.В. Колчин, Г.Е. Коробков, А.В. Курочкин // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2015. – № 4 (102). – С. 178–184.
13. Анализ пиковых режимов установки комплексной подготовки газа (УКПГ) Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения / К.М. Давлетов, В.Ю. Глазунов, И.П. Эльберт, А.Р. Хафизов // Нефтегазовое дело: электронный научный журнал. – 2013. – № 5. – С. 170–178. URL: <http://ogbus.ru> (28.05.2019).

14. Методический подход к расчетному исследованию промышленной подготовки природного газа к транспорту по технологии низкотемпературной сепарации с применением турбодетандерных агрегатов / М.А. Воронцов, Д.М. Федулов, А.С. Грачев, А.В. Прокопов, В.Ю. Глазунов // Вести газовой науки: научно-технический сборник. – 2016. – № 2 (26). – С. 105–111.
15. Современное состояние технологий промышленной подготовки газа газоконденсатных месторождений / А.В. Прокопов, А.Н. Кубанов, В.А. Истомин, Д.М. Федулов, Т.С. Цацулина // Вести газовой науки: научно-технический сборник. – 2015. – № 3 (23). – С. 100–108.
16. Технологический анализ работы турбохолодильной техники на начальном этапе эксплуатации УПГ № 2 Бованенского НГКМ / А.Н. Кубанов, М.А. Воронцов, Д.М. Федулов, Глазунов В.Ю. // Вести газовой науки: научно-технический сборник. – 2013. – № 4 (15). – С. 84–89.
17. Awajogak Anthony Ujile, Dirina Ames. Performance Evaluation of Refrigeration Units in Natural Gas Liquid Extraction Plant // Hindawi Publishing Corporation. Journal of Thermodynamics. – 2014. – V. 2014. – P. 1–13.
18. Foglietta J.H. Dew point turboexpander process a solution for high pressure fields // Lummus Process Technology. – Houston, Texas: Randall Gas Technologies, A Division of ABB Lummus Global Inc., 2017. – P. 18.
19. Esmaeili A. Supersonic Separation of Natural Gas Liquids by Twister Technology // Chemical engineering transactions. – 2016. – V. 52. – P. 7–12.
20. Ribwar Abdulrahman. Optimal NGL Recovery From Natural Gas Using Turboexpander: a Case Study and Simulation // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. – 2015. – V. 51. – P. 536–538.
21. Peng D.Y., Robinson D.B. A new two-constant equation of state // Ind. Eng. Chem. Fundam. – 1976. – V. 15. – № 1. – P. 59–64.
22. Fissore D., Sokeipirim D. Simulation and energy consumption analysis of a propane plus recovery plant from natural gas // Fuel Processing Technology. – 2011. – V. 800. – P. 656–662.
23. Jaubert J.-N., Mutelet F. VLE predictions with the Peng-Robinson equation of state and temperature dependent calculated through a group contribution method // Fluid Phase Equilibria. – 2004. – V. 224. – P. 285–304.
24. Process Simulation and Evaluation of Ethane Recovery Process using Aspen-HYSYS Mashallah Rezakazemia, Nejat Rahmani-anb, Hassan Jamilb, Saeed Shirazianc // Chemical engineering transactions. – 2018. – V. 70. – P. 61–66.
25. Булейко В.М., Григорьев Б.А., Овсяникова М.С. Исследование фазового поведения углеводородных смесей с низким конденсатным фактором // Вести газовой науки: научно-технический сборник. – 2017. – № 2 (30). – С. 4–13.
26. Особенности технологических процессов промышленной подготовки природного газа с низким конденсатным фактором / А.В. Дунаев, В.А. Истомин, А.Н. Кубанов, В.В. Моисеев, Д.М. Федулов // Газовая промышленность. – 2015. – № 11. – С. 80–83.
27. Pedersen K.S., Christensen P.L., Shaikh J.A. Phase behavior of petroleum reservoir fluids. – Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015. – 446 p.
28. Сбор и промышленная подготовка газа на северных месторождениях России / А.И. Гриценко, В.А. Истомин, А.Н. Кульков, Р.С. Сулейманов. – М.: Недра, 1999. – 473 с.
29. Прокопов А.В., Истомин В.А., Федулов Д.М. Степень извлечения и остаточное содержание углеводородов C_{5+} в газе сепарации газоконденсатных месторождений // НефтеГазоХимия. – 2016. – № 2. – С. 64–70.

Поступила 31.05.2019 г.

Информация об авторах

Гатиятов А.Р., аспирант Инженерной школы природных ресурсов Национального Томского политехнического университета.

Шишмина Л.В., кандидат химических наук, доцент отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

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

UDC 665.522.2

EFFECT OF ASSOCIATED PETROLEUM GAS ON THE RATE OF HYDROCARBON C_{3+} RECOVERY IN CO-TREATMENT WITH GAS CONDENSATE FEEDSTOCK

Artur R. Gatiyatov¹,

arthuro_94@mail.ru

Lyudmila V. Shishmina¹,

shishmina@tpu.ru

Pavel N. Zyatikov¹,

zpavel@tpu.ru

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

Relevance. In Tomsk region there are favorable conditions for implementing such efficient way to use associated petroleum gas, as its co-treatment with natural gas applying the technique of low-temperature separation. This direction is supposed to be developed. The company «Gazpromneft-Vostok» is implementing a large-scale investment project aimed at achieving a 95 % level of beneficial use of associated petroleum gas from the cluster of the fields. The gas produced at this cluster will be directed to the gas and condensate treatment plant at Myldzhinskiy oil and gas condensate field. On the other hand, for treatment of gas from gas-condensate fields, the crucial task is to increase the yield of the stabilized hydrocarbon condensate. To solve this problem, it is necessary to optimize the process schemes of low-temperature separation based on the component gas compositions. Therefore, the relevant topic is to study the effect of petroleum gas on the rate of recovery of condensing components in the treatment of a mixture of gases of different origins.

The main aim of the research is to determine the effect of associated petroleum gas on the rate of hydrocarbon recovery C_{3-4} and C_{5+} in gas co-treatment of gas-condensate and oil fields based on low-temperature separation.

The object of the research is an integrated gas and condensate treatment plant.

Method: modeling with a software package Aspen HYSYS.

Results. Dry gas from the natural gas field has the maximum expander effect: 11–22 °C/MPa. Decrease in methane content of gases in the gas condensate and oil fields leads to reduction of the expander effect. When lowering gas temperature before the expander from minus 5 °C to minus 20 °C the expander effect value decreases for the gases of the gas and gas condensate fields, but increases for the gases of oil fields. Co-treatment of associated petroleum and natural gases allows eliminating the retrograde condensate evaporation. Co-treatment of the studied gas condensate and associated petroleum gases at a pressure of 6 MPa before the expander increases the recovery rate of C_{5+} hydrocarbons into unstable condensate by 1,9 %, but decreases the recovery rate of C_{3-4} hydrocarbons by 7,9 % relative to the expected values.

Key words:

Natural gas, associated petroleum gas, low-temperature separation, composition, recovery rate, condensate.

REFERENCES

1. Oilfield Glossary. URL: https://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/r/raw_natural_gas.aspx (28.05.2019).
2. Kidni A., Parrish W.R., Makkartni D. *Osnovy pererabotki prirodnogo gaza* [Fundamentals of natural gas processing]. Translated from English. Eds. O.P. Lykov, I.A. Golubeva. St-Petersburg, Professiya Publ., 2014. 664 p.
3. Kolokoltsev S.N. *Sovershenstvovanie tekhnologiy podgotovki i pererabotki uglevodorodnykh gazov: monografiya* [Improving the technology of preparation and processing of hydrocarbon gases: monography]. Moscow, LENAND Publ., 2015. 584 p.
4. Prokopov A.V., Istomin V.A., Fedulov D.M. *Vydelenie uglevodorodov C_{3+V} iz gazokondensatnoy smesi pri promyslovoy podgotovke plastovogo flyuida* [Extraction of C_{3+V} hydrocarbons from gas-condensate mixture during field preparation of formation fluid]. *Vesti gazovoy nauki*, 2016, no. 4 (28), pp. 202–206.
5. Zibert G.K., Zaporozhec E.P., Zibert A.G., Valiullin I.M., Andreeva N.N. *Tekhnologicheskie protsessy i metody rascheta oborudovaniya ustanovok podgotovki uglevodorodnykh gazov* [Technological processes and methods for calculating the equipment of hydrocarbon gas treatment plants: a training manual]. Moscow, I.M. Gubkin Russian State University of Oil and Gas Publ., 2015. 447 p.
6. Arnold K., Stewart M. *Spravochnik po oborudovaniyu dlya kompleksnoy podgotovki gaza. Promyslovaya podgotovka uglevodorodov* [Surface Production Operations: Design of Gas-Handling Systems and Facilities]. Translated from English. Moscow, Premium Inzhiniring Publ., 2012. 630 p.
7. Petrukhin V.V., Petrukhin S.V. *Spravochnik po gazopromyslovomu oborudovaniyu* [Handbook of gas field equipment]. Moscow, Infa-Inzheneriya Publ., 2013. 928 p.
8. Zaporozhec E.P., Antoniadi D.G., Ziber G.K., Valiullin I.M., Zaporozhec E.E., Gritsenko A.I., Kyuyko V.V., Savenyuk O.V. *Regulyarnye protsessy i oborudovanie v tekhnologiyakh sbora, podgotovki i pererabotki neftyanykh i prirodnnykh gazov* [Regular processes and equipment in technologies for the collection, preparation and processing of petroleum and natural gases]. Krasnodar, Yug Publ. House, 2012. 620 p.
9. Ahmed Abd El-Kader Bhuran, Mohamed Hassan Hassanean, Mohamed Galal Helal. Maximization of natural gas liquids production from an existing gas plant. *Egyptian Journal of Petroleum*, 2015, vol. 380, pp. 333–341.
10. Kherbeck L., Chebbi R. Optimizing ethane recovery in turboexpander processes. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2015, vol. 351, pp. 292–297.
11. Jain A., Jadhav M.M., Karimulla S., Chakravarty A. Parametric studies on floating pad journal bearing for high speed cryogenic turboexpanders. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 278, pp.1–8.
12. Elizareva N.L., Kolchin A.V., Korobkov G.E., Kurochkin A.V. Analysis of the influence of gas characteristics on the effective

- performance of reduction assembly. *Problems of collection, preparation and transportation of oil and petroleum product*, 2015, no. 4 (102), pp. 178–184. In Rus.
13. Davletov K.M., Glazunov V.Yu., Elbert I.P., Khafizov A.R. Analysis of peak modes complex gas (GPP) of the Bovanenkovskoe oil and gas field (NGKM). *Oil and Gas Business: electronic scientific journal*, 2013, no. 5, pp. 170–178. In Rus.
 14. Vorontsov M.A., Fedulov D.M., Grachev A.S., Prokopov A.V., Glazunov V.Yu. Metodicheskiy podkhod k raschetnomu issledovaniyu promyslovoy podgotovki prirodnogo gaza k transportu po tekhnologii nizkotemperaturnoy separatsii s primeneniem turbo-detandernykh agregatov [Methodical approach to computational study of natural gas field preparation for transport using low-temperature separation technology applying turbo-expander units]. *Vesti gazovoy nauki*, 2016, no. 2 (26), pp. 105–111.
 15. Prokopov A.V., Kubanov A.N., Istomin V.A., Fedulov D.M., Tsatsulina T.S. Sovremennoe sostoyanie tekhnologiy promyslovoy podgotovki gaza gazokondensatnykh mestorozhdeniy [Current state of the field gas treatment technology of gas condensate fields]. *Vesti gazovoy nauki*, 2015, no. 3 (23), pp. 100–108.
 16. Kubanov A.N., Vorontsov M.A., Fedulov D.M., Glazunov V.Yu. Tekhnologicheskii analiz raboty turbokholodilnoy tekhniki na nachalnom etape ekspluatatsii UPG № 2 Bovanenkovskogo NGKM [Technological analysis of turbo-refrigeration equipment operation at the initial stage of the UPG No. 2 operation of the Bovanensky NGKM]. *Vesti gazovoy nauki*, 2013, no. 4 (15), pp. 84–89.
 17. Awajogak Anthony Ujile and Dirina Ames. Performance Evaluation of Refrigeration Units in Natural Gas Liquid Extraction Plant. *Hindawi Publishing Corporation. Journal of Thermodynamics*, 2014, vol. 2014, pp. 1–13.
 18. Foglietta J.H. Dew point turboexpander process a solution for high pressure fields. *Lummus Process Technology*. Texas, U.S.A, Randall Gas Technologies, A Division of ABB Lummus Global Inc. Houston, 2017. 18 p.
 19. Esmaeili A. Supersonic Separation of Natural Gas Liquids by Twister Technology. *Chemical engineering transactions*, 2016, vol. 52, pp. 7–12.
 20. Ribwar Abdulrahman. Optimal NGL Recovery From Natural Gas Using Turboexpander: a Case Study and Simulation. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 2015, vol. 51, pp. 536–538.
 21. Peng D.Y., Robinson D.B. A new two-constant equation of state // *Ind. Eng. Chem. Fundam.* 1976. V. 15. № 1. P. 59–64.
 22. Fissore D., Sokeipirim D. Simulation and energy consumption analysis of a propane plus recovery plant from natural gas. *Fuel Processing Technology*, 2011, vol. 800, pp. 656–662.
 23. Jaubert J.-N., Mutelet F. VLE predictions with the Peng-Robinson equation of state and temperature dependent calculated through a group contribution method. *Fluid Phase Equilibria*, 2004, vol. 224, pp. 285–304.
 24. Mashallah Rezakazemia, Nejat Rahmadianb, Hassan Jamilb, Saeed Shirazianc. Process Simulation and Evaluation of Ethane Recovery Process using Aspen-HYSYS. *Chemical engineering transactions*, 2018, vol. 70, pp. 61–66.
 25. Buleyko V.M., Grigorev B.A., Ovsyanikova M.S. Investigation of phase behavior of hydrocarbon mixtures with low condensate ratios. *Vesti gas science: scientific and technical collection*, 2017, no. 2 (30), pp. 4–13. In Rus.
 26. Dunaev A.V., Istomin V.A., Kubanov A.N., Moiseev V.V., Fedulov D.M. Upstream treatment of gas with lower condensate factor: Technology aspects. *Gas industry*, 2015, no. 11, pp. 80–83. In Rus.
 27. Pedersen K.S., Christensen P.L., Shaikh J.A. *Phase behavior of petroleum reservoir fluids*. Boca Raton, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015. 446 p.
 28. Gritsenko A.I., Istomin V.A., Kul'kov A.N., Suleimanov R.S. *Sbor i promyslovaya podgotovka gaza na severnykh mestorozhdeniyakh Rossii* [Gathering and conditioning of gas on the northern gas fields of Russia]. Moscow, Nedra Publ., 1999. 473 p.
 29. Prokopov A.V., Istomin V.A., Fedulov D.M. Extraction extent and residual content of C_{5+B} hydrocarbons in produced gas of gas-condensate fields. *OilGasChemistry*, 2016, no. 2, pp. 64–70. In Rus.

Received: 31 May 2019.

Information about the authors

Artur R. Gatiyatov, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Lyudmila V. Shishmina, Cand Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

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

Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Корректura 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 29.08.2019. Формат 60х84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 24,78. Уч.-изд. л. 22,41.
Заказ 173-19. Тираж 500 экз.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ