



ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

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

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 330, № 5, 2019

Издательство
Томского политехнического университета
2019

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА.
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРСУРСОВ**

Редакционная коллегия

Семилетов И.П., гл. редактор, д-р геогр. наук (Россия)
Рихванов Л.П., д-р геол.-минерал. наук (Россия)

Ост�альд 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)

Уленеков 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)

Алексеенко С.В., д-р физ.-мат. наук (Россия)

Воропай Н.И., д-р техн. наук (Россия)

Кочегуров А.И., канд. техн. наук (Россия)

Руи Д., PhD (Португалия)

Зиатдинов Р.А., канд. физ.-мат. наук (Южная Корея)

Спицын В.Г., д-р техн. наук (Россия)

Муравьев С.В., д-р техн. наук (Россия)

Пойлов В.З., д-р техн. наук (Россия)

Лотов В.А., д-р техн. наук (Россия)

Софронов В.Л., д-р хим. наук (Россия)

Бузник В.М., д-р хим. наук (Россия)

Захаров Ю.А., д-р хим. наук (Россия)

Антипенко В.Р., д-р хим. наук (Россия)

Голик В.И., д-р техн. наук (Россия)

Абуталипова Е.М., д-р техн. наук (Россия)

Полищук В.И., д-р техн. наук (Россия)

Хамитов Р.Н., д-р техн. наук (Россия)

Зюзев А.М., д-р техн. наук (Россия)

Кирьянова Л.Г., выпуск. редактор, канд. филос. наук (Россия)

Глазырин А.С., выпуск. редактор, д-р техн. наук (Россия)

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

Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2019

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Журнал «Известия Томского политехнического университета. Инженеринг 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. Инженеринг георесурсов» публикует оригинальные работы, обзорные статьи, очерки и обсуждения, охватывающие последние достижения в области геологии, разведки и добывчи 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. Инженеринг 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



TOMSK
POLYTECHNIC
UNIVERSITY

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

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

Volume 330, № 5, 2019

Tomsk Polytechnic University Publishing House
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)
Bouznik V.M., Dr. Sc. (Russia)
Zakharov Yu.A., Dr. Sc. (Russia)
Antipenko V.R., Dr. Sc. (Russia)
Golik V.I., Dr. Sc. (Russia)
Abutalipova E.M., Dr. Sc. (Russia)
Polishchuk V.I., Dr. Sc. (Russia)
Khamitov R.N., Dr. Sc. (Russia)
Zyuzev A.M., Dr. Sc. (Russia)
Kiryanova L.G., managing editor, Cand. Sc. (Russia)
Glazyrin A.S., managing editor, Dr. Sc. (Russia)

AIMS AND SCOPES

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

The journal was founded in 1903.

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

ISSN (print) – 2500-1019

ISSN (on-line) – 2413-1830

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

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

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

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

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

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

The publication of manuscripts is free of charge.

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

| | | |
|---|-----|---|
| Анализ деформаций прожекторной мачты при помощи наземного лазерного сканирования и метода конечных элементов Епифанова Е.А., Строкова Л.А. | 7 | Numerical analysis of deformations of the lighting mast by ground laser scanning and finite elements method Epifanova E.A., Strokova L.A. |
| О технологии выявления участков трубопроводов с изгибыми напряжениями при пересечении геодинамических зон Аскаров Р.М., Китаев С.В., Исламов И.М. | 18 | On technology of detecting pipeline sites with bending voltages in their crossing geodynamic zones Askarov R.M., Kitaev S.V., Islamov I.M. |
| Сравнение ИСП-МС анализа геологических образцов в варианте растворов и лазерной абляции стекол Николаева И.В., Палесский С.В., Карпов А.В. | 26 | Analysis of geological samples: comparison of solution ICP-MS and fused glasses LA-ICP-MS techniques Nikolaeva I.V., Palesskiy S.V., Karpov A.V. |
| Оптимизация параметров электрического поля катодной защиты от коррозии газонефтепродуктопроводов Зенцов В.Н., Болотнов А.М., Удалова Е.А., Мазитова А.К., Лапшакова И.В., Райзер Ю.С., Маскова А.Р., Васильева А.С. | 35 | Optimization of parameters of electric field of gas product and oil pipes cathodic protection Zentsov V.N., Bolotnov A.M., Udalova E.A., Mazitova A.K., Lapshakova I.V., Rayzer Yu.S., Maskova A.R., Vasilyeva A.S. |
| Параметрический анализ схемы парогазовой установки с комбинацией трех циклов для повышения КПД при работе в северных газодобывающих районах Галашов Н.Н., Цибульский С.А. | 44 | Parametric analysis of the diagram of the combined-cycle gas turbine with a combination of three cycles for improving efficiency when operating in northern gas producing areas Galashov N.N., Tsibulskiy S.A. |
| Системный анализ и гипотеза физической картины процесса очистки погружного оборудования скважин с применением модернизированного обратного клапана Азеев А.А., Булчаков Н.Д., Безверхая Е.В. | 56 | Systematic analysis and hypothesis of physical pattern of well submersible equipment purification using the upgraded backpressure valve Azeev A.A., Bulchakov N.D., Bezverkhaya E.V. |
| Оценка газонасности пласта К₁₀ в пределах Шерубайнуринского участка Карагандинского угольного бассейна Кабирова С.В., Ворошилов В.Г., Портнов В.С., Ахматнуров Д.Р. | 64 | Estimation of gas saturation of coalbed no. K₁₀ within the Sherubaynurinsky area of the Karaganda coal-basin Kabirova S.V., Voroshilov V.G., Portnov V.S., Akhmatnurov D.R. |
| Алгоритм автоматизированного управления процессом десублимации производства гексафторида урана Николаев А.В., Криницын Н.С., Дядик В.Ф. | 75 | Algorithm of automatic control of uranium hexafluoride production deposition Nikolaev A.V., Krintsyn N.S., Dyadik V.F. |
| Прогнозно-поисковая модель эпимеральных Au-Ag месторождений кислотно-сульфатного типа по данным дешифрирования современных космических снимков (на примере рудного поля Светлое, Хабаровский край) Ананьев Ю.С., Житков В.Г., Потцелев А.А. | 84 | Forecasting and prospecting model of epithermal high sulfidation Au-Ag deposits using modern satellite data (on the example of ore field Svetloe, Khabarovskiy kray) Ananyev Yu.S., Zhitkov V.G., Potseluev A.A. |
| Прогнозирование коэффициента продуктивности скважин с боковым стволом (на примере Уньвинского месторождения) Щербаков А.А., Хижняк Г.П., Галкин В.И. | 93 | Prediction of sidetrack wells productivity index (on example of the Unvinskoe field) Shcherbakov A.A., Khizhnyak G.P., Galkin V.I. |
| Дифференциация сельскохозяйственных угодий по площадям на примере Томского района Пасько О.А., Захарченко А.В., Поспелова Е.В. | 100 | Area differentiation of agricultural land on the example of Tomsk district Pasko O.A., Zakharchenko A.V., Pospelova E.V. |
| Интеграция процесса категоризации электрохимических накопителей энергии в задачу оптимизации состава оборудования автономных энергетических комплексов, использующих возобновляемые источники энергии Карамов Д.Н. | 113 | Integration of the storage battery categorization process into the task of optimizing the equipment of stand-alone energy systems with renewable energy sources Karamov D.N. |
| Применение системного анализа для обеспечения эксплуатационной надёжности электрических машин в алмазодобывающей промышленности Однокопылов Г.И., [Дементьев Ю.Н.], Шевчук В.А. | 131 | Application of system analysis for providing reliability of electrical machines in diamond industry Odnokopylov G.I., [Dementyev Yu.N.], Shevchuk V.A. |
| Математическое моделирование режимов работы колебательной шаровой мельницы Данекер В.А. | 141 | Mathematical simulation of operational modes of a vibrating ball mill Daneker V.A. |
| Характеристика термической устойчивости масел природных битумов и нефей Антипенко В.Р., Баканова О.С., Кашапов Р.С. | 152 | Characteristics of thermal stability of oils of natural bitumens and crude oils Antipenko V.R., Bakanova O.S., Kashapov R.S. |

| | | |
|--|------------|---|
| Влияние ацетат- и цитрат-ионов на протекание процесса катодного восстановления Yb(III) на ртутных электродах Коршунов А.В., Ковалева С.В., Абрамова П.В., Горлушки Д.А. | 161 | Influence of acetate and citrate ions on cathodic reduction of Yb(III) at mercury electrodes Korshunov A.V., Kovaleva S.V., Abramova P.V., Gorlushko D.A. |
| Определение поломок резцов PDC с помощью регрессионного и нейросетевого моделирования Третьяк А.Я., Кузнецова А.В., Борисов К.А. | 169 | Determination of PDC cutter breakdowns using regression and neural network modeling Tretyak A.Ya., Kuznetsova A.V., Borisov K.A. |
| Исследование взаимосвязей между химическим составом вод и донных отложений рек Сибири Савичев О.Г. | 178 | Research of interrelations between chemical composition of waters and bottom sediments of Siberian rivers Savichev O.G. |
| Кондуктивный теплоперенос в слое тонкопленочной тепловой изоляции Половников В.Ю. | 189 | Conductive heat transfer in layer of thin-film thermal insulation Polovnikov V.Yu. |
| Параметры активности нанопорошков меди при длительном хранении в условно-герметичной таре Тихонов Д.В., Ильин А.П., Беспалова Е.А. | 198 | Activity parameters of copper nanopowder after long storage in conditional-hermetic package Tikhonov D.V., Ilyin A.P., Bespalova E.A. |

УДК 624.131

АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИЙ ПРОЖЕКТОРНОЙ МАЧТЫ ПРИ ПОМОЩИ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ И МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Епифанова Екатерина Александровна¹,
epifanovaea@tpu.ru

Строкова Людмила Александровна¹,
sla@tpu.ru

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

Актуальность темы обусловлена необходимостью усовершенствования подходов к оценке и прогнозу деформаций высокомачтовых опор. Решение этой задачи сопряжено с многими неопределенностями, такими как недостаточность лабораторных исследований свойств материалов и полевых статических и динамических испытаний подобного рода сооружений, малочисленность аналитических исследований и мониторинговых данных. Представлены первоначальные результаты полевых исследований деформаций прожекторной мачты и численного анализа ее напряженно-деформированного состояния.

Целью исследования является оценка напряженно-деформированного состояния грунтового основания сооружения и сравнение результатов численного моделирования с данными по деформациям объекта, полученными в ходе лазерного сканирования.

Объект – напряженно-деформированное состояние грунтового основания прожекторной мачты на Ванкорском нефтяном месторождении.

Методика. Исходными данными для моделирования поведения сооружения послужили данные рекогносцировочного обследования участка. Для характеристики напряженно-деформированного состояния сооружения использовался программный комплекс на базе МКЭ. Для оценки деформаций и построения точной трехмерной модели объекта использовалась технология лазерного сканирования. Сканирование объекта проводилось лазерным 3D сканером Leica Scanstation C10, планово-высотное обоснование и привязка пунктов обоснования к местной системе координат с использованием электронного тахеометра LEICA TS15 и GNSS приемника LEICA GS10, обработка массива точек проводилась в программном комплексе Leica Cyclone 8.0, трехмерное моделирование объекта было осуществлено в программном комплексе SolidWorks.

Результаты. Оценено напряженно-деформированное состояние грунтового основания. Создана цифровая расчетная модель. Выполнено сравнение результатов моделирования с пространственно-координатным положением конструкций, установленным при лазерном сканировании. Оценен вклад грунтовых условий в деформации сооружения.

Ключевые слова:

Лазерное сканирование, моделирование, деформации, механические свойства, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов.

Введение

Наблюдение за сложными техническими сооружениями при их эксплуатации является наиболее эффективным способом предотвращения аварийных ситуаций. Анализ отечественных и зарубежных [1–29] исследований показал, что в последние годы ведутся работы по совершенствованию методов геотехнического мониторинга объектов. Объективная оценка технического состояния сооружения может быть получена при комплексировании методов по оценке геометрии объекта и метода конечных элементов (МКЭ) для выяснения причин деформаций, обусловленных инженерно-геологическими условиями участка.

Цель работы: оценить напряженно-деформированное состояние грунтового основания сооружения и сравнить результаты численного моделирования с данными по деформациям объекта, полученными в ходе лазерного сканирования.

В качестве объекта для проведения технического контроля была выбрана прожекторная мачта на Ванкорском нефтегазовом месторождении, которое расположено в Туруханском районе Красноярского края, на водоразделе р. Большая Хета и р. Лодочная (рис. 1).

Характеристика инженерно-геологических условий

Территория Ванкорского месторождения в инженерно-геологическом отношении изучена довольно подробно в последние тридцать лет.

В геоморфологическом отношении территория принадлежит Нижнеенисейской низменности, представлена в основном моренной равниной ермаковского оледенения с абсолютными отметками поверхности земли 24...64 м. Характер рельефа здесь является типичным для краевых ледниковых областей. Его образование происходило во время отступания ледника (в его краевой зоне) в условиях длительной задержки и постепенного таяния. Также здесь повсеместно развит камовый рельеф и широкое распространение имеет Ангутихинская озерно-ледниковая равнина.

Гидрографическая сеть района изысканий сформирована притоками р. Большая Хета (левый приток р. Енисей). Реки равнинные, с корытообразным поперечным профилем, часто меандрируют. Основными источниками питания рек служат дождевые и талые воды. Территория характеризуется значительной заозеренностью (10 %). Преобладают (около 90 %) мелководные и небольшие по размерам озера, площадь водного зеркала кото-



Рис. 1. Снимок междуречья Большая Хета и р. Лодочная, район работ обозначен красным контуром, масштаб 1:100000

Fig. 1. Satellite image of the Bolshaya Kheta – Lodochnaya interfluve, the study area is in red outline, scale 1:100000

рых не превышает 1 км². Это в основном термокарстовые озера с глубиной 2...3 м, в зимний период они полностью промерзают. Некоторые озера соединены между собой ручьями, образующими единую озерно-речную систему. Протоки, соединяющие озера, также полностью промерзают зимой. Несквозные подозерные талики формируются чаще всего под озерами, глубина которых превышает 2 м. В зависимости от размеров, возраста и генезиса озер мощность подозерных таликов может достигать 50...70 м. Под водораздельными озерами глубиной до 10 м мощность таликов составляет 15...20 м. В летний период обильных дождей и сезонного оттаивания многолетнемерзлых пород движение транспортных средств становится весьма затруднительным, а в некоторых случаях невозможным.

Климат района изысканий в значительной степени определяется его географическим положением в высоких широтах, близостью Арктического бассейна, влиянием арктических и атлантических воздушных масс, характером рельефа. Зимой, продолжительность которой достигает восемь и более месяцев (с октября по апрель, нередко и май), преобладают западные и юго-западные воздушные течения. В летний период над территорией преобладают северные вторжения арктических масс холдного и сухого воздуха континентального типа, распространение которых приводит к установлению относительно малооблачной погоды антициклонального типа и к резкому понижению температуры воздуха. В общем для района характерна

частая смена направления воздушных течений, чем объясняется неустойчивость погоды в течение всего года. Среднегодовая скорость ветра в исследуемом районе составляет 3...5 м/с, а максимальная скорость ветра может достигать 30 м/с.

Солнечная радиация является главным источником тепловой энергии для всех природных процессов. Ближайшая к району исследования метеорологическая станция, где проводятся наблюдения за характеристиками солнечной радиации, – Игарка. Температура воздуха исследуемой территории имеет положительные значения с июня по сентябрь. Среднегодовая температура воздуха варьирует от -6,7 до -10,2 °С. Годовая амплитуда колебаний среднемесячных температур воздуха составляет 43...44 °С. Продолжительность периода с отрицательными температурами составляет 225...255 дней. Самый холодный месяц в году – январь. Средняя температура воздуха в январе -27...-29 °С, наиболее теплого месяца – июля 14...17 °С.

Среднегодовое количество осадков в изучаемом районе составляет 480...540 мм, в холодный период года выпадает 260...330 мм, в теплый 200...260 мм. Максимальное количество осадков за месяц наблюдается в августе и сентябре, что способствует увеличению коррозии металлических конструкций и дополнительному протаиванию сезонно-талого слоя, минимальное количество осадков – в феврале–марте. Среднегодовая относительная влажность воздуха в районе исследований составляет 75...78 %, с максимумами в октябре и минимумами в июне–июле.

Снежный покров является важным промежуточным звеном в теплообмене грунтов с атмосферой, поэтому его влияние на температурный режим грунтов является наиболее значительным. Теплоизолирующий эффект снежного покрова зависит от режима его формирования, высоты, плотности и процессов, происходящих внутри снежной толщи. По многолетним наблюдениям на метеостанциях Игарка и Советская Речка, устойчивый снежный покров образуется в начале октября и сохраняется в течение 8...8,5 месяцев. Максимальная мощность составляет 60...70 см, причем наблюдается закономерное возрастание с запада на восток, где мощность снежного покрова на значительной территории превышает 80 см.

Геологическое строение. В геологическом отношении объект расположен на границе Сибирской и Западно-Сибирской платформ, под чехлом мезокайнозойских отложений. Осадочные отложения четвертичной системы, мощностью до 50...115 м, развиты повсеместно. В разрезе четвертичные отложения представлены, как правило, грунтами покровного (делювиального), озерно-аллювиального, морского, ледникового генезиса.

В геологическом строении промышленной площадки представлены следующие комплексы: техногенных грунтов; верхнеплейстоценовых и голоценовых аллювиальных и озерно-аллювиальных отложений (а, Ia Q_{III-IV}) и верхнеплейстоценовых моренных отложений (g, f, lg Q_{III}) ермаковской свиты.

Комплекс техногенных грунтов распространен на глубину 5,5 м. Техногенный грунт отсыпан мелкозернистым пылеватым серым песком.

Верхнеплейстоценовые и голоценовые аллювиальные и озерно-аллювиальные отложения (а, Ia Q_{III-IV}) приурочены, как правило, к озерно-болотным котловинам, долинам рек, межозерным пространствам. В районе исследований имеют мощность до 20,9 м и залегают на отложениях ермаковской свиты. Представлены суглинками и супесями серыми с примесями торфа.

Отложения ермаковской свиты развиты практически повсеместно, являясь рельефообразующими. Состав пород преимущественно супесчано-суглинистый, с включениями гравия, гальки и валунов, с прослойками и отдельными линзами песков от пылеватых до мелких. Отложения верхней части ермаковской свиты слагают наиболее высокие водораздельные поверхности. Мощность свиты до 60 м.

Геокриологические условия. Рассматриваемая территория принадлежит к области сплошного распространения многолетнемерзлых пород (ММП), мощность которых по данным бурения промысловых и разведочных скважин составляет 450...480 м. Несквозные талики прослеживаются только под наиболее крупными озерами и реками. В прирусовых частях крупных рек долинного комплекса характерны минимальные мощности ММП – до 50 м. В поймах более мелких водотоков мощность их увеличивается до 100...150 м.

Среднегодовая температура мерзлых пород, на подошве слоя годовых колебаний, от -1,5 до -2,5 °C. Во всех отрицательных формах рельефа, в которых зимой накапливается мощный снежный покров, наблюдаются таликовые участки, в основном инфильтрационного типа. Мощность их, как правило, не превышает 2...6 м.

Гидрогеологические условия. В гидрогеологическом отношении Ванкорское месторождение приурочено к краевой части северо-восточной зоны Западно-Сибирского артезианского бассейна, в разрезе которого выделяются несколько водоносных комплексов. Гидрогеологические комплексы объединены в два гидрогеологических этажа. Глинистые породы дорожковской свиты рассматриваются как региональный туронский флюидоупор, разделяющий проницаемые горизонты верхнего и нижнего гидрогеологических этажей, мощность которой в пределах месторождения составляет 150 м.

В нижнем гидрогеологическом этаже выделяют три водоносных комплекса: юрский, неокомский и апт-альб-сеноманский. Для Ванкорского месторождения характерно сложное изменение минерализации с глубиной. Пласти апт-альб-сеноманского комплекса содержат воды преимущественно хлоридно-кальциевого типа, по В.А. Сулину, а верхнего мела и неокомского комплекса – гидрокарбонатно-натриевого типа.

Верхний гидрогеологический этаж образован двумя гидрогеологическими комплексами. Его гидрогеологические условия в большей степени предопределются наличием в районе мощной толщи многолетнемерзлых пород (ММП), исключивших из водообмена значительную часть подземных вод. Первый гидрогеологический комплекс составляют отложения дорожковской, насоновской, салпадинской и танамской свит позднемелового возраста. Второй гидрогеологический комплекс представлен терригенными песчано-алевритистыми и глинистыми отложениями четвертичного возраста мощностью до 93 м.

На рассматриваемой территории выделяются надмерзлотные воды, воды сквозных таликов, межмерзлотные (внутримерзлотные) воды и подмерзлотные воды.

Надмерзлотные воды. Этот класс подземных вод включает в себя воды сезонно-талого слоя (СТС) и воды надмерзлотных (несквозных) таликов. Нижним водоупором этих вод является толща многолетнемерзлых пород. Мощность СТС изменяется от 1 до 6 м. Химический состав вод СТС близок к составу поверхностных вод и атмосферных остатков: это воды ультрапресные, гидрокарбонатные или сульфатно-гидрокарбонатные, магниевые или кальциевые. Их минерализация изменяется в пределах от 0,05 до 0,4 г/л. Воды надмерзлотных (несквозных) таликов гораздо менее распространены. Эти воды, как правило, относятся к гидрокарбонатному кальциевому, магниевому или натриевому типам. Воды пресные, их минерализация составляет 0,1...1,0 г/л. Водоносные комплек-

сы надмерзлотных таликов не имеют существенного значения для водоснабжения, но иногда используются для временного водоснабжения небольших объектов.

Воды сквозных таликов приурочены к долинам крупных водотоков и котловинам наиболее крупных озер, а также к зонам отдельных тектонических нарушений. Как правило, эти воды гидрокарбонатные, кальциевые или магниевые, пресные с минерализацией до 1 г/л. Данный водоносный комплекс является основным потенциальным источником вод для хозяйствственно-питьевого водоснабжения в силу их высокой водообильности и качества подземных вод.

Подмерзлотные воды, залегающие ниже подошвы многолетнемерзлых пород, характеризуются повсеместным распространением и включает в себя ряд водоносных комплексов, характеризующихся единством условий питания, фильтрации и разгрузки, но приуроченных к различным водовмещающим породам с соответствующими значениями коэффициента фильтрации и имеющих различный химический состав и минерализацию. По классификации В.А. Сулина, воды в основном относятся к гидрокарбонатно-натриевому типу, с минерализацией до 3,9 г/л.

Геологические и инженерно-геологические процессы. По карте ОСР-97-В (5%-я вероятность возможного превышения в течение 50 лет указанных на карте значений сейсмической интенсивности) сейсмичность района менее 5 баллов.

К самым распространенным криогенным процессам, развитым на территории, относится криогенное пучение, термокарст и солифлюкция.

Процесс криогенного пучения характеризуется поднятием поверхности почвы и породы, вызванным увеличением их объема при промерзании. В результате криогенного пучения возникают бугры пучения, размером от метра и более. Необходимо отметить, что к криогенному пучению относятся процессы сезонного (для СТС) и многолетнего (для ММП) пучения. Наиболее значимо многолетнее пучение, которое приводит к поднятию отдельных участков (площадное пучение) на 0,4...0,8 м. В инженерно-геологическом отношении эта форма морозного пучения наиболее значима. Также для СТС широко развито образование пятен-медальонов вследствие выпучивания мелкообломочного материала при сезонном промерзании грунта.

Процессы термокарста развиваются по льдистым отложениям и четко проявляются в формировании отрицательных форм рельефа.

На изучаемой территории развитие солифлюкционных процессов характерно для СТС. Отмечено вязкое/вязкопластичное течение оттаявшего грунта СТС по поверхности ММП на склонах. Благоприятствуют развитию солифлюкции здесь геоморфологические и литологические условия. Для предотвращения солифлюкции необходим, прежде всего, организованный отвод вод в сезон таяния с близлежащих склонов.

Широко распространенное в породах СТС морозобойное растрескивание определяет формирование полигонально-блочного рельефа.

Мощность сезонноталого слоя – величина непостоянная, зависящая от климатического фактора. Изменчивость величины сезонного протаивания в разные годы, в связи с климатическими колебаниями, достигает 10...30 %. В суглинках величины сезонного оттаивания составляют 0,7...1,1 м, в супесях и песках – до 1,5...2,0 м.

При освоении территории рекомендуются мероприятия, направленные на предотвращение активизации процессов термокарста и морозного пучения (замена грунта на непучинистый, удаление влаги из грунта, удаление грунта).

Техногенное воздействие. Следует отметить, что на промплощадке к наиболее негативным свойствам грунтов следует отнести предрасположенность связанных грунтов к проявлению тиксотропии. Данное свойство провоцируется динамическим воздействием на грунты (проезд транспорта, особенно гусеничного, работа вибрационных механизмов и т. п.), когда нарушаются критические расстояния между частицами, следствием чего является переход связанной воды в свободную форму, грунт разжижается, теряя свою структурную прочность. Результатом динамических воздействий на приповерхностные грунты является повышение уровня оттаивания СТС осваиваемой территории. Техногенное воздействие на рассматриваемый участок постепенно возрастает, что обусловлено расширением обустройства Ванкорского месторождения.

Заключая знакомство с инженерно-геологическими условиями участка, можно предположить, что деформации мачты могут быть обусловлены специфическими характеристиками грунтового основания: высокой сжимаемостью грунтов сезоно-талого слоя, ползучестью многолетнемерзлых пород в длительной перспективе и изменениями механических свойств грунтов при вариациях их температурного режима. Моделирование напряженно-деформированного состояния грунтового основания позволит оценить вклад грунтовых условий в деформациях мачты. Для верификации расчетов прежде необходимо оценить фактические перемещения конструкции в пространстве. Их определение представлено ниже.

Наземное лазерное сканирование объекта

Одной из самых прогрессивных универсальных технологий по оценке геометрии объектов является наземное лазерное сканирование (НЛС). Преимущества использования наземного лазерного сканирования по сравнению с традиционными методами наблюдения определяются высокой точностью геометрических параметров – до 4 мм; скоростью съемки до 60000 точек в секунду; низкой себестоимостью работ – до 40 % ниже, чем при традиционной геодезической съемке [11–21]. Полевые работы выполнялись лазерным сканером Leica ScanStation C10.

Процесс контроля можно разделить на два этапа: 1) полевые работы: получение первоначальных геометрических параметров мачты – облако точек (рис. 2); 2) камеральные работы: обработка полученных материалов полевых работ.

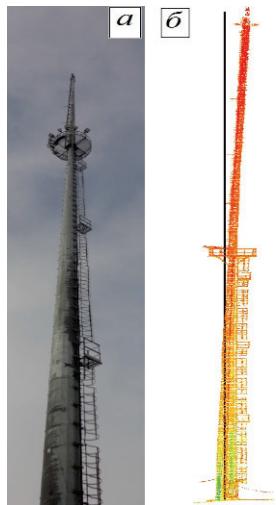


Рис. 2. Прожекторная мачта: а) фотография; б) результат лазерного сканирования – облако точек с проектной осью

Fig. 2. High-mast lighting tower: a) photography; б) laser scanning result – point cloud with project axis

Определение оси мачты проводилось следующим образом. Через каждые два метра и на стыках секций производились поперечные сечения облака точек мачты. Затем в получившийся разрез вписывался многоугольник, центр которого совпадает с осью мачты. Полученные центры затем соединялись линией, образуя ось мачты. Важно уточнить, что на стыках секций делалось два разреза – нижней и верхней секции, в результате чего были получены корректные оси для каждой секции отдельно.

Полученный набор сечений и ось показывают отклонение осей секций друг от друга не только в местах соединений, но и искажение геометрии мачты по всей длине секции. Дальнейшая обработка результатов и измерение геометрических характеристик мачты производилась с помощью AutoCAD.

Обследование общего отклонения мачты. На основе измерений составлены две диаграммы отклонения существующей оси от вертикальной оси мачты в направлениях запад–восток и юг–север (рис. 3). Из диаграмм следует, что отклонение вершины мачты на восток ~5,7 см, на юг ~7,2 см. Отклонение вершины молниепровода на восток ~8,3 см, на юг ~4,7 см. Из диаграмм также следует, что наклон мачты происходит не только в местах соединения секций, но и по всей длине одной

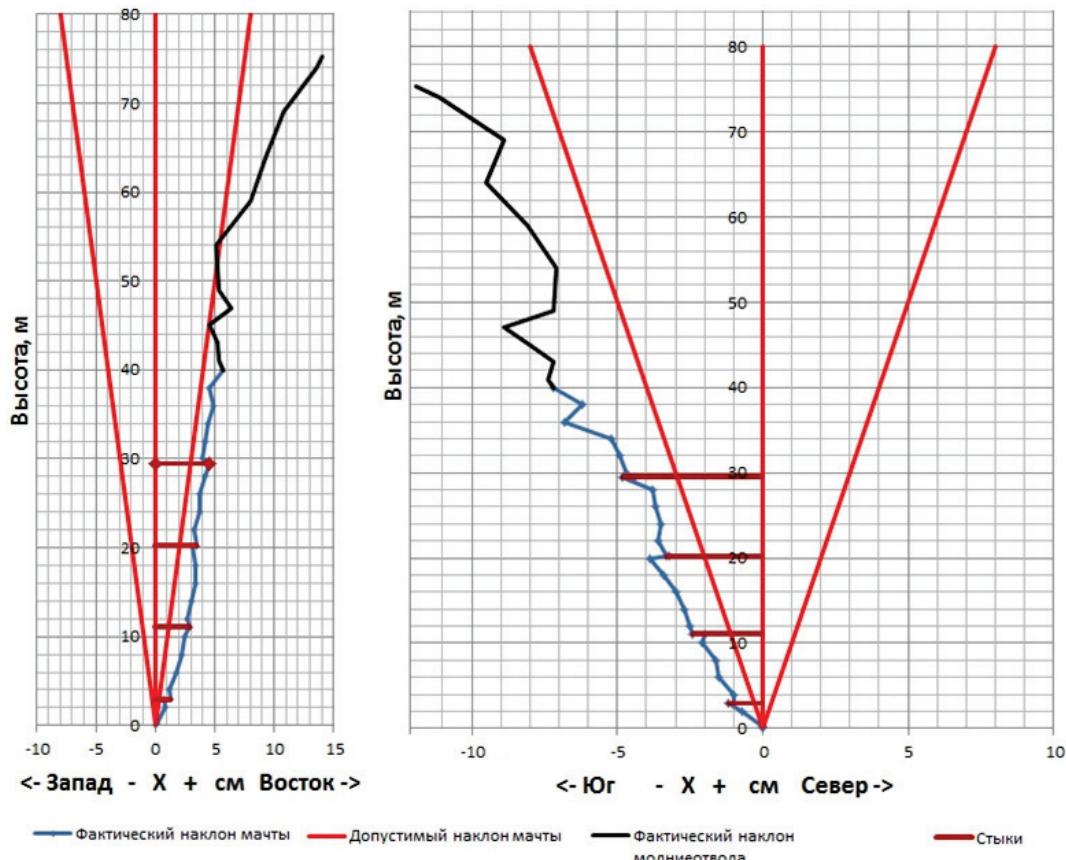


Рис. 3. Отклонение мачты и молниепровода в направлениях запад–восток и юг–север

Fig. 3. Deflection of the mast and lightning rod in the directions West-East and South-North

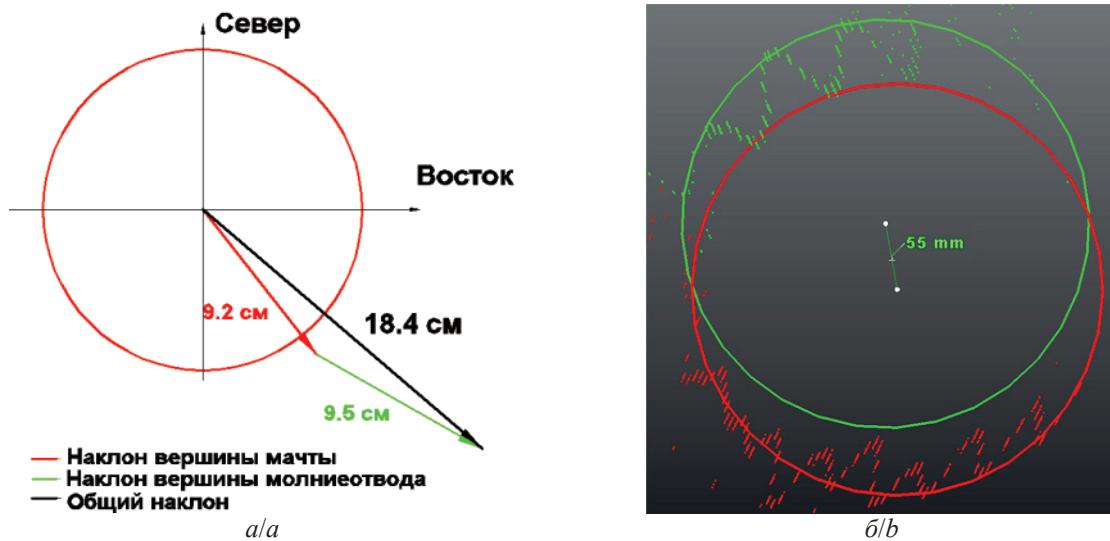


Рис. 4. Направление отклонения молниеприемника на нулевой отметке (а) и высоте 70 м (б)

Fig. 4. Direction of lightning rod deviation at a height of (a) 0 and (b) 70 meters

секции. Итоговое отклонение от вертикальной оси (рис. 4, вид сверху) составило: для вершины мачты 9,2 см, для вершины молниеприемника 9,5 см. Общее отклонение от вертикальной оси мачты с молниеприемником составило 18,4 см в направлении юго-восток (рис. 4, а). На рис. 4, б представлена диаграмма колебания оси молниеприемника, которые достигают 6 см на высоте 70 м.

Обследование зазоров зон стяжек производилось следующим образом. В местах соединения секций проводился поперечный разрез мачты в горизонтальной плоскости. Подсчитаны зазоры между внешней поверхностью нижней секции и внутренней поверхностью верхней секции в четырех направлениях. Полученные данные представлены в табл. 1. Значение максимального зазора составило 22 мм в месте соединения секций СВВ40-1 и СВВ40-2 с западной стороны мачты.

По результатам обследования зон стяжек мачты М2 выявлено несоблюдение допуска (± 100 мм) размеров зон стяжек секций СВВ40-4 и СВВ40-3: длина их стяжек равна 1939 и 1372 мм вместо положенных 1800 ± 100 и 1500 ± 100 мм соответственно.

Таблица 1. Зазоры в местах соединений секций

Table 1. Gaps in the joints of sections

| Соединения секций Joints of the sections | Зазор, мм/Gap, mm | | | |
|---|-------------------|----------------|----------------|-------------|
| | Запад East | Восток West | Север North | Юг South |
| CBB40-1+CBB40-2 | 22 | 0 | 8 | 2 |
| CBB40-2+CBB40-3 | 2 | 4 | 9 | 0 |
| CBB40-3+CBB40-4 | 2 | 0 | 1 | 1 |
| CBB40-4+CBB40-5 | 5 | 1 | 2 | 7 |

Обследование отклонений осей секций друг от друга (табл. 2) производилось в следующей последовательности. Вначале соединялись центры верхней и нижней граней одной секции, образуя ось секции. Затем измерялся угол между этими осями

секций (α). β – это угол между осями секций, проведеными через центры сечений. В случаях, когда оси секций не совпадали, было подсчитана высота, на которой эти оси должны пересечься (H). Если пересечение происходило вышестыка, значению высоты присваивался знак плюс, если ниже – минус. Также подсчитана высота, на которой должны пересекаться оси, проведенные через центры сечений секции (H').

По результатам обследования искривления стенок в пределах каждой секции в направлениях север, юг, запад и восток выявлено максимальное отклонение стенок от идеальной формы: 18 мм на секции СВВ40-1. Максимальный угол отклонения, который составил $37^{\circ}29'$, в месте соединения секций СВВ40-2 и СВВ40-1.

Итак, при наземном лазерном сканировании получено облако точек, на основе которого созданы фактические контуры конструкции мачты М2. Установлено, что колебание мачты из-за ветра негативно влияет на результат съемки. Так, выше 50 м обработка данных становится затруднительной из-за большого разброса облака точек и невозможности нахождения точной оси мачты.

Численное моделирование напряженно-деформированного состояния основания мачты

В работах [30–37] по численному моделированию поведения грунтовых массивов во взаимодействии с различными инженерными сооружениями (виадук, магистральный трубопровод, метрополитен, историческое здание театра, подпорная стенка, при упрочнении грунтового массива цементно-песчаной инъекцией) показаны преимущества использования МКЭ в актуализации расчетных моделей при реконструкции сооружений и предотвращении аварийных ситуаций.

Объектом настоящего исследования являлось напряженно-деформируемое состояние (НДС)

Таблица 2. Отклонения секций дуг от друга на месте соединения

Table 2. Deviation of sections from each other at the junction

| Соединения секций Joints of the sections | 180- α | H стяжки, мм H screed, mm | 180- α | H стяжки, мм H screed, mm | 180- β | H' стяжки, мм H screed, mm | 180- β | H' стяжки, мм H screed, mm |
|---|---------------------------|------------------------------|-------------------------|------------------------------|---------------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| | Запад–Восток East–West | | Юг–Север South–North | | Запад–Восток East–West | | Юг–Север South–North | |
| | | | | | | | | |
| CBB40-5+CBB40-4 | 2°21" | -680 | 10°29" | 8935 | 5°37" | 3702 | 23°31" | -331 |
| CBB40-4+CBB40-3 | 15°35" | 11883 | 1°4" | 735 | 18°22" | 209 | 7°19" | -1736 |
| CBB40-3+CBB40-2 | 2°15" | -2561 | 2°49" | -4729 | 2°13" | 5118 | 2°49" | 6903 |
| CBB40-2+CBB40-1 | 37°29" | 1985 | 2°53" | - | 37°29" | 23 | 2°53" | 4554 |

грунтового основания мачты (рис. 5). Работа проводилась с использованием программного комплекса конечноэлементного анализа *Plaxis*. При моделировании были приняты следующие механические характеристики материала мачты (сталь С345, 12Г2С, 09Г2С): модуль упругости $E=2 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона $\nu=0,29$, плотность $\rho=7850$ кг/м³, предел текучести $\sigma_t=345$ МПа. Вес мачты с молниеотводом и метизами 11534 кг.

Фундамент мачты состоит из четырех винтовых металлических свай СВ-325-6.0, расположенных по углам квадрата со стороной 2 м (рис. 5). На сваи установлен и приварен четырёхсвайный ростверк (523 кг), состоящий из опорной плиты (толщиной 10 мм) и двух швеллерных балок № 20, установленных на опорные столики свай. Сваи и ростверк изготовлены из стали класса С345 и покрыты от коррозии битумнонаиритовой композицией. Соединение всех элементов фундамента между собой произведено посредством ручной сварки постоянным током. При моделировании приняты следующие механические характеристики ростверка и свай: модуль упругости $E=2 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона $\nu=0,33$.

Таблица 3. Свойства грунтов

Table 3. Soil data sets parameters

| Грунты (Soils) Параметры Parameters | насыпной песок filled sand | супесь silty clay | песок пылеватый fine sand | суглинок с про- слоями глины lean clay (clays) | суглинок с про- слоями песка lean clay (sands) |
|--|----------------------------------|----------------------|---------------------------------|--|--|
| γ_{unsat} [kN/m ²] | 17,40 | 17,00 | 17,00 | 17,00 | 17,00 |
| γ_{sat} [kN/m ²] | 18,00 | 20,00 | 18,00 | 18,00 | 18,00 |
| E_{ref} [kN/m ²] | 12000 | 10000 | 13000 | 10000 | 50000 |
| ν [-] | 0,3 | 0,3 | 0,350 | 0,350 | 0,3 |
| G_{ref} [kN/m ²] | 5000 | 5000 | 3703 | 3704 | 19231 |
| E_{oed} [kN/m ²] | 17500 | 17500 | 16049 | 16049 | 67307 |
| c_{ref} [kN/m ²] | 1 | 5 | 1 | 20 | 20 |
| φ [°] | 31 | 25 | 27 | 25 | 25 |

Геологический разрез изучен на глубину 18 м и представлен пятью инженерно-геологическими элементами. Первым от поверхности залегает насыпной песок, мощностью 5,5 м, ниже которого залегает супесь бурая, мерзлая, льдистая (льдистость за счет видимых ледяных включений i_i составляет 20...22 %), слойсто-сетчатой криотекстуры, с ожелезнением, мощностью до 2 м. Под супе-

сью залегает песок темно-серый, пылеватый, мерзлый, слабольдистый, массивной криотекстуры, мощностью 1 м. Ниже песка залегает суглинок синевато-серый, мерзлый, льдистый ($i_i = 25...30\%$), слойсто-сетчатый криотекстуры с прослойками глины, мощностью 2,5 м. Ниже залегает суглинок синевато-серый, мерзлый, слабольдистый ($i_i = 4...7\%$) с тонкими прослойками песка и включениями гальки до 5 %. Граница сезонно-тального слоя находится на глубине 6 м от поверхности земли. Физико-механические свойства грунтов указаны в табл. 3.



Рис. 5. Основание мачты

Fig. 5. Mast foundation

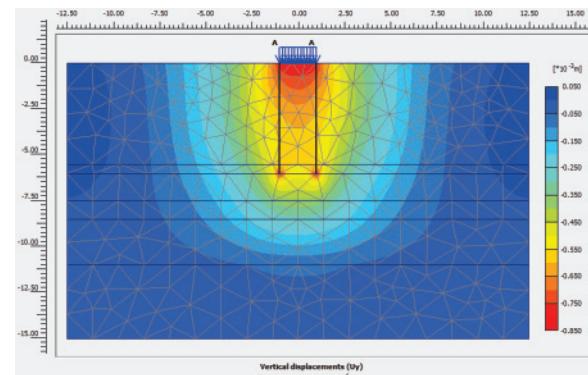


Рис. 6. Конечно-элементная сетка и изополя вертикальных перемещений

Fig. 6. Finite element mesh and vertical displacements

Дискретизация расчетной области выполнена треугольными элементами. В расчетах использовалась упруго-пластическая модель Plaxis Mohr-Coulomb. Ростверк моделировался жесткой плистой, опертой на межузловые анкеры. Вес мачты передавался на фундамент при помощи опции Distributed static load A-A (2885 кг/м²). Расчеты вертикальных перемещений грунтового основания мачты составили 0,8 мм (рис. 6), горизонтальные перемещения – 0,14 мм, с учетом ползучести несущего слоя супеси мерзлой льдистой (Plaxis Soft-Soil-Creep Model), приращения вертикальных и горизонтальных перемещений составили 0,21 и 0,01 мм соответственно. Из чего можно заключить, что наблюдаемые деформации мачты (вертикальные перемещения 31 мм и горизонтальные перемещения 18,4 см) лишь на 3,2 % объясняются грунтовыми условиями площадки.

Выводы

- При проведении технического контроля мачты лазерным сканированием установлено, что объект имеет отклонения от вертикальной оси, которые равны: для вершины мачты 9,2 см, для вершины молниеотвода 9,5 см. Значение общего отклонения от вертикальной оси мачты с молниеотводом составило 18,4 см в направлении юго-восток, что превышает допустимый диапазон отклонения мачты – 8 см на высоте 80 м (СП 70.13330.2012. Несущие и ограждающие конструкции). Диаграммы отклонений мачты от вертикальной оси показали, что наклон мачты происходит не только в местах соединения секций, но и на всей длине каждой отдельной секции.
- Анализ проведённой работы показал, что при выявлении отклонений у мачт с молниеотвода-

ми высотой более 40 м главным условием, влияющим на корректность данных, являются конвективные потоки воздуха. С увеличением высоты мачты амплитуда колебания молниеотвода становится больше. Поэтому при техническом контроле за высотными объектами погодные условия съемки играют значительную роль в получении достоверных данных.

- Моделирование напряженно-деформированного состояния грунтового основания позволило оценить вклад грунтовых условий в деформациях мачты. Предположение, что деформации мачты могут быть обусловлены специфическими характеристиками грунтового основания: высокой сжимаемостью грунтов сезонно-талого слоя, ползучестью многолетнемерзлых пород в длительной перспективе и изменениями механических свойств грунтов при изменении их температурного режима, не подтвердилось. Вертикальные перемещения грунтового массива составили всего 0,8 мм, горизонтальные перемещения – 0,14 мм. С учетом ползучести несущего слоя грунта приращения вертикальных и горизонтальных перемещений составили 0,21 и 0,01 мм соответственно. Таким образом, вклад грунтовых условий оказался минимальным. Фундамент устроен правильно, с учетом особенностей грунтов этой климатической зоны. Деформации мачты с молниеотводом на 96,8 % обусловлены строительными свойствами надземной части конструкции, условиями ее монтажа и эксплуатации.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Светашков А.А., Куприянов Н.А., Манабаев К.К. Приближенный алгоритм решения задач линейной вязкоупругости // Вычислительная механика сплошных сред. – 2012. – Т. 5. – № 3. – С. 292–299.
- Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. – М.: ДМК Пресс, 2002. – 618 с.
- Connor R.J., Hodgson I.C. Field Instrumentation, Testing, and Long-term Monitoring of High-mast Lighting Towers in the State of Iowa. – Ames, IA: Iowa Department of Transportation, 2006. – 56 p.
- Field and Laboratory Studies on High-Mast Lighting Towers in Iowa / R.J. Connor, G. Callahan, M. Koob, I.C. Hodgson, B.L. Brakke // Proc. of the 2007 Mid-Continent Transportation Research Symposium. – Ames, Iowa, August 2007. – 16 p.
- Dexter R.J. Investigation of Cracking of High-mast Lighting Towers. – Ames, IA: Iowa Department of Transportation, 2004. – 46 p.
- Design and commissioning of high mast lighting poles / S.I. Dilawer, A.R. Junaidi, S.N. Mehdi, G.M.S. Ahmed // IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering. – 2013. – V. 8. – Iss. 6. – P. 40–46.
- Failure analysis of a high mast lamp post / G. Das, S. Chakrabarty, A.K. Dutta, S.K. Das, K.K. Gupta, R.N. Ghosh // Engineering Failure Analysis. – 2006. – V. 13 (17). – P. 1153–1158.
- Sherman R.J., Hebdon M., Connor R. Fatigue Testing and Retrofit Details of High-Mast Lighting Towers // Engineering Journal (American Institute of Steel Construction). – 2016. – V. 53 (1). – P. 61–72.
- Goode J.S., Van de Lindt J.W. Reliability-based design of medium mast lighting structural supports // Structure and Infrastructure Engineering. – 2013. – V. 9. – № 6. – P. 594–600.
- The potential of terrestrial laser scanners for digital ground surveys / D.D. Lichti, J. Franke, W. Cannel, K.D. Wheeler // J. Spat. Sci. – 2005. – V. 50. – № 1. – С. 75–89.
- Рыльский И.А., Малеванная М.С. Наземные лазерные методы – новые подходы к информационному обеспечению географических исследований // Геодезия и картография. – 2014. – № 8. – С. 38–48.
- Селезнева Е.В. Применение лазерного сканирования в геоморфологических исследованиях // Вестник МГУ. Сер. 5. – 2013. – № 2. – С. 47–53.
- Assessing modern ground survey methods and airborne laser scanning for digital terrain modelling: a case study from the Lake District, England / M. Gallay, C.D. Lloyd, J. McKinley, L. Barry // Comput. and Geosci. – 2013. – V. 51. – P. 216–227.
- Комиссаров А.В., Широкова Т.А., Комиссаров Д.В. Общий подход к изучению погрешностей наземной лазерной съемки, вызванных метрологическими свойствами объектов // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 1. – С. 36–42.

15. Terrestrial Laser Scanning Technology for Deformation Monitoring and Surface Modeling of Arch Structures / H. Yang, M. Omidalizarandi, X. Xu, I. Neumann // Composite Structures. – 2017. – V. 169. – № 3. – P. 173–179.
16. Use of Terrestrial Laser Scanning Technology for Long Term High Precision Deformation Monitoring / R. Vezočník, T. Ambrožič, O. Sterle, G. Bilban, N. Pfeifer, B. Stopar // Sensors. – 2009. – № 9. – P. 9873–9895.
17. Применение наземного лазерного сканирования и трехмерного информационного моделирования для неразрушающего контроля / А.Н. Яковлев, Е.В. Токмаков, О.В. Павлов, В.Г. Ли, А.Н. Искрин, Т.Г. Коржнева // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 12. – Ч. 2. – С. 72–75.
18. Lichti D.D. A method to test differences between additional parameter sets with a case // Photogrammetry and Remote Sensing. – 2008. – V. 63 (2). – P. 169–180.
19. 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.
20. 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. 458–460.
21. Xu X., Yang H., Neumann I. Time-efficient filtering method for three-dimensional point clouds data of tunnel structures // Advances in Mechanical Engineering. – 2018. – V. 10. – № 5. – P. 1–6.
22. СП 43.13330.2012 Акт. ред. СНиП 2.01.03–85. Сооружение промышленных предприятий. – М.: Минстрой России, 2012. – 106 с.
23. СП 20.13330.2016 Акт. ред. СНиП 2.01.07–85*. Нагрузки и воздействия. – М.: Минстрой России, 2016. – 104 с.
24. СП 53–102–2004. Общие правила проектирования стальных конструкций. – М.: ЦНИИСК им. Кучеренко, 2004. – 131 с.
25. СП 16.13330.2010. Акт. ред. СНиП II-23-81*. Стальные конструкции. Нормы проектирования. – М.: Минстрой России, 2011. – 178 с.
26. Latypov A., Zharkova N., Nuriyev I. Landslide hazard assessment in city under construction Innopolis (Russia) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – № 33. – 6 p.
27. Ганова С.Д. Геоэкологические аспекты создания и функционирования природно-технических систем в условиях криолитозоны Западной Сибири // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2017. – № 5. – С. 58–64.
28. Комплексный метод снижения пылевой и газовой опасностей в угольных шахтах / О.В. Скопинцева, С.Д. Ганова, Н.В. Демин, В.И. Папичев // Горный журнал. – 2018. – № 11. – С. 97–100.
29. Ганова С.Д., Сотникова А.О. Нормализация риска в техносфере // Стратегия развития геологического исследования недр: настоящее и будущее (к 100-летию МГРИ-РГГРУ). Материалы Международной научно-практической конференции. – М.: МГРИ-РГГРУ, 2018. – Т. 2. – С. 108–109.
30. Епифанова Е.А., Строкова Л.А. Оценка деформаций исторического здания в Томске с помощью комплексного подхода, основанного на сочетании наземного лазерного сканирования и конечно-элементного моделирования // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 5. – С. 27–41.
31. Строкова Л.А., Епифанова Е.А., Коржнева Т.Г. Численный анализ поведения основания опоры моста на старой железнодорожной линии // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 5. – С. 125–139.
32. Строкова Л.А., Ермолаева А.В. Природные особенности строительства участка газопровода «Сила Сибири» на участке Чаяндинское нефтегазоконденсатное месторождение – Ленск // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – № 4. – Т. 326. – С. 41–55.
33. Строкова Л.А., Ермолаева А.В. Районирование территории по степени опасности оседания земной поверхности при проектировании магистрального газопровода в южной Якутии // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 10. – С. 59–68.
34. Strokova L. A. Modeling of tunneling-induced ground surface movement // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – V. 24. – 6 p.
35. Strokova L.A., Teterin E. A. Identification, diagnosis and ranking of risks of geohazard in pipeline and urbanized territories // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – V. 43. – 6 p.
36. Purgina D.V., Strokova L.A., Kuzevanov K.I. Modeling of changing hydrogeological conditions during construction of pier foundations on the Kama river bank // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – V. 33. – 6 p.
37. Численное моделирование влияния упрочнения грунтового массива цементно-песчаной инъекцией на деформации основания / Л.А. Строкова, С.С.Т. Тарек, В.В. Голубева, В. Иванов // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 10. – С. 6–17.

Поступила 30.09.2018 г.

Информация об авторах

Епифанова Е.А., аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

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

УДК 624.131

NUMERICAL ANALYSIS OF DEFORMATIONS OF THE LIGHTING MAST BY GROUND LASER SCANNING AND FINITE ELEMENTS METHOD

Ekaterina A. Epifanova¹,

epifanovaea@tpu.ru

Lyudmila A. Strokova¹,

sla@tpu.ru

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

The topic is relevant due to the necessity to improve approaches to estimation and prediction of deformations of the lighting mast. The solution of this problem is associated with many uncertainties, such as the lack of laboratory studies of the materials properties and field static and dynamic tests of such structures, the small number of analytical studies and monitoring data. The article presents the initial results of field studies of the high-mast lighting tower deformations and the numerical analysis of its stress-strain state.

This study aims to assess the stress-strain state of the foundation of the structure and compare the results of numerical simulation with the data on object deformation obtained during laser scanning.

Object of the research is the stress-strain state of the foundation of the lighting mast at the Vankor oil field.

Methods. The initial data for simulating the structure behaviour were obtained through archive data and field study. A reconnaissance survey of the site was completed. A program complex based on FEM is used to forecast the stress-strain state of the structure. Laser scanning technology allow accurate definition of deformations lying on every side of the structure and make an accurate three-dimensional model of the object. The terrestrial laser scanning objects held by 3D laser scanner Leica Scanstation C10; horizontal, vertical justification and binding study points to a local coordinate system using Total Station LEICA TS15 and GNSS receiver LEICA GS10; handling a cloud of points held in the software package Leica Cyclone 8.0; three-dimensional object modeling was carried out in the software package SolidWorks.

The results. The stress-strain state of the foundation of the lighting mast was studied in detail. A digital design model is created. The sections and general crack formation together with TLS measurement indicate that the structure is deformed. We estimated the minimum contribution of soil conditions to the deformation of the structure.

Key words:

Terrestrial laser scanning, modeling, deformation, mechanical behavior, stress-strain state, finite element model analysis.

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

REFERENCES

1. Svetashkov A. A., Kupriyanov N. A., Manabayev K. K.. Approximate algorithm for solving problems of linear viscoelasticity. *Computational mechanics of continuous media*, 2012, vol. 5, no. 3, pp. 292–299.
2. Perelmuter A.V., Slivker V.I. *Raschetnye modeli sooruzheniy i vozmozhnost ikh analiza* [Calculation Models of Structures and Possibilities of their Analysis]. Moscow, DMK Press Publ., 2002. 618 p.
3. Connor R.J., Hodgson I.C. *Field Instrumentation, Testing, and Long-term Monitoring of High-mast Lighting Towers in the State of Iowa*. Ames, IA, Iowa Department of Transportation, 2006. 56 p.
4. Connor R.J., Callahan G., Koob M., Hodgson I.C., Brakke B.L. Field and Laboratory Studies on High-Mast Lighting Towers in Iowa. *Proc. of the 2007 Mid-Continent Transportation Research Symposium*. Ames, Iowa, August 2007. 16 p.
5. Dexter R.J. *Investigation of Cracking of High-mast Lighting Towers*. Ames, IA, Iowa Department of Transportation, 2004. 46 p.
6. Dilawer S.I., Junaidi A.R., Mehdi S.N., Ahmed G.M.S. Design and commissioning of high mast lighting poles. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 2013, vol. 8, no. 6, pp. 40–46.
7. Das G., Chakrabarty S., Dutta A.K., Das S.K., Gupta K.K., Ghosh R.N. Failure analysis of a high mast lamp post. *Engineering Failure Analysis*, 2006, vol. 13 (17), pp. 1153–1158.
8. Sherman R.J., Hebdon M., Connor R. Fatigue Testing and Retrofit Details of High-Mast Lighting Towers. *Engineering Journal (American Institute of Steel Construction)*, 2016, vol. 53 (1), pp. 61–72.
9. Goode J.S., Van de Lindt J.W. Reliability-based design of medium mast lighting structural supports. *J. Structure and Infrastructure Engineering*, 2007, vol. 9, no. 6, pp. 594–600.
10. Lichti D.D., Franke J., Cannel W., Wheeler K.D. The potential of terrestrial laser scanners for digital ground surveys. *J. Spat. Sci.*, 2005, vol. 50, no. 1, pp. 75–89.
11. Rylsky I.A., Malevannaya M.S. Terrestrial laser methods – new approaches to information support of geographical research. *Geodeziya i kartografiya*, 2014, vol. 8, pp. 38–48. In Rus.
12. Selezneva E.V. Application of laser scanning in geomorphologic studies. *MSU Vestnik. Series 5*, 2013, vol. 2, pp. 47–53. In Rus.
13. Gallay M., Lloyd C.D., McKinley J., Barry L. Assessing modern ground survey methods and airborne laser scanning for digital terrain modelling: a case study from the Lake District, England. *J. Comput. and Geosci.*, 2013, vol. 51, pp. 216–227.
14. Komissarov A.V., Shirokova T.A., Komissarov D.V. General approach to the study of errors of terrestrial laser shooting caused by metrological properties of objects. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotosemka*, 2013, no. 1, pp. 36–42. In Rus.
15. Yang H., Omidalizarandi M., Xu X., Neumann I. Terrestrial Laser Scanning Technology for Deformation Monitoring and Surface Modeling of Arch Structures. *Composite Structures*, 2017, vol. 169, no. 3, pp. 173–179.

16. Vezočnik R., Ambrožič T., Sterle O., Bilban G., Pfeifer N., Stolar B. Use of Terrestrial Laser Scanning Technology for Long Term High Precision Deformation Monitoring. *Sensors*, 2009, no. 9, pp. 9873–9895.
17. Yakovlev A.N., Tokmakov E.V., Pavlov O., Li V.G., Iskrin A.N., Korzhneva T.G. Application of terrestrial laser scanning and three-dimensional information modeling for non-destructive testing. *Izvestiya vuzov. Fizika*, 2013, vol. 56, no. 12 (2), pp. 72–75. In Rus.
18. Lichten D.D. A method to test differences between additional parameter sets with a case study in terrestrial laser scanner self-calibration stability analysis. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2008, vol. 63, no. 2, 169–180.
19. Yang H., Xu X., Neumann I. Laser scanning-based updating of a finite element model for structural health monitoring. *IEEE Sensor*, 2016, no. 7, pp. 2100–2104.
20. 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.
21. Xu X., Yang H., Neumann I. Time-efficient filtering method for three-dimensional point clouds data of tunnel structures. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, vol. 10, no. 5, pp. 1–6.
22. SP 43.1330.2012 Act. ed. SNiP 2.01.03–85 *Sooruzhenie promyshlennykh predpriyatij* [Construction of industrial enterprises]. Moscow, The Ministry of Construction of Russia, 2012. 106 p.
23. SP 20.13330.2016 *Nagruzki i vozdeystviya* [Loads and impacts]. Moscow, The Ministry of Construction of Russia, 2016. 104 p.
24. SP 53–102–2004. *Obozrenie pravila proektirovaniya stalnykh konstruktsiy* [General rules for design of steel structures]. Moscow, The Ministry of Construction of Russia, 2004. 131 p.
25. SP 16.13330.2010 *Stalnye konstruktsii. Normy proektirovaniya* [Steel structures. Design standards]. Moscow, The Ministry of Construction of Russia, 2011. 178 p.
26. Latypov A., Zharkova N., Nuriyev I. Landslide hazard assessment in city under construction Innopolis (Russia). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 33, 6 p.
27. Ganova S.D. Geoelectrical aspects of creation and functioning of natural and technical systems in the conditions of the cryolithozone of Western Siberia. *Proceedings of Higher Schools. Geology and exploration*, 2017, no. 5, pp. 58–64. In Rus.
28. Scopintseva O.S., Ganova S.D., Demin N.V., Papichev V.I. Integrated method of dust and gas hazard reduction in coal mines. *Gorny zhurnal*, 2018, no. 11, pp. 97–100. DOI: 10.17580/gzh.2018.11.18.
29. Ganova S.D., Sotnikova A.O. Normalizatsiya riska v tekhnosfere [Risk normalization in technosphere]. *Strategiya razvitiya issledovaniya nedr: nastoyashchee i budushchee (k 100-letiyu MGRI-RGGRU)*. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Strategy of development of geological studies of mineral resources: present and future (the 100th anniversary of MGRI-RSGPU)]. Materials of International scientific-practical conference]. Moscow, 2018. Vol. 7, pp. 93–95.
30. Epifanova E.A., Strokova L.A. Evaluation of deformation of a historic building in Tomsk by an integrated approach based on Terrestrial Laser Scanner and Finite Element Modeling. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 5, pp. 27–41. In Rus.
31. 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.
32. Strokova L.A., Ermolaeva A.V. Natural features of construction of the main gas pipeline «The Power of Siberia» on a site Chayandinskoye oil and gas field – Lensk. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 4, pp. 41–55.
33. Strokova L.A., Ermolaeva A.V. Zoning according to the hazard level of earth surface subsidence when designing the main gas pipeline in south Yakutia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 10, pp. 59–68.
34. Strokova L.A. Modeling of tunneling-induced ground surface movement. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 24, 012030, 6 p.
35. Strokova L.A., Teterin E.A. Identification, diagnosis and ranking of risks of geohazard in pipeline and urbanized territories. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43, 012051, 6 p.
36. Purgina D.V., Strokova L.A., Kuzevanov K.I. Modeling of changing hydrogeological conditions during construction of pier foundations on the Kama river bank. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 33, 01246, 6 p.
37. Strokova L.A., Tarek S.S.T., Golubeva V.V., Ivanov V. Numerical modeling of influence of soil mass reinforcement with cement-sand grouting on foundation deformation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 10, pp. 6–17.

Received: 30 September 2018.

Information about the authors

Ekaterina A. Epifanova, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

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

УДК 622.691

О ТЕХНОЛОГИИ ВЫЯВЛЕНИЯ УЧАСТКОВ ТРУБОПРОВОДОВ С ИЗГИБНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ ПРИ ПЕРЕСЕЧЕНИИ ИМИ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ЗОН

Аскаров Роберт Марагимович¹,

askarov1943@mail.ru

Китаев Сергей Владимирович¹,

svkitaev@mail.ru

Исламов Ильдар Магзумович²,

mildarislamov@mail.ru

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

² Ургалинское линейное производственное управление магистральных газопроводов,

Россия, 452570, Белокатайский р-н, с. Ургала, ул. Ленина, 93.

Актуальность. Внутри Земли происходят термоядерные реакции, вызывающие перемещение земной поверхности. В областях сдвига тектонических плит – геодинамических зонах – происходит изменение положения подземных магистральных трубопроводов. В свою очередь изменение положения магистрального трубопровода приводит к изменению его напряженно-деформированного состояния. После активации разломов начинается движение блоков. Вначале они движутся медленно, затем темп движения возрастает, при этом в зону риска попадают трубопроводы, находящиеся в условиях длительной эксплуатации, поэтому вопрос контроля напряженно-деформированного состояния трубопроводов на пересечениях с геодинамическими зонами является актуальным.

Цель: разработать и внедрить технологию выявления участков трубопроводов при их пересечении с геодинамическими зонами, предусматривающую определение потенциально опасных участков, оценку напряженно-деформированного состояния трубы.

Объекты: области прохождения магистральных трубопроводов по территории Республики Башкортостан на пересечениях с геодинамическими зонами.

Методы: анализ результатов внутритрубной дефектоскопии с измерением радиусов изгиба трубопроводов, выявление потенциально-опасных участков, аналитический расчет напряженно-деформированного состояния трубопроводов.

Результаты. Изложена технология выявления участков трубопроводов с изгибами напряжениями при их пересечении с геодинамическими зонами. Технология предусматривает определение фактического положения магистрального трубопровода, непосредственное измерение радиуса изгиба. Располагая данными по участкам трубопроводов с ненормативными радиусами изгиба 500D и менее из отчетов по внутритрубной дефектоскопии, предлагается выявлять потенциально опасные участки, а повторный пропуск внутритрубных дефектоскопов каждые 2–3 года позволит оценивать динамику изменения радиусов изгиба, а также выявлять активные геодинамические зоны.

Ключевые слова:

Магистральный трубопровод, геодинамическая зона, напряженно-деформированное состояние, потенциально-опасный участок, радиус изгиба.

Введение

Среди инженерных сооружений подземные трубопроводные системы наиболее тесно связаны с окружающей средой. Объективная реальность такова, что пролегание трубопроводов неизбежно связано с пересечением многочисленных геодинамических зон (ГДЗ) [1–4], к которым можно отнести: разломы разного характера, движения земных блоков, надвигов (горных ударов), карсты и т. п.

Геодинамический фактор в большей или меньшей степени имеет место на всей поверхности земного шара, в т. ч. и в Республике Башкортостан (РБ) [5].

В настоящее время установлено, что причиной самой масштабной аварии XX в. в трубопроводном транспорте в районе поселка Улу-Теляк РБ, унесшей сотни жизней, является геодинамический фактор [5].

Вследствие термоядерных реакций внутри планеты и кругового движения вокруг солнца проис-

ходят сдвиги земной поверхности [6–9]. На территории РБ были выявлены надвиги на протяжении 400 км, с образованием зон деформаций (рис. 1) [5].



Rис. 1. Схема движения надвигов по территории Республики Башкортостан (белой стрелкой указано направление действия сжимающей силы)

Fig. 1. Scheme of movement of thrusts on the territory of the Republic of Bashkortostan (white arrow indicates the direction of the compressive force action)

При надвигах образуются складки местности, которые вовлекают в движение подземные трубопроводы (выделены синим цветом, условно на поверхности земли), воздействуя на их напряженно-деформированное состояние с возникновением зон деформаций (рис. 2).

В зависимости от направления движения тектонических плит могут быть рассмотрены следующие случаи движения соседних блоков [5]:

- вверх с разными скоростями в одном направлении;
- вниз с разными скоростями в одном направлении;
- с одинаковыми скоростями: оба опускаются либо поднимаются;
- в противоположных направлениях.

Это означает, что на пересечениях с ГДЗ неизбежно ее воздействие на трубопровод. В приведенных в работе [10] теоретических исследованиях вертикальное движение блоков названо «активными тектоническими разломами» (АТР). Опасность АТР заключается в вероятных относительных смещениях грунтовой массы в области разлома, при этом происходит передача нагрузок, превышающих проектные, на трубопровод.



Рис. 2. Тектоническая схема надвигов с нанесенными зонами деформации на трубопроводах, основном по переходам через водотоки (белыми стрелками указано направление надвигов земных блоков)

Fig. 2. Tectonic scheme of overthrusts with deformed zones of deformation on pipelines, mainly on transitions through watercourses (white arrows indicate the direction of earth thrusts)

Для трубопроводов к основным «аварийным» участкам относятся разломы (границы блоков).

При переходе из пассивного состояния в активное происходит активация разломов. В начальный период времени движение блоков происходит медленно, и после достижения определенных сжимающих усилий движение блоков ускоряется. Поэтому в большей степени перемещениям подвержены МТ со значительными сроками эксплуатации, например 33 года и более. При этом особую важность приобретает оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) и прогноз технического состояния МТ, находящихся на пересечениях с ГДЗ. Нормативные документы по строительству и эксплуатации подземных МТ, которые определяют его НДС, основываются на теории неподвижной

земли [11, 12], т. е. не учитывают геодинамический фактор.

Таким образом, возникла необходимость создания технологии, позволяющей раскрыть объективную картину линейно-высотного положения линейной части МТ, выявлять потенциально опасные участки, в т. ч. на пересечениях с активными ГДЗ.

В настоящее время в трубопроводном транспорте основной концепцией поддержания надежности является эксплуатация МТ по техническому состоянию (ТС), при этом ТС определяется по данным диагностики. Основным средством диагностики МТ в настоящее время является внутритрубная дефектоскопия (ВТД). Если наделить ВТД возможностью выявления потенциально-опасных участков (ПОУ) на всем протяжении линейной части МТ, можно будет идентифицировать пересечения МТ с ГДЗ. Технология ВТД постоянно совершенствуется, например, за последние 5–8 лет была оснащена навигационной системой, которая непрерывно фиксирует линейно-высотные отметки пути, что позволяет строить план и профиль обследованного участка [13, 14]. Таким образом, появляется возможность отразить рельеф местности, так как вероятность возникновения ПОУ на ровном участке МТ минимальна.

Согласно [15], все ГДЗ, выявленные с помощью космических и обследованные наземными геолого-геофизическими технологиями, представляют собой: реки с долинами, овраги, балки и т. п. (отрицательный рельеф местности), которые и составляют узлы границ разломов. В качестве примера, на рис. 3 приводится профиль участка, построенный по данным ВТД, с двумя ГДЗ.

Потенциальную опасность для участка МТ представляют собой активные перемещающиеся ГДЗ. Даже внешне профиль этих ГДЗ (рис. 3) напоминает схематический профиль трубопровода на рис. 2 – клиновидные надвиги протяженностью около 5,0 км и 2,0 км.

В качестве расчетной схемы для оценки НДС МТ на пересечениях с ГДЗ приняты две тектонические плиты, смещающиеся в вертикальной плоскости одна относительно другой на значение δ (полубесконечные пространства). Смещающиеся плиты вовлекают в движение трубопровод, проложенный в этой зоне. Принято допущение, что происходит одновременное смещение на одну и ту же величину на значительном удалении от оси разлома концов анализируемого участка трубопровода. На рис. 4 проиллюстрирована схема перемещения трубопровода в вертикальной плоскости при тектоническом разломе.

Перемещающийся вместе с массой грунта трубопровод одновременно сопротивляется его сдвигу. Это приводит к появлению нагрузок в зоне их контакта за счет смещения трубопровода и грунта относительно друг друга. При этом радиус кривизны оси трубопровода увеличивается или уменьшается за счет возникновения нагрузок при изгибе в

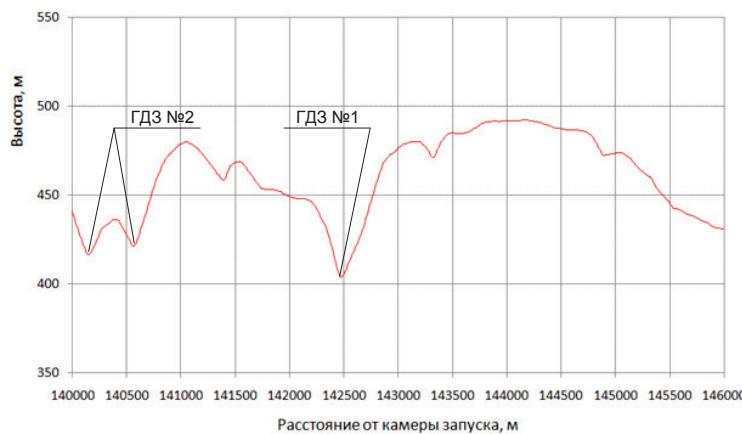


Рис. 3. Профиль участка магистрального трубопровода диаметром 1420 мм с двумя геодинамическими зонами № 1, 2

Fig. 3. Profile of the main pipeline section with a diameter 1420 mm with two geodynamic zones no. 1, 2

зоне движения [16]. На удалении от оси разлома происходит увеличение радиуса кривизны трубопровода, стремящейся к прямой линии, а изгибные напряжения приближаются к нулю.

$\sigma_{\text{пп}}^{\text{н}}$ – кольцевые напряжения, возникающие от давления газа внутри трубы, МПа; α – коэффициент линейного расширения; σ_i – напряжение упругого изгиба, МПа, рассчитывается по формуле:

$$\sigma_i = ED/2\rho, \quad (2)$$

ρ – радиус упругого изгиба участка трубопровода; E – модуль упругости для стали трубы, МПа; D – внутренний диаметр трубопровода, мм.

Анализ формулы (1) показывает, что первые две составляющие влияют главным образом на продольную силу, и только через нее – на продольные напряжения. Любое отклонение от прямолинейности приводит к изменению ρ , а значит отражается на величине продольных напряжений. Таким образом, непосредственное измерение радиуса упругого или упруго-пластического изгиба ρ , например, в процессе проведения ВТД, позволяет выявить ПОУ и получить первичную оценку их НДС по формуле (2). Такой метод, реализованный путем анализа деформации конструкции (в нашем случае трубопровода), можно считать прямым способом измерения НДС [18].

Данный метод обладает простотой, надежностью, достаточной точностью (от 4000 м) и позволяет контролировать весь трубопровод, а не только отдельные его части, доступные к наружному обследованию. Метод позволяет проводить диагностику НДС МТ без остановки транспортировки продукта и вскрытия трубопровода [18].

При проектировании линейной части магистральных трубопроводов участки прямолинейные и проложенные упругим изгибом, в соответствии с [15], не должны быть радиусом менее 1000D, т. е. если выявляется радиус изгиба менее 1000D, можно отнести его к непроектному.

На рис. 5 в качестве примера приводится график измеренных радиусов упругого изгиба прямолинейного участка МГ диаметром 1420 мм, с выделением радиусов упругого изгиба 1000D, полученный при плановой внутритрубной дефектоскопии. По оси абсцисс указано расстояние от камеры запуска, по оси ординат показан радиус кривизны трубопровода в диаметрах.

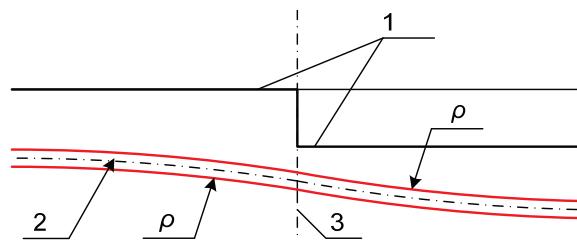


Рис. 4. Схема перемещения трубопровода в вертикальной плоскости при тектоническом разломе: 1 – поверхность земли; 2 – ось трубопровода; 3 – ось разлома

Fig. 4. Scheme of pipeline movement in the vertical plane under a tectonic fault: 1 is the earth surface; 2 is the pipeline axis; 3 is the fault axis

На переходных участках вследствие смещения осей образуется радиус упругого изгиба ρ (рис. 4). Примерно по оси разлома изгибные напряжения меняют знак, с выпуклого вверх на выпуклый вниз [17].

Таким образом, если появится возможность измерить радиус изгиба и его координаты, то можно с высокой степенью вероятности выявить ПОУ МТ и провести оценку его технического состояния на пересечениях с ГДЗ.

Методика выявления потенциально опасных участков магистральных трубопроводов и оценка их технического состояния

Максимальные суммарные продольные напряжения от нормативных нагрузок и воздействий, согласно [11], для упруго-изогнутых и прямолинейных участков для подземно проложенных трубопроводов, рассчитываются по формуле:

$$\sigma_{\text{пп}}^{\text{н}} = \mu \sigma_{\text{пп}}^{\text{н}} - \alpha \Delta t \pm \sigma_i, \quad (1)$$

где Δt – температурный перепад (расчетный) (принимается при нагревании положительным), °C; μ – коэффициент Пуассона (поперечной деформации);

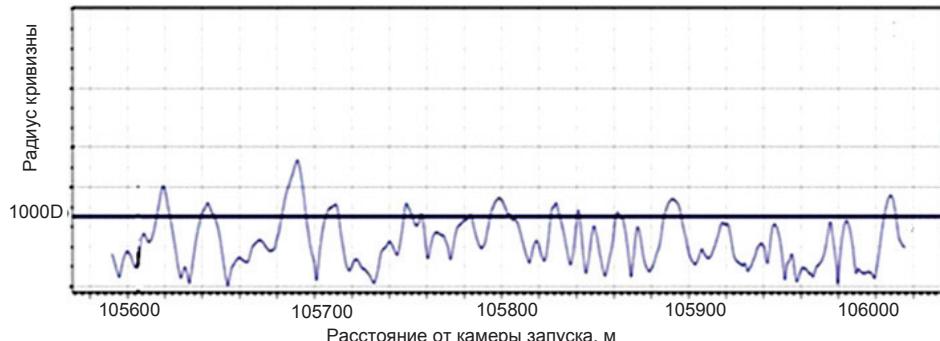


Рис. 5. График радиусов изгиба прямолинейного участка магистрального трубопровода

Fig. 5. Graph of bending radii of a straight section of the main pipeline

Из рис. 5 видно, что на прямолинейном участке МТ протяженностью 400 м со сроком эксплуатации около 35 лет имеется 11 участков с радиусом упругого изгиба менее 1000D, т. е. налицо фактическое несоответствие требованиям [15].

Оценивая требование 1000D [15], его, безусловно, можно считать обоснованным применительно к новому строительству, но по умолчанию оно переносится на весь срок эксплуатации МТ, главным образом потому, что механизма контроля этого параметра до последнего времени не существовало. В связи с появлением новой технологии выявления фактических радиусов упругого и упруго-пластического изгиба МТ это требование вступает в противоречие с его фактическим состоянием.

В [19] приводится научное обоснование критериев оценки опасности радиусов изгиба ρ :

- 500D и выше – область, где трубная сталь гарантированно сохраняет упругие свойства;
- 250D и менее, что при переводе в изгибные напряжения составляет около 400 МПа и более, в соответствии с [15] являются недопустимыми;
- (250–500) D – область, требующая аналитической оценки в каждом конкретном случае.

С 2015 г. эти положения отражены в отчетах ВТД НПЦ Внутритрубная диагностика (основная подрядная организация ПАО «Газпром» по внутритрубной диагностике), где на обследованном участке указываются все выявленные участки с радиусом изгиба 500D и менее. Информация содержит: линейную координату, порядковый номер трубы, минимальный радиус (м) (включая отводы холодного гнутья (ОХГ)), минимальный радиус изгиба в диаметрах, его направление в часовых координатах. В качестве примера на рис. 6 приводится график радиусов изгиба на пересечении с ГДЗ, по данным ВТД 2015 г. ГДЗ представляет собой овраг с координатами 78810 м [20]. В области пересечения оврага участок МТ выполнен из двух отводов холодного гнутья (ОХГ).

Из рис. 6 видно, что на участке протяженностью 470 м (78580...79050) имеются 3 участка с радиусами изгиба менее 500D с координатами 78706,8,4; 78775,4 и 78919,8 м.

Плановые обследования средствами ВТД каждые 2–3 года позволяют оценить динамику изменения радиусов изгиба. В таблице приводятся сравнительные данные ВТД за 2015 и 2017 гг. Па-

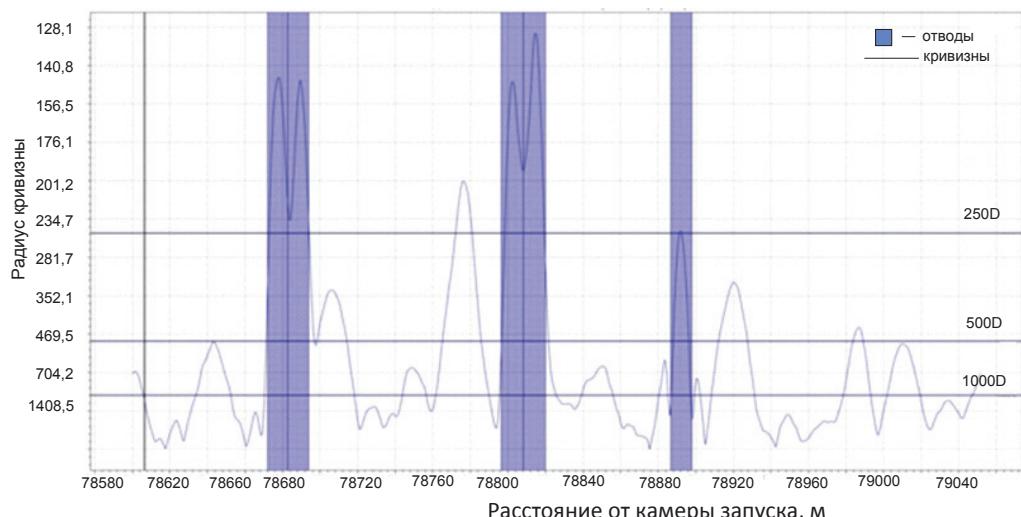


Рис. 6. График радиусов изгиба участка магистрального трубопровода на пересечении с геодинамическими зонами

Fig. 6. Graph of bend radii of the trunk pipeline section at the intersection with geodynamic zones

раметры транспорта газа при пропуске снарядов ВТД: давление 6,6 МПа, температура газа 15,5° и 12°.

Таблица. Сравнительные данные по результатам внутритрубной дефектоскопии за 2015 и 2017 гг.

Table. Comparative data on in-pipe flaw detection results for 2015 and 2017

| Номер трубы Pipe number | Радиусы изгиба, в диаметрах Radii of bending, in diameters | | Линейная координата, м Linear coordinate, m | | Часовая координата, часов Hourly coordinates, hours | |
|----------------------------|---|------|--|---------|--|------|
| | 2015 | 2017 | 2015 | 2017 | 2015 | 2017 |
| 7125 | 286D | 331D | 78706,8 | 78706,2 | 6,0 | 6,2 |
| 7133 | 238D | 216D | 78775,4 | 78775,0 | 6,2 | 6,5 |
| 7144 | 369D | 382D | 78919,8 | 78921,5 | 0,2 | 11,9 |

На рис. 7 приводится укрупненный график радиусов изгиба МГ на пересечениях с ГДЗ № 16а, где отражены радиусы изгибов менее 500D (укрупненный в данном случае означает без учета радиусов на участках, где они менее 500D).

В верхней части эпюры указаны участки с выпуклостью вверх с 9 до 3 часов, в нижней – выпуклостью вниз с 3 до 9 часов.

Из данных двух пропусков ВТД (2015 и 2017 гг.), приведенных в таблице и на рис. 7, следует, что за два года [21]:

- линейные и часовые координаты непроектных радиусов изгиба практически не изменились (в пределах погрешности), что свидетельствует о совместности результатов;
- понижение температуры между пропусками снаряда ВТД на 3,5°, в соответствии с формулой (1), могло вызвать увеличение растягивающей силы, а значит увеличить радиус непроектного изгиба, т. е. снизить изгибные напряжения;
- заметно изменение именно радиуса изгиба, на трубе № 7133 (в центре оврага) радиус изгиба

уменьшился с 238D до 216D (10 %), на двух других участках радиус изгиба увеличился: № 7125 с 286D до 331D (16 %), № 7144 с 369D до 382D (3 %).

Изгибные напряжения, рассчитанные по формуле (2), в районе трубы № 7133, и без этого ненормативные, выросли с 444 до 486 МПа, это означает – участок подлежит ремонту.

Можно утверждать, что рассмотренное ГДЗ активное, именно активность ГДЗ, выраженная или в опускании средней части (дно оврага), или в подъеме с двух сторон бортов оврага отразилась на радиусах изгиба. В свою очередь появляется возможность выявления собственно активных ГДЗ, пересекающих МТ.

Изменения радиусов изгиба показывают, что трубопровод перемещается за окружающим его грунтом и это отражается в точках изгиба (перегиба), которые и представлены в виде радиусов изгиба. К ПОУ могут быть отнесены участки с тенденцией уменьшения зафиксированных радиусов изгиба, когда они находятся на границе, например 250D.

Заключение

- Вследствие термоядерных реакций внутри планеты и вращательного движения планеты вокруг солнца происходят движения земной поверхности (геодинамические зоны), которые вовлекают в него подземные магистральные трубопроводы. В свою очередь изменение положения МТ приводит к изменению его напряженно-деформированного состояния.
- Таким образом, возникла необходимость создания технологии, позволяющей выявлять фактическое положение МТ, а значит и потенциально опасные участки на пересечениях с ГДЗ.

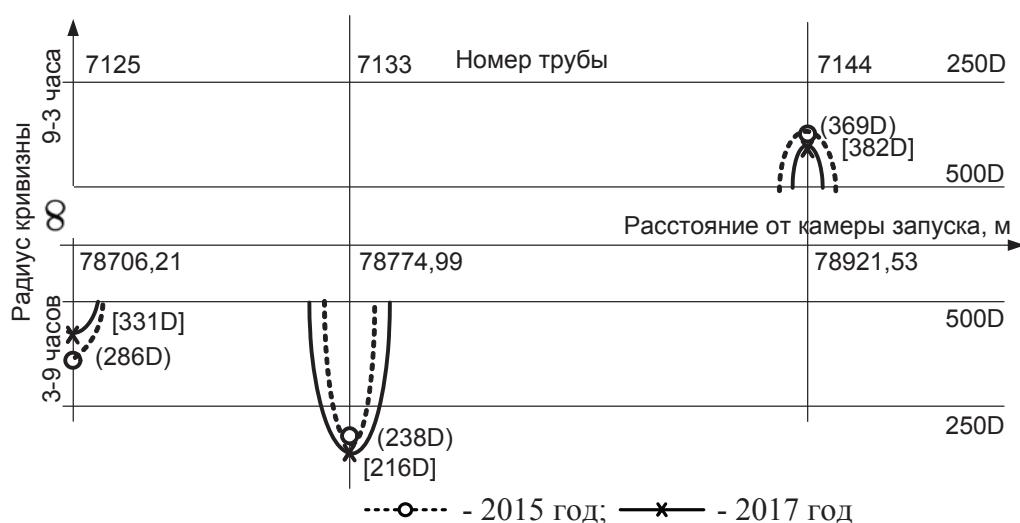


Рис. 7. Эпюра радиусов изгиба геодинамических зон

Fig. 7. Diagram of bending radii of geodynamic zones

3. Разработка и внедрение технологии измерения радиусов изгиба МТ плановыми средствами ВТД, заключающейся в непосредственном измерении радиуса изгиба, позволяет выявить потенциально опасные участки и получить первичную оценку их НДС.
4. Обследования МТ по этой технологии показало, что требования нормативов по минимально допустимому радиусу изгиба 1000D и более после

эксплуатации за рамками амортизационного срока преимущественно не выполняются.

5. В отчетах ВТД указываются все участки ЛЧ МГ с ненормативными радиусами изгиба 500D и менее, что позволяет выявлять потенциально опасные участки. По результатам пропуска снарядов ВТД с периодичностью раз в 2–3 года производится оценка динамики изменения радиусов изгиба, при этом выявляются активные ГДЗ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Late Cenozoic magmatic inflation, crustal thickening, and >2 km of surface uplift in central Tibet / J.L. Chen, A. Yin, J.F. Xu, Y.H. Dong, Z.Q. Kang // Geology. – 2018. – V. 46. – P. 19–22.
2. Hapgood P.J., Zuza A.V., Yin A. West-directed thrusting south of the eastern Himalayan syntaxis indicates clockwise crustal flow at the indenter corner during the India-Asia collision // Tectonophysics. – 2018. – V. 722. – P. 277–285.
3. 3D geodynamic models for the development of opposing continental subduction zones: The Hindu Kush-Pamir example / J. Liao, T. Gerya, M. Thielmann, A.A.G. Webb, S.-K. Kufner, A. Yin // Earth and Planetary Science Letters. – 2017. – V. 480. – P. 133–146.
4. Late Paleozoic and Mesozoic evolution of the Lhasa Terrane in the Xainza area of southern Tibet / S.Y. Fan, L. Ding, M.A. Murphy, M. Yao, A. Yin // Tectonophysics. – 2017. – V. 721. – P. 415–434.
5. Давлетов М.И. Исходные параметры для расшифровки геологических факторов аварий трубопроводов на территории Башкортостана // Энергоэффективность. Проблемы и решения: V Российской энергетический форум. – Уфа, 2005. – С. 232–237.
6. Duan B., Liu L., Yin A. Seismic shaking in the North China Basin expected from ruptures of a possible seismic gap // Geophysical Research Letters. – 2017. – V. 44. – P. 4855–4862.
7. The Himalaya in 3D: Slab dynamics controlled mountain building and monsoon intensification / A.A.G. Webb, H.C. Guo, P.D. Clift, L. Husson, T. Müller, D. Costantino, A. Yin, Z.Q. Xu, H. Cao, Q. Wang // Lithosphere. – 2017. – V. 9. – P. L636–1.
8. Spacing and strength of active continental strike-slip faults / A.V. Zuza, A. Yin, J. Lin, M. Sun // Earth and Planetary Science Letters. – 2017. – V. 457. – P. 49–62.
9. Pre-Cenozoic geologic history of the central and northern Tibetan Plateau and the role of Wilson cycles in constructing the Tethyan orogenic system / C. Wu, A. Yin, J.Y. Zhang, W.C. Liu, L. Ding // Lithosphere. – 2016. – V. 8. – P. 254–292.
10. Фигаров Э.Н. Оценка напряженного состояния подземного трубопровода, пересекающего зоны активных тектонических разломов // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2012. – № 6. – С. 39–42.
11. СП 36.13330.2012 Магистральные трубопроводы (Актуализированная редакция СНиП II.05.06–85* с изменениями и дополнениями). URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200103173> (дата обращения: 13.05.2018).
12. СП 86.13330.2012. Магистральные трубопроводы (Актуализированная редакция СНиП III-42-80*). URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200102566> (дата обращения: 13.05.2018).
13. Successful management of the pipeline cracking threat using an ultrasonic in-line inspection tool – a case study / B. Delanty, I. Whitbread, M. Maxwell, J. Munro // Pipelines international. – 2015. – № 9. – P. 44–48.
14. Pipeline Operators Forum. Specifications and requirements for intelligent pig inspection of pipelines. Version 2016. – 2016. – 56 p. URL: file:///D:/User/%D0%97%D0%80%D0%B3%D1%80%D1%83%D0%B7%D0%BA%D0%B8/public-documents_01_2016_Version.pdf (дата обращения 20.05.2019).
15. Аскаров Р.М., Мазитов Д.Г., Рафиков С.К. Прогноз напряженно-деформированного состояния участков газопроводов, пересекающих геодинамические зоны // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2015. – № 1. – С. 121–126.
16. Айнбinder А.Б. Расчет магистральных и промысловых трубопроводов на прочность и устойчивость. Справочное пособие. – М.: Недра, 1991. – 287 с.
17. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по со противлению материалов. – Киев: Изд-во «Наукова думка», 1988. – 736 с.
18. Способ определения потенциально опасного участка трубопровода с непроектным уровнем напряженно-деформированного состояния: заявка на изобретение № 2602327 РФ; заявл. 04.04.2015; опубл. 20.11.2016; Бюл. № 32. – 10 с.
19. О фактических радиусах изгиба линейной части магистральных газопроводов / Р.М. Аскаров, К.М. Гумеров, А.Н. Кукушкин, И.М. Исламов // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2017. – № 6. – С. 28–33.
20. Выявление потенциально опасных участков магистральных газопроводов на пересечениях с геодинамическими зонами / Б.Н. Мастобаев, Р.М. Аскаров, С.В. Китаев, С.К. Рафиков, Р.Р. Усманов, М.В. Чучкалова, И.М. Исламов // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2017. – № 3. – С. 38–43.
21. Напряженно-деформированное состояние газопровода на пересечениях с геодинамическими зонами по данным неоднократной внутритрубной дефектоскопии / Б.Н. Мастобаев, Р.М. Аскаров, С.В. Китаев, Р.М. Каримов, А.Р. Валеев, Т.А. Хакимов, И.М. Исламов // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2017. – № 6. – С. 50–57.

Поступила 27.05.2018 г.

Информация об авторах

Аскаров Р.М., доктор технических наук, доцент кафедры транспорта и хранения нефти и газа Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Китаев С.В., доктор технических наук, профессор кафедры транспорта и хранения нефти и газа Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Исламов И.М., начальник Ургалинского линейного производственного управления магистральных газопроводов.

UDC 622.691

ON TECHNOLOGY OF DETECTING PIPELINE SITES WITH BENDING VOLTAGES IN THEIR CROSSING GEODYNAMIC ZONES

Robert M. Askarov¹,

askarov1943@mail.ru

Sergey V. Kitaev¹,

svkitaev@mail.ru

Ildar M. Islamov²,

mildarislamov@mail.ru

¹ Ufa State Petroleum Technological University,
1, Kosmonavtov street, Ufa, 450064, Russia.

² Urgala linear production office of main gas pipelines,
93, Lenin street, Urgala, 452570, Russia.

The relevance. There are thermonuclear reactions inside the Earth. This causes displacement of the earth's surface. In the areas of shear tectonic plates – geodynamic zones – there is a change in position of underground pipelines. Changing the position of the main pipeline leads in its turn to a change in its stress-strain state. After activation of the faults, the blocks start moving. At first they move slowly, then the rate of movement increases, the pipelines that are under long-term operation get into the risk zone, so the control of the stress-strain state of the pipelines at the intersections with the geodynamic zones is relevant.

The main aim of the research is to develop and implement a technology for identifying sections of pipelines at their intersection with geodynamic zones, providing for identification of potentially hazardous areas to assess the stress-strain state of the pipe.

The objects: areas of passage of the main pipelines on the territory of the Republic of Bashkortostan at the intersections with geodynamic zones.

Methods: analysis of the results of in-line inspection with measurement of bending radii of pipelines, identification of potentially dangerous areas, analytical calculation of the stress-strain state of pipelines.

Results. The paper introduces the technology of revealing sections of pipelines with flexural stresses at their intersection with geodynamic zones. The technology involves determination of actual position of the main pipeline, direct measurement of the bend radius. Having the data on the sections of pipelines with non-normative bending radii of 500D and less the authors have proposed to identify potentially hazardous areas from the reports on in-line flaw detection in the work; re-skip of in-tube flaw detectors, every 2–3 years will allow estimating the dynamics of the change in bend radii, and identifying as well active geodynamic zone.

Key words:

Main pipeline, geodynamic zone, stress-strain state, potentially dangerous area, bending radius.

REFERENCES

- Chen J.L., Yin A., Xu J.F., Dong Y.H., Kang Z.Q. Late Cenozoic magmatic inflation, crustal thickening, and >2 km of surface uplift in central Tibet. *Geology*, 2018, vol. 46, pp. 19–22.
- Hapgood P.J., Zuza A.V., Yin A. West-directed thrusting south of the eastern Himalayan syntaxis indicates clockwise crustal flow at the indenter corner during the India-Asia collision. *Tectonophysics*, 2018, vol. 722, pp. 277–285.
- Liao J., Gerya T., Thielmann M., Webb A.A.G., Kufner S.-K., Yin A. 3D geodynamic models for the development of opposing continental subduction zones: The Hindu Kush–Pamir example. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, vol. 480, pp. 133–146.
- Fan S.Y., Ding L., Murphy M.A., Yao M., Yin A. Late Paleozoic and Mesozoic evolution of the Lhasa Terrane in the Xainza area of southern Tibet. *Tectonophysics*, 2017, vol. 721, pp. 415–434.
- Davletov M.I. Iskhodnye parametry dlya rasshifrovki geologicheskikh faktorov avary truboprovodov na territorii Bashkortostana [Initial parameters for decoding geological factors of pipeline accidents in the territory of Bashkortostan]. *Energoeffektivnost. Problem i resheniya. V Rossiysky energetichesky forum [V Russian Energy Forum. Energy efficiency. Problems and solutions]*. Ufa, 2005, pp. 232–237.
- Duan B., Liu L., Yin A. Seismic shaking in the North China Basin expected from ruptures of a possible seismic gap. *Geophysical Research Letters*, 2017, vol. 44, pp. 4855–4862.
- Webb A.A.G., Guo H.C., Clift P.D., Husson L., Müller T., Costantino D., Yin A., Xu Z.Q., Cao H., Wang Q. The Himalaya in 3D: Slab dynamics controlled mountain building and monsoon intensification. *Lithosphere*, 2017, vol. 9, pp. L636–1.
- Zuza A.V., Yin A., Lin J., Sun M. Spacing and strength of active continental strike-slip faults. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, vol. 457, pp. 49–62.
- Wu C., Yin A., Zhang J.Y., Liu W.C., Ding L. Pre-Cenozoic geologic history of the central and northern Tibetan Plateau and the role of Wilson cycles in constructing the Tethyan orogenic system. *Lithosphere*, 2016, vol. 8, pp. 254–292.
- Figarov E.N. Assessment of the stressed state of an underground pipeline crossing zones of active tectonic faults. *Pipeline transport: theory and practice*, 2012, no. 6, pp. 39–42. In Rus.
- SP 36.13330.2012 Magistralnye truboprovody (Aktualizirovannaya redaktsiya SNI 2.05.06–85* s izmeneniyami i dopolneniyami) [Trunk pipelines (updated version of SNI 2.05.06–85 * as amended)]. Available at: <http://docs.ctnd.ru/document/1200103173> (assessed: 13 May 2018).
- SP 86.13330.2012 Magistralnye truboprovody (Aktualizirovannaya redaktsiya SNI III-42–80*) [Trunk pipelines (Updated version of SNI III-42–80 *)]. Available at: <http://docs.ctnd.ru/document/1200102566> (assessed: 13 May 2018).
- Delanty B., Whitbread I., Maxwell M., Munro J. Successful management of the pipeline cracking threat using an ultrasonic in-li-

- ne inspection tool – a case study. *Pipelines international*, 2015, no. 9, pp. 44–48.
14. *Pipeline Operators Forum. Specifications and requirements for intelligent pig inspection of pipelines*. Version 2016. 2016. 56 p. Available at: file:///D:/User/%D0%97%D0%9B%D0%B3%D1%80%D1%83%D0%B7%D0%BA%D0%B8/public-documents_01_2016_Version.pdf (accessed 20 May 2019).
 15. Askarov R.M., Mazitov D.G., Rafikov S.K. Forecast of the stress-strain state of sections of gas pipelines crossing geodynamic zones. *Problems of collecting, preparing and transporting oil and oil products*, 2015, no. 1, pp. 121–126. In Rus.
 16. Aynbinder A.B. *Raschet magistralnykh i promyslovykh truboprovodov na prochnost i ustoychivost. Spravochnoe posobie* [Calculation of main and field pipelines for strength and stability. Reference Manual]. Moscow, Nedra Publ., 1991. 287 p.
 17. Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveev V.V. *Spravochnik po so-protivleniyu materialov* [Handbook of material resistance]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1988. 736 p.
 18. Usmanov R.R., Chuchkalov M.V., Askarov R.M., Zakiryannov R.V. *Sposob opredeleniya potentsialno opasnogo uchastika truboprovoda s neprektnym urovnem napryazhenno-deformiro-*
 - vannogo sostoyaniya
 - [A method for determining a potentially dangerous pipeline section with a non-design level of stress-strain state]. Patent RF no. 2602327, 2016.
 19. Askarov R.M., Gumerov K.M., Kukushkin A.N., Islamov I.M. On the actual radii of the bending of the linear part of the main gas pipelines. *Pipeline transport: theory and practice*, 2017, no. 6, pp. 28–33. In Rus.
 20. Mastobaev B.N., Askarov R.M., Kitaev S.V., Rafikov S.K., Usmanov R.R., Chuchkalov M.V., Islamov I.M. Identification of potentially hazardous sections of main gas pipelines at intersections with geodynamic zones. *Pipeline transport: theory and practice*, 2017, no. 3, pp. 38–43. In Rus.
 21. Mastobaev B.N., Askarov R.M., Kitaev S.V., Karimov R.M., Valiev A.R., Xakimov T.A., Islamov I.M. The stress-strain state of the gas pipeline at the intersections with geodynamic zones from the data of repeated in-line inspection. *Transportation and storage of petroleum products and hydrocarbons*, 2017, no. 6, pp. 50–57. In Rus.

Received: 27 May 2018.

Information about the authors

Robert M. Askarov, Dr. Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technological University.

Sergei V. Kitaev, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University.

Ildar M. Islamov, the head of the Urgala linear production office of main gas pipelines.

УДК 550.4.08

СРАВНЕНИЕ ИСП-МС АНАЛИЗА ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ В ВАРИАНТЕ РАСТВОРОВ И ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ СТЕКОЛ

Николаева Ирина Викторовна¹,
inikol@igm.nsc.ru

Палесский Станислав Владиславович¹,
stas@igm.nsc.ru

Карпов Александр Викторович¹,
theblake@mail.ru

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
Россия, г. Новосибирск, 630090, пр. Академика Коптюга, 3.

Актуальность исследования связана с необходимостью опробования нового эффективного способа пробоподготовки геологических образцов, подходящего для массового многоэлементного ИСП-МС анализа, снижающего общие временные затраты и обеспечивающего возможность определения широкого набора элементов в рамках одного измерительного цикла с применением лазерной абляции (ЛА-ИСП-МС).

Цель исследования состоит в сравнении метрологических характеристик двух методик ИСП-МС анализа, основанных на разных способах пробоподготовки силикатных пород – переведении твердого образца в раствор после сплавления с метаборатом лития и использовании готовых боратных стекол для ЛА-ИСП-МС анализа.

Объекты: международные и отечественные стандартные образцы состава естественных горных пород: базальты – BHVO-1, BHVO-2, BCR-2, граниты – СГ-1а, СГ-3, габбро СГД-1а, тролл СТ-1а.

Методы: масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС), лазерная абляция с масс-спектрометрическим окончанием (ЛА-ИСП-МС).

Результаты исследования показали, что разработанные методики многоэлементного ИСП-МС и ЛА-ИСП-МС анализа позволяют определять широкий набор элементов в геологических образцах в рамках одного измерительного цикла в высоком, среднем и низком разрешении при использовании для внешней градуировки стандартных образцов с аналогичной матрицей и внутреннего стандарта для учета и снижения матричного влияния и дрейфа приборных параметров. Правильность определения всех элементов в соответствии с разработанными методиками доказана сравнением результатов анализа шести стандартных геологических образцов с принятыми значениями. ЛА-ИСП-МС отличается экспрессностью за счет отсутствия стадии пробоподготовки, при этом пределы обнаружения и погрешность определения для ЛА-ИСП-МС методики выше, чем при ИСП-МС анализе растворов.

Ключевые слова:

Масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС), лазерная абляция (ЛА), пробоподготовка, стандартные геологические образцы, основные и примесные элементы, редкоземельные элементы.

Введение

Одной из важнейших аналитических задач в области наук о Земле является определение состава пород и минералов. Всестороннее описание элементного состава геологических пород и минералов до недавнего времени требовало применения в комплексе нескольких аналитических методов, т. к. ни один метод не позволяет одновременно определять весь набор элементов, интересующих геохимиков и геологов, или из-за недостаточно низких пределов обнаружения, или из-за ограничения по набору элементов.

Внедрение в аналитическую практику современного метода – масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) – существенно расширяет возможности элементного анализа за счет одновременного определения практически всех химических элементов с низкими пределами обнаружения в рамках одного измерения с широким линейным диапазоном определяемых концентраций. Использование различных устройств для получения аэрозоля пробы позволяет анализировать как растворы, так и твердые образцы [1–5].

Основным требованием ИСП-МС анализа в варианте растворов является полный перевод определяемых элементов в раствор, обеспечение устойчивости растворов и снижение содержания матричных элементов. Именно стадия химической пробоподготовки, определяющая правильность всего анализа в целом, является самой сложной и продолжительной, особенно для трудновскрываемых геологических образцов, поэтому остаётся актуальным поиск альтернативных способов подготовки образцов к анализу.

Использование специальной лазерной установки для проведения лазерной абляции (ЛА) в сочетании с ИСП масс-спектрометром позволяет выполнять анализ твердых образцов (ЛА-ИСП-МС) без длительной стадии переведения определяемых элементов в раствор. Обычно ЛА-ИСП-МС используют для локального анализа мономинеральных фракций [6–8], однако существуют различные подходы, которые позволяют определять валовый элементный состав пород [9–18]. Наиболее простым и эффективным способом подготовки твердых образцов для ЛА-ИСП-МС представляется ис-

пользование стекол, уже приготовленных для рентгено-флуоресцентного анализа (РФА) сплавлением навески измельчённого образца с мета- или тетраборатом лития в разных соотношениях. Эта процедура позволяет полностью переводить исследуемую породу в боратное стекло, при этом достигается вскрытие аксессорных минералов и гомогенизация образца. Разбавление образца в 2–10 раз мета- или тетраборатом лития уменьшает взаимное влияние элементов при ИСП-МС измерениях. В качестве минусов такого способа подготовки проб можно отметить загрязнение образца материалом флюса и тигля, повышение пределов обнаружения за счет разбавления [9–14].

В сравнении с ИСП-МС анализом в варианте растворов такой способ подготовки образцов снимает проблемы нестабильности растворов и существенно увеличивает скорость ИСП-МС анализа, а в сочетании с РФА обеспечивает расширение набора определяемых элементов из одной навески без дополнительных стадий химической подготовки. Однако при ЛА-ИСП-МС анализе твёрдых образцов наблюдается фракционирование элементов, возникающее при генерации аэрозоля, его транспортировке, атомизации и ионизации в плазме [5, 10, 14, 19]. В связи с этим для получения достоверных результатов при ЛА-ИСП-МС анализе необходимо использовать градуировочные стандарты с идентичной матрицей, а также проводить нормализацию каждого значения с помощью внутреннего стандарта – элемента, входящего в состав анализируемого образца и определенного независимым методом. Это необходимо для коррекции возможной разницы в образовании и транспортировке аэрозоля анализируемого и градуировочного образца в зависимости от характеристик самих образцов и параметров лазерного излучения [5, 10, 14, 19].

Целью настоящей работы является изучение возможностей ЛА-ИСП-МС анализа стекол, приготовленных для РФА, с определением максимального количества элементов в рамках одного измерительного цикла и сравнение метрологических характеристик этой методики с ИСП-МС анализом растворов.

Экспериментальная часть. Объекты анализа

В настоящей работе в качестве объектов анализа были использованы международные стандартные геологические образцы: базальты – BHVO-1, BHVO-2, BCR-2, и отечественные стандартные образцы состава естественных горных пород: граниты – СГ-1а, СГ-3, габбро СГД-1а, трапп СТ-1а. Анализируемые образцы характеризуются разным уровнем содержания определяемых элементов и аттестованы с различной точностью. Для некоторых элементов в литературе указаны рекомендованные значения без погрешности ввиду недостаточного количества аналитических данных. Поэтому далее в тексте для общего обозначения аттестованных и рекомендованных значений используется термин «принятые значения».

Для перевода в раствор твердых образцов использовали методику сплавления с метаборатом лития с последующим растворением плава в 5 % азотной кислоте со следовыми количествами фтористоводородной кислоты [20].

Для ЛА-ИСП-МС анализа мы использовали уже готовые стёкла. Они были приготовлены в лаборатории рентгеноспектральных методов анализа Института геологии и минералогии СО РАН по следующей методике. Анализируемую пробу сушили при 105 °С в течение 1 часа, затем прокаливали при 1000 °С в течение 2,5 часов, после чего смешивали с флюсом (66,67 % тетрабората лития; 32,83 % метабората лития и 0,5 % лития бромистого) в соотношении 1:9 (общий вес смеси составляет 5 г). Смесь плавили в платиновых тиглях в индукционной печи Lifumat-2,0-Ox (Linn High Therm GmbH). В качестве контрольного опыта использовали боратное стекло, плавленое без образца [21].

ИСП-МС измерения

Все измерения выполнены на ИСП масс-спектрометре высокого разрешения ELEMENT фирмы Finnigan Mat (Германия) в аналитическом центре Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Перед измерениями проводили настройку прибора и оптимизацию инструментальных параметров для получения максимально интенсивного и хорошо воспроизводимого сигнала при низком фоновом уровне шума и сигналов двухзарядных и оксидных ионов [20]. Сканирование проводили в интервале 23–238 атомных единиц массы в режиме «peak jumping» и, в зависимости от определяемого элемента, в низком ($M/\Delta M=300$), среднем (4000) или высоком (8000) разрешении. Каждый массовый диапазон сканировали 40 раз. Детектирование велось в аналоговом и цифровом режиме (analog+counting).

При анализе сплавленных стёкол использовали установку для ЛА – UP-213 фирмы New Wave Research с ультрафиолетовым лазером Nd:YAG (длина волны 213 нм). В качестве газа-носителя был выбран Не, поскольку он обеспечивает более высокую эффективность транспортировки аэрозоля в плазму и меньшее фракционирование элементов в сравнении с Ar [8, 10]. Перед каждым измерением ячейку абляции продували потоком Не, чтобы избежать попадания воздуха в плазму. Перед введением в плазму Не (скорость потока 0,2 мл/мин) смешивали с Ar в соотношении 1:4. Для проведения абляции диаметр пучка лазера был выбран 80 мкм, плотность мощности лазерного излучения $2 \cdot 10^8$ Вт/см², частота импульсов 20 Гц, продолжительность импульса 5 нс.

Определяемые элементы и изотопы, градуировка

Набор определяемых элементов для растворов и сплавленных стекол составил 43 элемента, включая как основные элементы, так и примес-

ные: Al, Ba, Ca, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Dy, Eu, Er, Fe, Ga, Gd, Hf, Ho, K, La, Lu, Mg, Mn, Na, Nb, Nd, Ni, P, Pr, Rb, Sc, Si, Sm, Sr, Ta, Tb, Th, Ti, Tm, U, V, Y, Yb, Zn, Zr.

В качестве анализаторов были выбраны наиболее распространенные изотопы, свободные от изобарных наложений. При наличии нескольких изотопов определение вели по 2–3 изотопам для учета возможных наложений, как и при анализе растворов [20, 22]. Изотоп ^{39}K определяли в высоком разрешении из-за существенных наложений $^{38}\text{Ar}^{\text{H}^+}$. Изотопы Sc, Si, P, Ca, Ti, Cr и Fe определяли только в среднем разрешении также из-за существенных наложений, которые состоят в основном из макрокомпонентов плазмы – аргона, кислорода, водорода, азота и основных компонентов пробы. Изотопы Na, Mg, Al, V, Mn, Ni, Cu, и Zn определяли как в среднем, так и в низком разрешении, поскольку наложения на них могут быть несущественными. Остальные элементы от Rb до U определяли только в низком разрешении, в этой области масс спектральные помехи от оксидных и двухзарядных ионов примесных элементов для изученных образцов незначительны, за исключением наложения оксидов бария на изотопы европия [20, 22].

При расчете концентраций использовали усредненные значения, полученные по разным изотопам и в разном разрешении, при отсутствии существенных различий. Расчет концентраций при анализе растворов выполняли по внешней градуировке с внутренним стандартом, в качестве которого выбран In с концентрацией в растворе 1 мкг/л. Для внешней градуировки, как и в работах [20, 22], использовали стандартный образец BHVO-1, наиболее полно и точно аттестованный.

При анализе сплавленных стекол при помощи ЛА-ИСП-МС использовали внешнюю градуировку по стандартному образцу – BHVO-2, приготовленному по той же методике, что и все анализируемые образцы. В качестве внутреннего стандарта использовали аттестованные значения концентрации Fe.

Результаты и обсуждение. Пределы обнаружения определяемых элементов с использованием ИСП-МС и ЛА-ИСП-МС методик

В табл. 1 представлены достигнутые пределы обнаружения ИСП-МС и ЛА-ИСП-МС методик в пересчёте на твердый образец, с учетом навески и разбавления, рассчитанные по 3σ вариации контрольного опыта, который включал в себя все стадии пробоподготовки, что и анализируемые образцы.

Различие пределов обнаружения для определяемых элементов связано с разницей в чувствительности, которая растет с увеличением атомной массы иона, а также с уровнем контрольного опыта и используемым разрешением (при переходе от низкого разрешения к среднему чувствительность уменьшается примерно на порядок, а при переходе от среднего к высокому – в 3–5 раз). Пределы обна-

ружения для элементов, концентрации которых в геологических образцах велики (Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Fe), дополнительно увеличиваются за счёт «эффекта памяти», возникшего в результате многолетних анализов геологических образцов.

Таблица 1. Пределы обнаружения (C_{\min}), мкг/г

Table 1. Detection limits (C_{\min}), ppm

| Элемент Element | C_{\min} (ICP-MS) | C_{\min} (LA-ICP-MS) | Элемент Element | C_{\min} (ICP-MS) | C_{\min} (LA-ICP-MS) | Элемент Element | C_{\min} (ICP-MS) | C_{\min} (LA-ICP-MS) |
|--------------------|------------------------|---------------------------|--------------------|------------------------|---------------------------|--------------------|------------------------|---------------------------|
| Na | 200 | 200 | Cu | 5 | 25 | Eu | 0,003 | 0,02 |
| Mg | 50 | 100 | Zn | 5 | 12 | Gd | 0,02 | 0,06 |
| Al | 30 | 260 | Ga | 1 | 1 | Tb | 0,01 | 0,03 |
| Si | 400 | 3800 | Rb | 0,5 | 1 | Dy | 0,01 | 0,03 |
| P | 4 | 400 | Sr | 3 | 2 | Ho | 0,003 | 0,02 |
| K | 80 | 100 | Y | 0,1 | 0,1 | Er | 0,02 | 0,15 |
| Ca | 100 | 300 | Zr | 0,22 | 2 | Tm | 0,01 | 0,01 |
| Sc | 0,1 | 0,05 | Nb | 0,09 | 0,09 | Yb | 0,02 | 0,01 |
| Ti | 10 | 10 | Cs | 0,1 | 0,5 | Lu | 0,003 | 0,01 |
| V | 0,3 | 1 | Ba | 5,5 | 3 | Hf | 0,09 | 0,02 |
| Cr | 3 | 4 | La | 0,06 | 0,08 | Ta | 0,15 | 0,02 |
| Mn | 2 | 1 | Ce | 0,06 | 0,1 | Th | 0,03 | 0,03 |
| Fe | 20 | 50 | Pr | 0,03 | 0,03 | U | 0,02 | 0,02 |
| Co | 0,1 | 0,1 | Nd | 0,03 | 0,09 | | | |
| Ni | 3 | 3 | Sm | 0,01 | 0,02 | | | |

Более высокие пределы обнаружения ЛА-ИСП-МС методики для таких элементов, как Al, Si, Cu и в особенности P, связаны с их высоким содержанием в контрольном опыте. Для большинства остальных элементов пределы обнаружения обеих методик сравнимы.

Результаты ИСП-МС и ЛА-ИСП-МС анализа стандартных образцов

В табл. 2–4 приведены результаты определения элементов в стандартных геологических образцах в варианте растворов (ИСП-МС) и при лазерной абляции стекол (ЛА-ИСП-МС) в сравнении с принятыми значениями [23–25]. При использовании ИСП-МС методики по большинству элементов наблюдается удовлетворительное согласие, как для основных элементов, так и для примесных. Погрешность анализа не превышает 10 %, если уровень содержания не приближается к пределу обнаружения.

Для ЛА-ИСП-МС анализа относительное стандартное отклонение результатов больше, чем при анализе растворов, и составляет в среднем около 20 %. Необходимо отметить, что содержание Cs в BHVO-2 находится на пределе обнаружения ЛА-ИСП-МС (табл. 1), в связи с этим количественные результаты по Cs в анализируемых образцах невозможно получить при использовании для анализа данного градуировочного стандарта. Наибольшие отклонения от принятых значений отмечаются для элементов, содержание которых близки к пределам обнаружения, например, Mg, V, Ni, Ba в СГ-1а (табл. 3). Содержание P в СГ-1а и СГ-3

Таблица 2. Результаты ИСП-МС и ЛА-ИСП-МС определения концентраций элементов в стандартных образцах BHVO-2 и BCR-2. Концентрации основных элементов приведены в массовых %, примесных элементов – в мкг/г

Table 2. Results of ICP-MS and LA-ICP-MS analyses of reference materials BHVO-2 and BCR-2. Concentrations of major (wt. %) and trace elements (ppm) are presented

| Элемент Element | BHVO-2 (n=15) | | BCR-2 (n=8) | | |
|--------------------|--------------------------------|---|--------------------------------|-----------------------------------|---|
| | C _{mean} ±Δ ICP-MS | Принятые значения Reference value [23] | C _{mean} ±Δ ICP-MS | C _{mean} ±Δ LA-ICP-MS | Принятые значения Reference value [23] |
| Na | (1,6±0,1) % | (1,64±0,05) % | (2,5±0,4) % | (2,0±0,4) % | (2,31±0,04) % |
| Mg | (4,5±0,4) % | (4,38±0,04) % | (2,1±0,2) % | (2,0±0,5) % | (2,17±0,04) % |
| Al | (7,1±0,4) % | (7,11±0,06) % | (6,7±0,4) % | (6,4±0,7) % | (7,1±0,1) % |
| Si | (22±1) % | (23,1±0,1) % | (26±2) % | (26±5) % | (25,2±0,2) % |
| P | (0,12±0,03) % | (0,117±0,005) % | (0,16±0,02) % | (0,13±0,05) % | (0,16±0,01) % |
| K | (0,43±0,02) % | (0,426±0,004) % | (1,4±0,2) % | (1,5±0,4) % | (1,47±0,02) % |
| Ca | (8,8±0,5) % | (8,15±0,06) % | (5,0±0,2) % | (4,7±0,2) % | (5,08±0,08) % |
| Ti | (1,7±0,2) % | (1,64±0,02) % | (1,4±0,1) % | (1,3±0,3) % | (1,35±0,03) % |
| Mn | (0,14±0,02) % | (0,131±0,002) % | (0,15±0,01) % | (0,143±0,04) % | (0,152±0,003) % |
| Fe | (9±1) % | (8,67±0,09) % | (9,4±0,2) % | 9,6* | (9,6±0,3) % |
| Sc | 32±2 | 31,8±0,3 | 33±3 | 33±9 | 33,5±0,4 |
| V | 324±30 | 318±2 | 411±36 | 391±70 | 418±4 |
| Cr | 302±30 | 287±3 | 16±2 | 17±4 | 15,8±0,4 |
| Co | 49±3 | 44,9±0,3 | 38±2 | 36±10 | 37,0±0,4 |
| Ni | 131±11 | 120±1 | 14±3 | 15±7 | 12,6±0,3 |
| Cu | 135±6 | 129±1 | 26±4 | 31±10 | 19,7±0,7 |
| Zn | 108±6 | 104±1 | 138±10 | 129±30 | 130±2 |
| Ga | 20±1 | 21,4±0,2 | 19±4 | 19±4 | 22,0±0,2 |
| Rb | 9,0±0,4 | 93±0,1 | 46±2 | 50±11 | 46,0±0,6 |
| Sr | 390±14 | 394±21 | 336±10 | 310±60 | 337±7 |
| Y | 26,4±0,9 | 25,9±0,3 | 36±1 | 36±8 | 36±0,4 |
| Zr | 173±8 | 171±1 | 187±6 | 163±40 | 186,5±1,5 |
| Nb | 19±1 | 18,1±0,2 | 12,1±0,4 | 13±3 | 12,4±0,2 |
| Cs | 0,13±0,02 | 0,0996±0,002 | 1,0±0,1 | н.о. | 1,1±0,1 |
| Ba | 128±7 | 131±1 | 670±30 | 645±100 | 684±5 |
| Hf | 4,1±0,6 | 4,47±0,02 | 4,8±0,3 | 4,8±1,1 | 4,97±0,03 |
| Ta | 1,26±0,09 | 1,15±0,2 | 0,8±0,1 | 0,8±0,2 | 0,78±0,02 |
| Th | 1,2±0,1 | 1,22±0,02 | 5,9±0,5 | 5,6±1,2 | 5,83±0,05 |
| U | 0,41±0,05 | 0,41±0,04 | 1,7±0,1 | 1,6±0,3 | 1,68±0,02 |

Примечание: жирным шрифтом выделены концентрации железа, которое используется в качестве внутреннего стандарта.

Note: iron concentrations used as internal standard are in bold.

ниже предела обнаружения, в остальных стандартных образцах определено с большой погрешностью. Также получены завышенные значения концентраций по Cu относительно принятых значений в BCR-2, СГД-1а, СГ-3, для которых уровень содержания близок к пределу обнаружения. Остальные результаты, полученные ИСП-МС и ЛА-ИСП-МС, в пределах погрешности удовлетворительно согласуются между собой и с принятыми значениями.

На рис. 1, 2 представлено нормированное на хондрит распределение редкоземельных элементов, концентрации которых получены с помощью ИСП-МС и ЛА-ИСП-МС методик в стандартных образцах. На основании полученных результатов можно заключить, что характер распределения сохраняется, но результаты ЛА-ИСП-МС характеризуются большим разбросом по сравнению с данными, полученными в растворах.

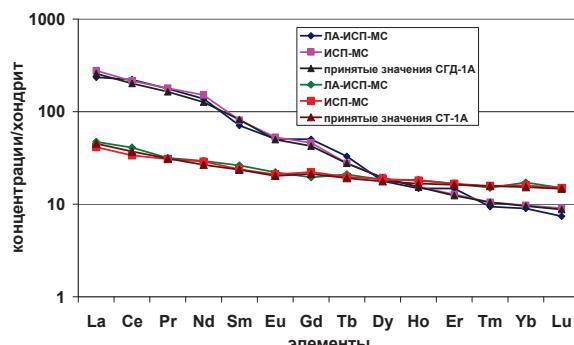


Рис. 1. Нормированное распределение редкоземельных элементов в стандартных образцах СГД-1а и СТ-1А, полученное с помощью ИСП-МС и ЛА-ИСП-МС

Fig. 1. Sample/chondrite ratio of rare earth elements in reference materials SGD-1A and ST-1A obtained by ICP-MS and LA-ICP-MS

Таблица 3. Результаты ИСП-МС и ЛА-ИСП-МС определения концентраций элементов в стандартных образцах СГД-1а и СГ-1а. Концентрации основных элементов приведены в массовых %, примесных элементов – в мкг/г

Table 3. Results of ICP-MS and LA-ICP-MS analyses of reference materials SGD-1a and SG-1a. Concentrations of major (wt. %) and trace elements (ppm) are presented

| Элемент Element | СГД-1а/SGD-1a (n=8) | | | СГ-1а/SG-1a (n=8) | | |
|--------------------|--------------------------------|-----------------------------------|---|--------------------------------|-----------------------------------|---|
| | C _{mean} ±Δ ICP-MS | C _{mean} ±Δ LA-ICP-MS | Принятые значения Reference value [24, 25] | C _{mean} ±Δ ICP-MS | C _{mean} ±Δ LA-ICP-MS | Принятые значения Reference value [24, 25] |
| Na | (1,93±0,09) % | (2,0±0,5) % | (2,09±0,03) % | (3,6±0,4) % | (5±1) % | (4,05±0,04) % |
| Mg | (4,2±0,2) % | (4,1±0,9) % | (4,20±0,06) % | (0,030±0,009) % | (0,010±0,007) % | (0,03±0,01) % |
| Al | (7,89±0,4) % | (7,6±0,5) % | (7,88±0,04) % | (6,9±0,6) % | (6,8±0,7) % | (7,32±0,02) % |
| Si | (22±1) % | (18±4) % | (21,65±0,05) % | (34±1) % | (26±7) % | (34,2±0,1) % |
| P | (0,42±0,02) % | (0,3±0,1) % | (0,44±0,01) % | (0,008±0,002) % | ниже п.о. | (0,006±0,001) % |
| K | (2,2±0,5) % | (2,5±0,5) % | (2,45±0,04) % | (3,3±0,4) % | (3,3±0,7) % | (3,43±0,05) % |
| Ca | (7,8±0,4) % | (8,4±1,2) % | (7,84±0,06) % | (0,12±0,02) % | (0,07±0,03) % | (0,10±0,01) % |
| Sc | 25±3 | 20±4 | 24±2 | 5±1 | 4±1 | 4,7±0,4 |
| Ti | (1,01±0,18) % | (0,90±0,15) % | (1,03±0,02) % | (0,037±0,008) % | (0,037±0,009) % | (0,043±0,003) % |
| V | 240±30 | 216±70 | 250±20 | 5,4±0,7 | 3±2 | 6,2±1,1 |
| Cr | 58±9 | 54±16 | 55±4 | 9±1 | 13±5 | 10±1 |
| Mn | (0,14±0,01) % | (0,13±0,03) % | (0,13±0,01) % | (0,15±0,02) % | (0,15±0,04) % | (0,15±0,01) % |
| Fe | (7,7±0,8) % | 8,2% | (8,2±0,2) % | (1,4±0,2) % | 1,56 % | (1,56±0,03) % |
| Co | 38±4 | 40±10 | 39±3 | 0,8±0,1 | 0,9±0,3 | 1,0±0,3 |
| Ni | 42±9 | 41±15 | 50±5 | 7±1 | 9±4 | 4,7±0,4 |
| Cu | 66±6 | 51±14 | 60±6 | 34±4 | 40±12 | 27±3 |
| Zn | 132±10 | 95±25 | 120±10 | 230±20 | 306±80 | 250±30 |
| Ga | 21±2 | 21±4 | 21±1 | 38±3 | 52±10 | 41±2 |
| Rb | 70±6 | 66±10 | 79±3 | 1200±100 | 1190±200 | 1200±100 |
| Sr | 2170±200 | 2000±400 | 2300±150 | 3±2 | 3±2 | 5,6±0,6 |
| Y | 31±3 | 33±6 | 30±2 | 74±7 | 60±12 | 66±3 |
| Zr | 230±20 | 162±20 | 240±20 | 740±70 | 600±150 | 740±30 |
| Nb | 8,9±0,5 | 9±2 | 8,1±0,7 | 400±40 | 386±70 | 400±30 |
| Cs | 4,1±0,5 | н.о. | 3,2±0,2 | 12±1 | н.о. | 11±1 |
| Ba | 1280±100 | 1060±130 | 1200±100 | 7±2 | 8±4 | 5,7±0,6 |
| Hf | 5±1 | 6±1 | 5,9±0,2 | 36±3 | 29±6 | 39±4 |
| Ta | 0,5±0,1 | 0,6±0,1 | 0,7±0,1 | 25±2 | 26±4 | 26±2 |
| Th | 9,4±0,9 | 9±2 | 9±1 | 140±10 | 141±25 | 130±10 |
| U | 2,4±0,2 | 2,0±0,4 | 2,2±0,2 | 58±4 | 52±10 | 63±4 |

Примечание: жирным шрифтом выделены концентрации железа, которое используется в качестве внутреннего стандарта.

Note: iron concentrations used as internal standard are in bold.

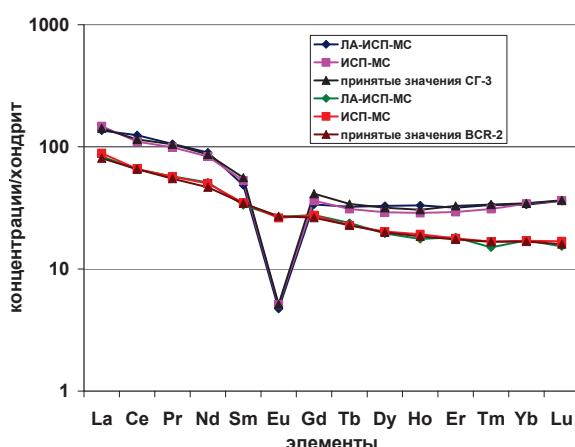


Рис. 2. Нормированное распределение редкоземельных элементов в стандартных образцах СГ-3 и BCR-2, полученное с помощью ИСП-МС и ЛА-ИСП-МС

Fig. 2. Sample/chondrite ratio of rare earth elements in reference materials SG-3a and BCR-2 obtained by ICP-MS and LA-ICP-MS

Заключение

Таким образом, опробованная ЛА-ИСП-МС методика многоэлементного анализа геологических образцов позволяет достоверно определять 40 элементов в готовых стёклах без дополнительной стадии пробоподготовки. Результаты, полученные для растворов и сплавленных стекол, с использованием градуировок по стандартным геологическим образцам BHVO-1 и BHVO-2, в пределах погрешности согласуются между собой и с принятыми значениями. Методика ЛА-ИСП-МС отличается от методики ИСП-МС экспрессностью за счет отсутствия стадии пробоподготовки, пределы обнаружения и погрешность определения для ЛА-ИСП-МС методики выше, чем при анализе растворов, что ограничивает ее применение для определения некоторых элементов.

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН.

Таблица 4. Результаты ИСП-МС и ЛА-ИСП-МС определения концентраций элементов в стандартных образцах СТ-1а и СГ-3. Концентрации основных элементов приведены в массовых %, примесных элементов – в мкг/г**Table 4.** Results of ICP-MS and LA-ICP-MS analyses of reference materials ST-1a and SG-3. Concentrations of major (wt.%) and trace elements (ppm) are presented

| Элемент Element | СТ-1а/СТ-1а (n=8) | | | СГ-3/СГ-3 (n=8) | | |
|--------------------|--------------------------------|-----------------------------------|---|--------------------------------|-----------------------------------|---|
| | C _{mean} ±Δ ICP-MS | C _{mean} ±Δ LA-ICP-MS | Принятые значения Reference value [24, 25] | C _{mean} ±Δ ICP-MS | C _{mean} ±Δ LA-ICP-MS | Принятые значения Reference value [24, 25] |
| Na | (1,8±0,1) % | (1,9±0,4) % | (1,85±0,02) % | (2,9±0,2) % | (3,5±0,9) % | (3,15±0,04) % |
| Mg | (3,7±0,3) % | (3,5±0,8) % | (3,44±0,04) % | (0,06±0,006) % | (0,05±0,01) % | (0,06±0,01) % |
| Al | (7,46±0,07) % | (7,7±0,3) % | (7,53±0,05) % | (5,3±0,3) % | 5,0±0,8 | (5,63±0,04) % |
| Si | (23±2) % | (24±4) % | (22,91±0,05) % | (37±3) % | (37±6) % | (34,89±0,07) % |
| P | (0,09±0,01) % | (0,11±0,05) % | (0,092±0,004) % | (0,011±0,005) % | ниже п.о. | (0,011±0,003) % |
| K | (0,53±0,05) % | (0,56±0,09) % | (0,58±0,08) % | (3,9±0,3) % | (3,2±0,7) % | (3,85±0,05) % |
| Ca | (7,4±0,4) % | (7±1) % | (7,29±0,07) % | (0,22±0,02) % | (0,18±0,06) % | (0,23±0,02) % |
| Sc | 39±3 | 36±8 | 37±3 | 4,0±0,5 | 3±1 | 4,2±0,2 |
| Ti | (1,08±0,08) % | (1,0±0,2) % | (1,11±0,02) % | (0,16±0,01) % | (0,13±0,02) % | (0,156±0,006) % |
| V | 322±30 | 330±60 | 310±30 | 4,3±0,4 | 5±1 | 4,9±0,8 |
| Cr | 152±10 | 158±50 | 140±10 | 34±3 | 33±9 | 34±1 |
| Mn | (0,19±0,03) % | (0,17±0,04) % | (0,160±0,008) % | (0,10±0,01) % | (0,10±0,03) % | (0,091±0,004) % |
| Fe | (9,3±0,9) % | 10,6 % | (10,6±0,1) % | (2,9±0,3) % | 3,15 % | (3,15±0,05) % |
| Co | 46±8 | 49±10 | 45±4 | 0,82±0,07 | 0,9±0,3 | 0,75±0,06 |
| Ni | 80±8 | 84±20 | 90±6 | 4±3 | 7±4 | 5,8±0,6 |
| Cu | 193±10 | 190±40 | 180±20 | 13±1 | 30±10 | 13±1 |
| Zn | 125±10 | 130±30 | 140±20 | 140±10 | 160±40 | 134±7 |
| Ga | 20±1 | 20±4 | 19±1 | 27±2 | 30±6 | 27±1 |
| Rb | 17±4 | 17±3 | 17±1 | 127±10 | 149±25 | 130±6 |
| Sr | 228±20 | 206±40 | 230±10 | 8,0±0,8 | 7±2 | 7,2±0,7 |
| Y | 35±4 | 35±7 | 32±3 | 59±5 | 57±12 | 57±2 |
| Zr | 140±15 | 127±20 | 150±30 | 500±50 | 444±70 | 520±20 |
| Nb | 8,0±0,8 | 6,7±0,9 | 7,2±0,6 | 19±2 | 22±4 | 19±1 |
| Cs | 0,7±0,2 | п.о. | 0,9 | 4,1±0,4 | п.о. | 4,5 |
| Ba | 231±20 | 215±25 | 210±10 | 71,0±0,9 | 63±10 | 76±5 |
| Hf | 3,3±0,3 | 3,2±0,7 | 3,3±0,6 | 11±1 | 11±3 | 12±1 |
| Ta | 0,6±0,1 | 0,9±0,1 | 0,9±0,3 | 1,2±0,1 | 1,4±0,2 | 1,4±0,1 |
| Th | 1,7±0,1 | 1,4±0,5 | 2,3±0,5 | 7,4±0,9 | 7,2±1,3 | 7,6±0,6 |
| U | 0,7±0,1 | 0,5±0,2 | 0,8±0,2 | 2,2±0,2 | 2,7±0,7 | 1,9±0,1 |

Примечание: жирным шрифтом выделены концентрации железа, которое используется в качестве внутреннего стандарта.

Note: iron concentrations used as internal standard are in bold.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ICP-MS – a powerful tool for high-precision trace-element analysis in Earth sciences: Evidence from analysis of selected U.S.G.S. reference samples / G.A. Jenner, H.P. Longerich, S.E. Jackson, B.J. Freyer // Chemical Geology – 1990. – V. 83. – P. 133–148.
2. Balaram V. Recent trends in the instrumental analysis of rare earth elements in geological and industrial materials // Trends in Analytical Chemistry. – 1996. – V. 15. – P. 475–485.
3. Jarvis K.E., Williams J.G. Laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS): a rapid technique for the direct, quantitative determination of major, trace and rare-earth elements in geological samples // Chemical Geology. – 1993. – V. 106. – P. 251–262.
4. Пупышев А.А., Суриков В.Т. Масс-спектрометрия с индуктивно связанный плазмой. Образование ионов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2006. – 276 с.
5. Jenner F.E., Arevalo R.D. Major and trace element analysis of natural and experimental igneous systems using LA-ICP-MS // Elements. – 2016. – V. 12. – № 5. – P. 311–316.
6. Petrelli M., Laeger K., Perugini D. High spatial resolution trace element determination of geological samples by laser ablation quadrupole plasma mass spectrometry: implications for glass analy-
- sis in volcanic products // Geosciences Journal. – 2016. – V. 20. – № 6. – P. 851–863.
7. Geochronological, geochemical and mineralogical constrains on the petrogenesis of appinites from the Laonushan complex, eastern Qinling, central China / L. Ding, C. Ma, J. Li, L. Wang // Chemie der Erde. – 2016. – V. 76. – № 4. – P. 579–595.
8. Evaluating downhole fractionation corrections in LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology / T.J. ver Hoeve, J.S. Scoates, C.J. Wall, D. Weis, M. Amini // Chemical Geology. – 2018. – № 483. – P. 201–217.
9. Eggins S.M. Laser Ablation ICP-MS Analysis of Geological Materials Prepared as Lithium Borate Glasses // Geostandards Newsletter. – 2003. – V. 27. – № 2. – P. 147–162.
10. Zongshou Y., Norman M.D., Robinson P. Major and Trace Element Analysis of Silicate Rocks by XRF and Laser Ablation ICP-MS Using Lithium Borate Fused Glasses: Matrix Effects, Instrument Response and Results for International Reference Materials // Geostandards Newsletter. – 2002. – V. 27. – № 1. – P. 67–89.
11. Orihashi Y., Takafumi H. Rapid quantitative analysis of Y and REE abundances in XRF glass bead for selected GSJ reference rock standards using Nd-YAG 266 nm UV laser ablation ICP-MS // Geochimical Journal. – 2003. – V. 37. – P. 401–412.

12. Elemental Analyses Using Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (LA-ICP-MS) of Geological Samples Fused with Li₂B₄O₇ and Calibrated Without Matrix-Matched Standards / D. Guenther, A. Quadt, R. Wirz, H. Cousin, V.J. Dietrich // *Mikrochimica Acta*. – 2001. – V. 136. – P. 101–107.
13. Application of a double-focusing magnetic sector inductively coupled plasma mass spectrometer with laser ablation for the bulk analysis of rare earth elements in rocks fused with Li₂B₄O₇ / M. Ødegård, S.H. Dundas, B. Flem, A. Grimstvedt // *Fresenius Journal of Analytical Chemistry*. – 1998. – V. 362. – P. 477–482.
14. Weis P., Beck H.P., Guenther D. Characterizing ablation and aerosol generation during elemental fractionation on absorption modified lithium tetraborate glasses using LA-ICP-MS // *Anal Bioanal Chem*. – 2005. – V. 381. – P. 212–224.
15. Trace Element Analysis of Fused Whole-Rock Glasses by Laser Ablation-ICP-MS and PIXE / M. Kurosawa, K. Shima, S. Ishii, K. Sasa // *Geostandards and Geoanalytical Research*. – 2005. – V. 30. – № 1. – P. 17–30.
16. Sylvester P.J. Trace Element Analysis of Fused Whole Rock Glass by Laser Ablation ICPMS // *Laser-Ablation-ICPMS in the Earth Sciences*. – 2001. – V. 29. – P. 147–162.
17. Laser-ablation ICP-MS analysis of siliceous rock glasses fused on an iridium strip heater using MgO dilution / F. Nehring, D.E. Jacob, M.G. Barth, S.F. Foley // *Mikrochimica Acta*. – 2008. – V. 160. – P. 153–163.
18. A Flux-Free Fusion Technique for Rapid Determination of Major and Trace Elements in Silicate Rocks by LA-ICP-MS / Z. He, F. Huang, H. Yu, Y. Xiao, F. Wang, Q. Li, Y. Xia, X. Zhang // *Geostandards and Geoanalytical Research*. – 2016 – V. 40. – № 1. – P. 5–27
19. Calibration and correction of LA-ICP-MS and LA-MC-ICP-MS analyses for element contents and isotopic ratios / J. Lin, Y. Liu, Y. Yang, Z. Hu // *Solid Earth Sciences*. – 2016. – V. 1. – № 1. – P. 5–27.
20. Определение редкоземельных и высокозарядных элементов в стандартных геологических образцах методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) / И.В. Николаева, С.В. Палесский, О.А. Козыменко, Г.Н. Аношин // *Геохимия*. – 2008. – № 10. – С. 1085–1091.
21. Карманова Н.Г., Карманов Н.С. Универсальная методика рентгенофлуоресцентного силикатного анализа горных пород на спектрометре ARL-9900XP // Тезисы докладов VII всероссийской конференции по рентгеноспектральному анализу. – Новосибирск, 2011. – С. 126.
22. Определение основных и примесных элементов в силикатных породах методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой после сплавления с LiBO₂ / И.В. Николаева, С.В. Палесский, О.С. Чирко, С.М. Черноножкин // *Аналитика и контроль*. – 2012. – Т. 16. – № 2. – С. 134–142.
23. GeoReM: a New Geochemical Database for Reference Materials and Isotopic Standards / K.P. Jochum, U. Nohl, K. Herwig, E. Lammel, D. Stoll, A.W. Hofmann. URL: <http://georem.mpch-mainz.gwdg.de> (дата обращения 20.03.2018).
24. Новые данные по определению редких и рассеянных элементов в геологических стандартных образцах методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой / И.Н. Мысовская, Е.В. Смирнова, В.И. Ложкин, Н.Н. Пахомова // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2009. – № 10. – С. 60–66.
25. Петров Л.Л. Каталог – Стандартные образцы химического состава природных минеральных веществ. – Иркутск. 2006. – № 54 с.

Поступила 08.06.2018 г.

Информация об авторах

Николаева И.В., кандидат химических наук, старший научный сотрудник Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Палесский С.В., кандидат химических наук, старший научный сотрудник Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Карпов А.В., аспирант Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

UDC 550.4.08

ANALYSIS OF GEOLOGICAL SAMPLES: COMPARISON OF SOLUTION ICP-MS AND FUSED GLASSES LA-ICP-MS TECHNIQUES

Irina V. Nikolaeva¹,

inikol@igm.nsc.ru

Stanislav V. Palesskiy¹,

stas@igm.nsc.ru

Alexander V. Karpov¹,

theblake@mail.ru

¹ V.S. Sobolev Institute of geology and mineralogy SB RAS,
3, Akademik Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

The relevance of the study is caused by the need to develop new efficient sample preparation technique suitable for routine multielement ICP-MS analysis of geological samples which decreases time consumption and allows determining a wide number of elements in the range of single measurement using laser ablation (LA-ICP-MS).

The main aim of the study is to compare metrological characteristics of two ICP-MS techniques, based on different sample preparation of silicate rocks – sample dissolution after melting with lithium metaborate and using prepared fused glasses for laser ablation.

Objects: the international and Russian reference materials of natural rocks: basalts – BHVO-1, BHVO-2, BCR-2, granites – SG-1a, SG-3, gabbro SGD-1a, trap ST-1a.

Methods: inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) and laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS).

Results of the study showed that the developed multielement ICP-MS and LA-ICP-MS techniques allow determining a wide number of elements in geological samples in the range of single measurement using low, medium and high resolution. Internal and matrix-matched external standards for decreasing/correction of matrix effects and instrumental drift are used. Comparison of the obtained results with values of six reference geological materials verified the accuracy of the techniques. The LA-ICP-MS technique is faster due to the lack of sample preparation, but has higher uncertainty and detection limits in comparison to the ICP-MS technique.

Key words:

Inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS), laser ablation (LA), sample preparation, geological reference materials, major and trace elements, rare earth elements.

The research was carried out by the State Task of IGM SB RAS.

REFERENCES

1. Jenner G.A., Longerich H.P., Jackson S.E., Freyer B.J. ICP-MS – a powerful tool for high-precision trace-element analysis in Earth sciences: Evidence from analysis of selected U.S.G.S. reference samples. *Chemical Geology*, 1990, vol. 83, pp. 133–148.
2. Balaram V. Recent trends in the instrumental analysis of rare earth elements in geological and industrial materials. *Trends in Analytical Chemistry*, 1996, vol. 15, pp. 475–485.
3. Jarvis K.E., Williams J.G. Laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS): a rapid technique for the direct, quantitative determination of major, trace and rare-earth elements in geological samples. *Chemical Geology*, 1993, vol. 106, pp. 251–262.
4. Pupysh A.A. *Mass-spektrometriya s induktivno-svyazannoy plazmoy. Obrazovanie ionov* [Inductively coupled plasma mass-spectrometry. Generation of ions]. Ekaterinburg, UrO RAS Publ., 2006. 276 p.
5. Jenner F.E., Arevalo R.D. Major and trace element analysis of natural and experimental igneous systems using LA-ICP-MS. *Elements*, 2016, vol. 12, no. 5, pp. 311–316.
6. Petrelli M., Laeger K., Perugini D. High spatial resolution trace element determination of geological samples by laser ablation quadrupole plasma mass spectrometry: implications for glass analysis in volcanic products. *Geosciences Journal*, 2016, vol. 20, no. 6, pp. 851–863.
7. Ding L., Ma C., Li J., Wang L. Geochronological, geochemical and mineralogical constraints on the petrogenesis of appinites from the Laoniushan complex, eastern Qinling, central China. *Chemie der Erde*, 2016, vol. 76, no. 4, pp. 579–595.
8. Ver Hoeve T.J., Scoates J.S., Wall C.J., Weis D., Amini M. Evaluating downhole fractionation corrections in LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology. *Chemical Geology*, 2018, no. 483, pp. 201–217.
9. Eggin S.M. Laser Ablation ICP-MS Analysis of Geological Materials Prepared as Lithium Borate Glasses. *Geostandards Newsletter*, 2003, vol. 27, no. 2, pp. 147–162.
10. Zongshou Y., Norman M.D., Robinson P. Major and Trace Element Analysis of Silicate Rocks by XRF and Laser Ablation ICP-MS Using Lithium Borate Fused Glasses: Matrix Effects, Instrument Response and Results for International Reference Materials. *Geostandards Newsletter*, 2002, vol. 27, no. 1, pp. 67–89.
11. Orihashi Y., Takafumi H. Rapid quantitative analysis of Y and REE abundances in XRF glass bead for selected GSJ reference rock standards using Nd-YAG 266 nm UV laser ablation ICP-MS. *Geochimical Journal*, 2003, vol. 37, pp. 401–412.
12. Guenther D., Quadt A., Wirz R., Cousin H., Dietrich V.J. Elemental Analyses Using Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (LA-ICP-MS) of Geological Samples Fused with $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ and Calibrated Without Matrix-Matched Standards. *Mikrochimica Acta*, 2001, vol. 136, pp. 101–107.
13. Ødegård M., Dundas S.H., Flem B., Grimstvedt A. Application of a double-focusing magnetic sector inductively coupled plasma mass spectrometer with laser ablation for the bulk analysis of rare earth elements in rocks fused with $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$. *Fresenius Journal of Analytical Chemistry*, 1998, vol. 362, pp. 477–482.

14. Weis P., Beck H.P., Guenther D. Characterizing ablation and aerosol generation during elemental fractionation on absorption modified lithium tetraborate glasses using LA-ICP-MS. *Anal Bioanal Chem.*, 2005, vol. 381, pp. 212–224.
15. Kurosawa M., Shima K., Ishii S., Sasa K. Trace Element Analysis of Fused Whole-Rock Glasses by Laser Ablation-ICP-MS and P-XE. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 2005, vol. 30, no. 1, pp. 17–30.
16. Sylvester P.J. Trace Element Analysis of Fused Whole Rock Glass by Laser Ablation ICPMS. *Laser-Ablation-ICPMS in the Earth Sciences*, 2001, vol. 29, pp. 147–162.
17. Nehring F., Jacob D.E., Barth M.G., Foley S.F. Laser-ablation ICP-MS analysis of siliceous rock glasses fused on an iridium strip heater using MgO dilution. *Mikrochimica Acta*, 2008, vol. 160, pp. 153–163.
18. He Z., Huang F., Yu H., Xiao Y., Wang F., Li Q., Xia Y., Zhang X. A Flux-Free Fusion Technique for Rapid Determination of Major and Trace Elements in Silicate Rocks by LA-ICP-MS. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 2016 March, vol. 40, no. 1, pp. 5–27.
19. Lin J., Liu Y., Yang Y., Hu. Z Calibration and correction of LA-ICP-MS and LA-MC-ICP-MS analyses for element contents and isotopic ratios. *Solid Earth Sciences*, 2016, vol. 1, no. 1, pp. 5–27.
20. Nikolaeva I.V., Palesskiy S.V., Kozmenko O.A., Anoshin G.N. Opredelenie redkozemelnykh i vysokozaryadnykh elementov v standartnykh geologicheskikh obraztsakh metodom mass-spektrometrii s induktivno-svyazannoy plazmoy [Determination of rare earth and high-charged elements in standard materials using inductively coupled plasma mass-spectrometry (ICP-MS)]. *Geochemistry*, 2008, no. 10, pp. 1085–1091.
21. Karmanova N.G., Karmanov N.S. Universalnaya metodika rentgenofluorescentnogo silikatnogo analiza gornykh porod na spektrometre ARL-9900XP [Universal X-ray fluorescence technique for silicate analysis of rocks using ARL-9900XP spectrometer]. *Tezisy dokladov VII vserossijskoy konferentsii po rentgenospektralnomu analizu* [Proc. of the VII All-Russian X-ray spectral analysis conference]. Novosibirsk, 2011. p. 126.
22. Nikolaeva I.V., Palesskiy S.V., Chirkov O.S., Chernonozhkin S.M. Opredelenie osnovnykh i primesnykh elementov v silikatnykh porodakh metodom mass-spektrometrii s induktivno-svyazannoy plazmoy posle soplavleniya s LiBO₂ [Determination of major and trace elements in silicate rocks by inductively couples plasma mass-spectrometry after fusion with LiBO₂]. *Analytics and control*, 2012, vol. 16, no. 2, pp.134–142.
23. Jochum K.P., Nohl U., Herwig K., Lammel E., Stoll D., Hofmann A.W. *GeoReM: a New Geochemical Database for Reference Materials and Isotopic Standards*. Available at: <http://georem.mpch-mainz.gwdg.de> (accessed 20 March 2018).
24. Mysovskaya I.N., Smirnova E.V., Lozhkin V.I., Pakhomova N.N. Novye dannye po opredeleniyu redkikh i rasseyannykh elementov v geologicheskikh standartnykh obraztsakh metodom mass-spektrometrii s induktivno-svyazannoy plazmoy [New data on determination of rare and scattered elements in standard geological materials using inductively coupled plasma mass-spectrometry technique]. *Factory laboratory. Diagnostics of materials*, 2009, no. 10, pp. 60–66.
25. Petrov L.L. *Katalog – Standartnye obraztsy khimicheskogo sostava prirodnykh mineralnykh veshchestv* [Catalog – Reference materials of the chemical composition of natural minerals]. Irkutsk, 2006. 54 p.

Received: 8 June 2018.

Information about the authors

Irina V. Nikolaeva, Cand. Sc., senior researcher, V.S. Sobolev Institute of geology and mineralogy SB RAS.

Stanislav V. Palesskiy, Cand. Sc., senior researcher, V.S. Sobolev Institute of geology and mineralogy SB RAS.

Alexander V. Karpov, postgraduate student, V.S. Sobolev Institute of geology and mineralogy SB RAS.

УДК 519.688

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ ГАЗОНЕФТЕПРОДУКТОПРОВОДОВ

Зенцов Вячеслав Николаевич¹,

zenkov.ugntu@yandex.ru

Болотнов Анатолий Миронович²,

bolotnov@yandex.ru

Удалова Елена Александровна¹,

vakil2004@mail.ru

Мазитова Алия Карамовна¹,

elenasf@yandex.ru

Лапшакова Ирина Васильевна¹,

irvasya@rambler.ru

Райзер Юлия Сергеевна¹,

julia-2706@mail.ru

Маскова Альбина Рафитовна¹,

asunasf@mail.ru

Васильева Анна Сергеевна¹,

annavas96@mail.ru

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Россия, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

² Башкирский государственный университет,

Россия, 450076, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32.

Актуальность исследования обусловлена встречающимися расхождениями при проектировании катодной защиты трубопроводов. Электрический ток, стекающий с анодного заземления в грунт, распространяется по нему и поступает на защищаемый трубопровод, поляризующ его катод. Для описания закономерностей изменения наложенных потенциалов и силы поляризующего тока по длине трубопровода при катодной защите применяются определенные допущения. При расчете катодной защиты трубопроводов имеются существенные расхождения между проектными и реальными параметрами защиты. В последнее время применяют компьютерные вычислительные эксперименты, позволяющие проводить исследования по проектированию и оптимизации катодной защиты в кратчайшие сроки и меньшими затратами.

Цель. Основываясь на методе фиктивных источников, необходимо предложить алгоритм решения краевой задачи для потенциала электрического поля катодной защиты подземного трубопровода вертикальным глубинным анодом.

Объекты: газонефтепроводы, для которых защита от электрохимической коррозии является необходимым условием обеспечения оптимального срока их работы.

Методы: применение метода фиктивных источников обосновано принципом электростатической аналогии для пространственных задач распределения электрического поля. Чтобы применить установленные соотношения к рассматриваемой задаче в полупространстве, в алгоритме дополнительно используется метод зеркальных отражений, позволяющий перевести задачу из полупространства в пространство.

Результаты. Разработана программа на языке программирования C++ для проведения численных расчетов электрических полей в системах катодной защиты трубопроводов глубинными анодами с учетом ограничений, накладываемых на потенциал защищаемого сооружения и плотность тока, стекающего с анода. Компьютерная модель дает возможность проведения серии вычислительных экспериментов для выбора геометрических и электрохимических параметров проектируемых глубинных анодов с целью повышения надежности катодной защиты подземных сооружений и увеличения срока их службы. Приведены графики, иллюстрирующие особенности распределений плотности тока вдоль глубинного анода и защитного потенциала трубопровода, при изменениях внешних условий за определенный период эксплуатации. Показано, что при уменьшении сопротивления изоляции для поддержания необходимого защитного потенциала трубопровода требуется увеличение тока катодной станции. Растет плотность тока на границе «анод–грунт», что в свою очередь приводит к более интенсивному растворению анода. Приведены примеры численных результатов, полученных на основе расчетов с реальными исходными данными. Анализ результатов подтверждает эффективность, устойчивость и универсальность разработанного алгоритма.

Ключевые слова:

Глубинный анод, катодная защита, компьютерное моделирование, метод фиктивных источников, потенциал, электрическое поле, электрический ток.

Введение

В настоящее время система катодной защиты рассчитывается исходя из срока ее службы, равного 15–20 годам. Наибольший эффект катодная защита (КЗ) трубопроводов дает в том случае, когда трубопроводы имеют хорошую антикоррозийную изоляцию и применяемые анодные заземлители изготовлены из новых композиционных материалов [1].

Промышленностью освоен выпуск станций катодной защиты мощностью от 300 до 5000 Вт со значениями токов $I=12\text{--}100$ А. При повышении тока увеличиваются его анодная и катодная плотности, что приводит к более интенсивным процессам газовыделения и электроосмоса, а также к смещению потенциала. Увеличение мощности катодных станций сверх 1000 Вт приводит к увеличению потенциала в точке дренажа выше максимально допустимого [2]. Важным параметром в системе катодной защиты является определение защитной плотности тока, по которой можно рассчитать ток катодных установок. Защитная плотность тока при электрохимической защите газонефтепроводов зависит от состояния изоляционного покрытия и других факторов. Проектные организации для определения тока катодной защиты применяют опытные защиты или проводят физическое моделирование [3–6].

Известно, что электрическое поле в системе «анодный заземлитель – грунт – трубопровод» создается протоком электрического тока через цепь «катодная станция – анодный заземлитель» [7].

Авторы на протяжении последних 30 лет занимаются разработкой новых конструкций анодных заземлителей оптимальных размеров. Организовано промышленное производство анодных заземлителей в коксопековой оболочке [8].

Пространственное распределение электрического поля КЗ определяется многими факторами: режимом работы катодной станции, свойствами грунта, а также геометрическими и электрохимическими параметрами защищаемых сооружений и применяемых анодных заземлителей, значения которых изменяются в процессе эксплуатации [9–11].

Определение и оптимизация параметров КЗ с целью повышения надежности защиты и увеличения срока службы защищаемых сооружений требуют как экспериментальных исследований, так и разработки математических моделей, алгоритмов и комплексов программ для проведения компьютерных экспериментов [12, 13].

Основные сложности алгоритмизации задач токораспределения в системах КЗ подземных сооружений связаны с неограниченностью области интегрирования и с большим разбросом значений геометрических параметров объектов. Например, труба диаметром 1 м может иметь участок, защищаемый одним анодом, длиной в десятки километров; вертикальная анодная «гирлянда» с внешним диаметром 10–30 см имеет длину до нескольких десятков метров [14–16].

Компьютерные вычислительные эксперименты, по сравнению с натурными и лабораторными, позволяют проводить исследования по проектированию и оптимизации КЗ с существенно меньшими затратами и в более короткие сроки.

В данной работе описан алгоритм и представление результаты численных расчетов электрического поля КЗ участка трубопровода глубинным анодом с учетом ограничений, накладываемых на плотность анодного тока и защитный потенциал трубы [17–19].

Математическая модель электрического поля

Сформулируем краевую задачу для функции потенциала $u(p)$ электрического поля КЗ в области $\Omega=\{p|p=(x,y,z), x\in[0,L_i], y\in(-\infty,\infty), z\in[0,\infty)\}$ (рис. 1).

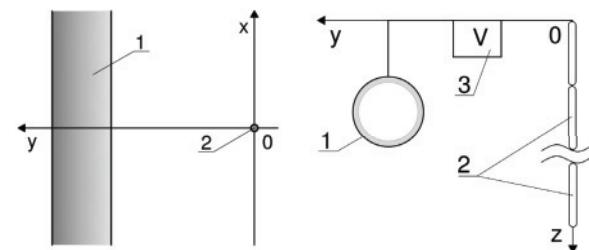


Рис. 1. Схема КЗ трубопровода: 1 – труба; 2 – «гирлянда» глубинных анодов; 3 – катодная станция

Fig. 1. Diagram of short-circuit pipe: 1 is the pipe; 2 is the «garland» of deep anodes; 3 is the cathode station

Известно [20, 21], что потенциал постоянного электрического поля удовлетворяет уравнению эллиптического типа

$$\operatorname{div}(\sigma(p)\operatorname{grad} u(p)) = 0, \quad p \in \Omega, \quad (1)$$

где $\sigma(p)$ – удельная электропроводность среды, $(\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$; $p=(x,y,z)$ – произвольная точка области интегрирования Ω .

Границам-изоляторам (S_{is}), к которым отнесем поверхность земли, плоскости сечений трубы (при $x=L_i$) и анода (при $z=L_a$) соответствуют частные производные по нормали второго рода

$$\left. \frac{\delta u}{\delta n} \right|_{S_{is}} = 0, \quad (2)$$

где n – вектор нормали к границе.

На границах «анод–грунт» (S_a) и «грунт–труба» (S_t) ставятся частные производные по нормали третьего рода:

$$\left. \left(u + c_a \sigma \frac{\delta u}{\delta n} \right) \right|_{S_a} = u_a \left. \left(u - c_t \sigma \frac{\delta u}{\delta n} \right) \right|_{S_t} = u_t, \quad (3)$$

где u – потенциал в приграничном грунте; c_a и c_t – удельные сопротивления оболочки анода и изоляции трубы, $\text{Ом}\cdot\text{м}^2$; u_a , u_t – потенциалы сердечника анода и металла трубы; здесь и далее индекс « a » относится к аноду, « t » – к трубе.

Перед вторым слагаемым для анода стоит знак «+», для трубы «–», т. к. направление тока принято положительным от анода в грунт и от грунта к трубе.

Если зависимости плотности тока от разности потенциалов на границах S_a и S_t линейны, то параметры c_a и c_t постоянны для конкретного варианта расчета. Параметр c_a может зависеть от координат точки на поверхности анода при моделировании составных анодов переменного радиуса или при учете процесса растворения оболочки анода. Параметр c_t может зависеть от положения точки на поверхности трубы при наличии неоднородностей изоляции, что является необходимым в задаче моделирования дефектов в изоляции трубопровода [20–24].

Учитывая, что длины анода и трубы значительно превышают их диаметры, потенциалы металлов естественно считать постоянными в нормальных сечениях, т. е. зависящими только от продольной координаты: $u_{am}=u_{am}(z)$, $u_{tm}=u_{tm}(x)$.

В сечениях анода ($z=0$) и трубы ($x=0$) ставятся условия второго рода

$$\frac{du_{am}}{dz} \Big|_{z=0} = \frac{I_0}{\sigma_a S_{am}}; \quad \frac{du_{tm}}{dx} \Big|_{x=0} = \frac{I_0}{2\sigma_t S_{tm}}, \quad (4)$$

где σ_a , σ_t – удельные электропроводности металлов анода и трубы; S_{am} , S_{tm} – площади их «металлических» сечений; I_0 – ток катодной станции, А.

Так как защищаемый участок трубы симметричен относительно плоскости $Y0Z$, расчет проводится только для одной половины, поэтому во второй формуле присутствует коэффициент «2» в знаменателе.

Дополнительным условием

$$(u - u_{tm}) \Big|_{x=L_t} = u_{protect} \quad (5)$$

обеспечивается необходимое значение защитного потенциала ($u_{protect}$) трубы в точке, наиболее удаленной от анода.

Алгоритм численного решения

Для алгоритмизации пространственной задачи (1)–(5) применяется метод дискретизации, основы которого заложены в работах В.Н. Ткаченко [25]. Для моделирования электрического поля КЭ магистральных трубопроводов гибкими протяженными анодами аналогичный подход использовался в работе [26], где он назван методом фиктивных источников. Последнего названия мы придерживаемся в данной публикации.

Для перехода от непрерывной модели к дискретной представим глубинный анод в виде N конечных объемных элементов (КОЭ) длиной $\frac{L_a}{N}$, а защищаемый участок трубопровода условно разобьем на M элементов длины $\frac{L_a}{J}$. Далее для каждого КОЭ будем оперировать средними значениями неизвестных параметров:

- u_{am} , u_{tm} – потенциал в металле КОЭ анода или трубы;
- u_{ag} , u_{tg} – потенциал в грунте, граничащем с КОЭ;
- I_{az} , I_{tx} – продольный ток в металле между соседними КОЭ;

- I_{ag} , I_{tg} – ток, протекающий через боковую поверхность КОЭ.

При построении алгоритма каждый КОЭ анода и трубопровода будем ассоциировать с фиктивным источником (ФИ), расположенным в геометрическом центре элемента.

Применяя 1-й закон Кирхгофа к каждому ФИ, с учетом (2), сформируем первый блок $N+M$ уравнений:

$$\begin{aligned} I_0 - I_{az,1} - I_{ag,1} &= 0; \\ I_{az,i} - I_{az,i+1} - I_{ag,i+1} &= 0 \quad (i = 1, \dots, N-2), \\ I_{az,N-1} - I_{ag,N} &= 0; \\ \frac{I_0}{2} - I_{tx,1} - I_{tg,1} &= 0; \\ I_{tx,j} - I_{tx,j+1} - I_{tg,j+1} &= 0 \quad (j = 1, \dots, M-2), \\ I_{tx,M-1} - I_{tg,M} &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

В соответствии с условиями (3) сформируем второй блок $N+M$ уравнений:

$$\begin{aligned} u_{ag,j} + c_a \frac{I_{ag,j}}{S_{a,i}} &= u_{am,i}, \quad (i = 1, \dots, N); \\ u_{tg,j} - c_t \frac{I_{tg,j}}{S_{t,j}} &= u_{tm,j}, \quad (j = 1, \dots, M), \end{aligned} \quad (7)$$

где S_{ai} , S_{tj} – площади боковых поверхностей КОЭ, м².

Третий блок $N+M-2$ уравнений сформируем из условия выполнения закона Ома между соседними ФИ:

$$\begin{aligned} u_{am,i} - u_{am,i+1} &= \rho_a I_{az,i}, \quad (i = 1, \dots, N-1); \\ u_{tm,j} - U_{tm,j+1} &= \rho_t I_{tx,j}, \quad (j = 1, \dots, M-1), \end{aligned} \quad (8)$$

где ρ_a , ρ_t – продольные сопротивления сердечника анода и металла трубы между соседними ФИ, Ом.

Последний блок $N+M$ уравнений связывает потенциалы в грунте на границах КОЭ с интенсивностями точечных ФИ:

$$\begin{aligned} 4\pi\sigma u_{ag,i} &= \sum_{k=1}^N \frac{I_{ag,k}}{R(p_i, p_k)} - \sum_{m=1}^M \frac{I_{tg,m}}{R(p_i, p_m)}, \\ (i = 1, \dots, N); \\ 4\pi\sigma u_{tg,j} &= \sum_{k=1}^N \frac{I_{ag,k}}{R(p_j, p_k)} - \sum_{m=1}^M \frac{I_{tg,m}}{R(p_j, p_m)}, \\ (j = 1, \dots, M), \end{aligned} \quad (9)$$

где R – расстояние от ФИ до точки, в которой определяется потенциал, м.

Применение формул (9) обосновано принципом электростатической аналогии для пространственных задач распределения электрического поля. Чтобы применить соотношения (9) к рассматриваемой задаче в полупространстве, в алгоритме дополнительно используется метод зеркальных отражений, позволяющий перевести задачу из полупространства в пространство.

Из условия (5) имеем последнее уравнение:

$$u_{tg,M} - u_{tm,M} = u_{protect}. \quad (10)$$

Таким образом, сформирована система линейных алгебраических уравнений (6)–(10), в которой число уравнений и неизвестных равно $4(N+M)-1$.

Вычислительный эксперимент

В соответствии с изложенным выше алгоритмом авторами разработана программа на языке C++. Ниже приведены некоторые результаты расчета КЗ трубопровода глубинным анодом; исходные данные представлены в таблице.

Таблица. Значения основных параметров

Table. Values of basic parameters

| Параметр Paramete | Единица измерения/Unit | Значение Value |
|--|------------------------|----------------------|
| Длина защищаемого участка трубы (половина) Length of the protected section of the pipe (half) | км/км | 5,2 |
| Глубина от уровня земли до трубы Depth from ground level to pipe | м/м | 1,2 |
| Внешний диаметр трубы Outer diameter of the tube | мм/мм | 500 |
| Толщина стенки трубы Wall thickness | мм/мм | 5 |
| Удельное сопротивление стали Specific resistance of steel | Ом·м/Ом·м | $2,45 \cdot 10^{-7}$ |
| Минимальный защитный потенциал трубы Minimum protective potential of the pipe | В/В | 0,3 |
| Расстояние между анодом и трубой Distance between the anode and the pipe | м/м | 220 |
| Удельное сопротивление грунта Ground resistivity | Ом·м/Ом·м | 24 |
| Длина анода Anode length | м/м | 28 |
| Диаметр стального сердечника анода Diameter of anode steel core | мм/мм | 32 |
| Внешний диаметр анода Outer diameter of the anode | мм/мм | 160 |
| Удельное сопротивление анодного наполнителя Anode filler resistivity | Ом·м/Ом·м | 0,01 |

Зависимости анодных и катодных токораспределений от продольных координат представлены на рис. 2.

Приведенные графики иллюстрируют особенности распределений плотности тока ($0,1\text{--}3,5 \text{ а/м}^2$) вдоль глубинного анода и защитного потенциала трубопровода ($0,3\text{--}0,4 \text{ В}$) при изменениях внешних условий: температура перекачиваемого продукта и окружающего грунта, наличие грунтовых вод, механические нагрузки и т. д. за период эксплуатации катодной защиты трубопроводных систем от 5 до 25 лет [27–29]. Из рис. 2, в частности, видно, что при уменьшении сопротивления изоляции для поддержания необходимого защитного потенциала трубопровода (в примере – 0,3 В) требуется увеличение тока катодной станции, следствием чего является рост плотности тока на границе «анод–грунт», что в свою очередь приводит к более интенсивному растворению анода с увеличением коэффициента электрохимического растворения с 2,72 до 4,2 кг/Агод [9].

Выводы

1. Оптимизация параметров электрического поля катодной защиты от коррозии трубопроводных систем позволяет устранить расхождения по значениям тока, сопротивлениям растеканию электрического поля и потенциалам между проектными и реальными значениями.
2. Разработана программа для проведения численных расчетов электрических полей в системах катодной защиты, которая дает возможность проводить вычислительные эксперименты для выбора геометрических и электрохимических параметров анодных заземлителей, позволяющих увеличить срок службы до 25 лет.
3. Компьютерные вычислительные эксперименты позволяют проводить исследования и расчеты по проектированию электрохимзащиты в более короткие сроки и с меньшими затратами.
4. Предложенная математическая модель электрического поля позволяет производить расчеты по определению сопротивления изоляции, защитного потенциала и плотности тока на границе «анод–грунт».

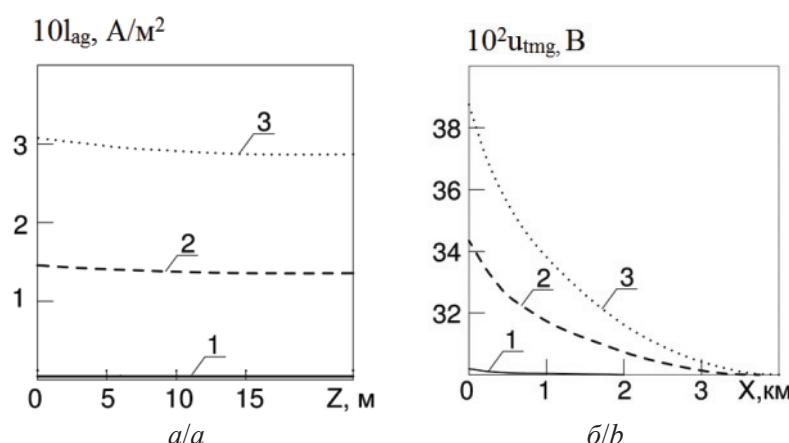


Рис. 2. Продольные распределения плотности тока на границе «анод–грунт» (а) и защитного потенциала на границе «грунт–труба» (б) при сопротивлениях изоляции трубопровода ($\text{Ом}\cdot\text{м}^2$): 1) 40000; 2) 2000; 3) 1000

Fig. 2. Longitudinal distribution of current density on «anode-ground» boundary (a) and protective potential on «ground-pipe» boundary (b) at pipeline insulation resistance ($\text{Ohm}\cdot\text{m}^2$): 1) 40000; 2) 2000; 3) 1000

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зенцов В.Н., Кузнецов М.В. Влияние электроосмоса на работу анодных заземлителей // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 1980. – № 4. – С. 8–9.
2. Optimization of the quantity, locations and output currents of anodes to improve cathodic protection effect of semi-submersible crane vessel / S.H. Xing, Y. Li, H.Q. Song, Y.G. Yan, M.X. Sun // Ocean engineering. – 2016. – V. 113. – P. 144–150. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.12.047.
3. Современные системы защиты от электрохимической коррозии подземных коммуникаций / Д.Л. Рахманкулов, М.В. Кузнецков, А.И. Габитов, В.Н. Зенцов, А.М. Кузнецков. – Уфа: Изд-во «Реактив», 1999. – 234 с.
4. Smyrl W.H. Experimental Application of Design Principles in Corrosion Research // Corrosion. – 1979. – V. 35. – № 4. – P. 170.
5. Stress Corrosion Cracking of Carbon Steel in Carbonate Solutions / J.M. Sutcliffe, R.R. Fessler, W.K. Boyd, R.N. Parkins // Corrosion. – 1972. – V. 28. – № 8. – P. 313.
6. Hewes F.W. Four Phenomena Affecting Cathodic Protection and Corrosion Rates // Materials Protection. – 1969. – V. 8. – № 9. – P. 67–71.
7. Технология производства заземлителей в коксовой оболочке / М.В. Кузнецков, В.И. Пауль, В.Н. Зенцов, Ф.Г. Тухбатуллин // Современные методы защиты подземных сооружений от коррозии: Материалы семинара. – Л., 1982. – С. 46–50.
8. Глубинный скважинный анодный заземлитель: пат. № 2210628 РФ. № 2002112558/02: заявл. 13.05.2002; опубл. 20.08.2003, Бюл. № 2.
9. Лапшакова И.В., Зенцов В.Н. О методах защиты заземленных сооружений от почвенной коррозии // Проблемы строительно-технической конференции. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2002. – С. 169–170.
10. O'Donnell I.P. Lower, Less Variable Power Needs Favor Deep Ground Beds // Oil and Gas Journal. – 1961. – V. 59. – № 8. – P. 117.
11. Hatley H.M. Cathodic Protection of pipelines: a deep hole ground-beds // Anti-Corrosion Methods and Materials. – 1968. – V. 15. – № 6. – P. 11–12.
12. Проблема аварийности катоднозащищенных трубопроводов / А.М. Кузнецков, В.Н. Зенцов, М.В. Кузнецков, Д.Л. Рахманкулов // Газовая промышленность. – 2001. – № 1. – С. 17–19.
13. Tosato F., Quaia S. Cathodic Protection of Extended Buried Conductor: a New Design Method // IEE Proceedings B – Electric Power Applications. – 1992. – V. 139. – № 5. – P. 443.
14. Deng B., Feng L.J., Yan A.J. Influence of different anodes on cathodic protection for grounding grid // Materials research innovations. – 2013. – V. 17. – P. 126–129. DOI: 10.1179/1432891713Z.000000000202.
15. Investigation on AC-Induced Corrosion Behavior and Product Film of X70 Steel in Aqueous Environment with Various Ions / H. Zhang, Y. Du, W. Li, M. Lu // Jinshu Xuebao/Acta Metallurgica Sinica. – 2017. – V. 53. – Iss. 8. – P. 975–982. DOI: 10.11900/0412.1961.2016.00566.
16. Bassey O., Bassey O.E., Ogedengbe A. Corrosion prevention, control and management: Asset integrity measures in downstream process facilities // New Challenges for a New Era: SPE International Conference and Exhibition on Oilfield Corrosion 2014. – Aberdeen, United Kingdom, 2014. – P. 39–62.
17. One-step synthesis of SnCo nanoconfined in hierarchical carbon nanostructures for lithium ion battery anode / J. Qin, D. Liu, X. Zhang, N. Zhao, C. Shi, E.-Z. Liu, F. He, L. Ma, Q. Li, J. Li, C. He // Nanoscale. – 2017. – V. 9. – Iss. 41. – P. 15856–15864. DOI: 10.1039/c7nr04786j.
18. Izadi M., Shahrbabi T., Ramezanzadeh B. Active corrosion protection performance of an epoxy coating applied on the mild steel modified with an eco-friendly sol-gel film impregnated with green corrosion inhibitor loaded nanocontainers // Applied Surface Science. – 2018. – V. 440. – P. 491–505. DOI: 10.1016/j.apusc.2018.01.185.
19. Application of cathodic protection with deep well anode technology to gas-pipeline network in anticorrosive engineering / S.-R. Fu, W.-H. Li, X.-J. Hao, Y.-L. Xu // Corrosion and Protection. – 2013. – V. 34. – Iss. 1. – P. 74–76.
20. Гилязов Т.Т. Методы предотвращения разрушения трубопровода от блуждающих токов // Новые технологии – нефтегазовому региону: Материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2017. – С. 170–172.
21. Александров О.Ю., Испурова Е.В., Агиней Р.В. Обзор результатов исследования влияния геомагнитно-индущированных токов на подземные магистральные нефтегазопроводы // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2017. – № 1. – С. 44–49.
22. Реализация методов оптимального регулирования режимов работы станций катодной защиты на действующем магистральном газопроводе / С.А. Никулин, Е.А. Спиринович, Р.В. Агиней, Е.Л. Карнавский // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2015. – № 3 (49). – С. 38–43.
23. Калицев Д.М., Ильин М.С., Кабанец А.А. Анализ методик расчета протекторной защиты магистральных трубопроводов // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире. – 2016. – № 14–1. – С. 162–167.
24. Рахманкулов Д.Л., Зенцов В.Н., Кузнецов М.В. Современная техника и технология защиты от коррозии (теория и практика). – М.: Интер, 2005. – 408 с.
25. Ткаченко В.Н. Анализ поля токов катодной защиты трубопроводной сети // Защита металлов. – 2006. – Т. 42. – № 5. – С. 132–135.
26. Математическая модель и алгоритм расчета электрического поля катодной защиты трубопровода протяженными анодами / А.М. Болотнов, Н.Н. Глазов, Н.П. Глазов, К.Л. Шамшетдинов, В.Д. Киселев // Защита металлов. – 2008. – Т. 44. – № 4. – С. 438–441.
27. Томашов Н.Д. Теория коррозии и защита металлов. – М.: АН СССР, 1959. – 592 с.
28. Pipeline integrity management through internal corrosion monitoring / A.R. Al-Shamari, A.W. Al-Mithin, S. Al-Sulaiman, J. Amer, S. Prakash // NACE – International Corrosion Conference Series. – 2014. – 13 p.
29. Janda D., Williams D. Lessons learned monitoring CP current from inside the pipe // Pipeline Pigging and Integrity Management Conference. – Houston, United States, 2014. – 15 p.

Поступила 29.05.2018 г.

Информация об авторах

Зенцов В.Н., доктор технических наук, профессор кафедры водоснабжения и водоотведения Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Болотнов А.М., доктор физико-математических наук, профессор кафедры высшей математики Башкирского государственного университета.

Удалова Е.А., доктор технических наук, профессор кафедры физической и органической химии Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Мазитова А.К., доктор химических наук, профессор кафедры прикладных и естественнонаучных дисциплин Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Лапшакова И.В., кандидат технических наук, доцент кафедры водоснабжения и водоотведения Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Райзер Ю.С., кандидат технических наук, доцент кафедры водоснабжения и водоотведения Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Маскова А.Р., кандидат технических наук, доцент кафедры прикладных и естественнонаучных дисциплин Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Васильева А.С., студент кафедры водоснабжения и водоотведения Уфимского государственного нефтяного технического университета.

UDC 519.688

OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF ELECTRIC FIELD OF GAS PRODUCT AND OIL PIPES CATHODIC PROTECTION

Vyacheslav N. Zentsov¹,

zencov.ugntu@yandex.ru

Anatoly M. Bolotnov²,

bolotnov@yandex.ru

Elena A. Udalova¹,

vakil2004@mail.ru

Aliya K. Mazitova¹,

elenaaaf@yandex.ru

Irina V. Lapshakova¹,

irvasya@rambler.ru

Julia S. Rayzer¹,

julia-2706@mail.ru

Albina R. Maskova¹,

asunasf@mail.ru

Anna S. Vasilyeva¹,

annavas96@mail.ru

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

² Bashkir State University,
32, Zaki Validi street, Ufa, 450076, Russia.

The relevance of the research is caused by discrepancies in design of cathodic protection of pipelines. Electric current, flowing from anodic protection to the ground, spreads there and then enters the protected pipeline polarizing its cathode. Certain assumptions are taken to describe the patterns of change imposed by the potential and strength of the polarizing current along the length of the pipeline at a cathodic protection. There are significant differences between design and actual parameters of protection in settlements of cathodic protection of pipelines.

The main aim of the research is to propose an algorithm for solving a boundary value problem for the potential of the electric field of cathodic protection of an underground pipeline by a vertical depth anode based on the method of fictitious sources.

Objects: gas and oil pipelines, for which protection against electrochemical corrosion is a necessary condition for ensuring an optimum period of their operation.

Methods. Based on the method of fictitious sources the authors have proposed the algorithm for solving the boundary-value problem for capacity of the electric field of cathodic protection of underground pipeline vertical deep anode. Application of the method is justified by the principle of electrostatic analogy for spatial task of electric field distribution.

Results. To apply the established relation to this problem in half, the method of mirror reflections is used additionally in the algorithm that allows transferring the task from half to space. The C++ computing code is developed for numerical calculations of electric fields in the systems of cathodic protection of pipelines via deep anodes subject to the restrictions on the electric potential of the protected structure and the density of current, flowing from the anode. The computer model allows conducting a set of numerical experiments for selection of geometric and electrochemical parameters of designed deep anode, to improve the reliability of cathodic protection for underground structures and increase the duration of their service life. The paper introduces the graphs illustrating the features of current density distributions along the depth of anode and the protective capacity of the pipeline, with changes in the external environment for a certain period of operation. It was shown that at decrease in insulation resistance the increase in cathodic station current is required for maintaining the necessary protective pipeline capacity. Current density at the «anode-ground» boundary increases that leads in its turn to more intensive anode dissolution. The paper introduces the examples of numerical results obtained based on real data conditions. The analysis of the results confirms the effectiveness, stability and versatility of the algorithm developed.

Key words:

Deep anode, cathodic protection, computer simulation, method of fictitious sources, potential, electric field, electric current.

REFERENCES

1. Zentsov V.N., Kuznetsov M.V. *Vliyanie elektroosmosa na rabotu anodnykh zazemliteley* [Influence of electroosmosis on anode earths operation]. *Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodordnogo syrya*, 1980, no. 4, pp. 8–9.
2. Xing S.H., Li Y., Song H.Q., Yan Y.G., Sun M.X. Optimization the quantity, locations and output currents of anodes to improve cathodic protection effect of semi-submersible crane vessel. *Ocean engineering*, 2016, vol. 113, pp. 144–150. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.12.047.
3. Rakhmankulov D.L., Kuznetsov M.V., Gabitov A.I., Zentsov V.N., Kuznetsov A.M. *Sovremennye sistemy zashchity ot elektrokhimicheskoy korrozii podzemnykh kommunikatsiy* [Modern systems of protection against electrochemical corrosion of underground communications]. Ufa, Reaktiv Publ., 1999. 234 p.
4. Smyrl W.H. Experimental Application of Design Principles in Corrosion Research. *Corrosion*, 1979, vol. 35, no. 4, pp. 170.
5. Sutcliffe J.M., Fessler R.R., Boyd W.K., Parkins R.N. Stress, Corrosion, Cracking of Carbon Steel in Carbonate Solutions. *Corrosion*, 1972, vol. 28, no. 8, pp. 313.
6. Hewes F.W. Four Phenomena Affecting Cathodic Protection and Corrosion Rates. *Mater. Protect.*, 1969, vol. 8, no. 9, pp. 67–71.
7. Kuznetsov M.V., Paul V.I., Zentsov V.N., Tukhbataliin F.G. Tekhnologiya proizvodstva zazemliteley v koksovoy obolochke [Technology of production of earthing switches in the coke shell]. «Sovremennye metody zashchity podzemnykh sooruzheniy ot korrozii. Materialy seminara» [Modern methods of protecting underground structures from corrosion. Materials of the seminar]. Leningrad, 1982. pp. 46–50.
8. Zentsov V.N., Akulshin M.D., Kuznetsov A.M., Lapshakova I.V. *Glubinny shvazhinny anodny zazemlitel* [Deep Well Anode Grounding Device]. Patent RF, no. 2210628, 2002.
9. Lapshakova I.V., Zentsov V.N. O metodakh zashchity zazemlenykh sooruzheniy ot pochvennoy korrozii [About methods of protection of grounded constructions from ground corrosion]. *Problemy stroitel'nogo kompleksa Rossii. Materialy VI Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii* [Problems of a building complex of Russia. Proc. of the VI International scientific and technical conference]. Ufa, UGNTU Publ. house, 2002. pp. 169–170.
10. O'Donnell I.P. Lower, Less Variable Power Needs Favor Deep Ground Beds. *Oil and Gas Journal*, 1961, vol. 59, no. 8, pp. 117.
11. Hatley H.M. Cathodic Protection of pipelines: a deep hole ground-beds. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 1968, vol. 15, no. 6, pp. 11–12.
12. Kuznetsov A.M., Zentsov V.N., Kuznetsov M.V., Rakhmankulov D.L. Problema avariynosti katodnozashchishchenykh truboprovodov [Problem of failure rate of cathodically protected pipelines]. *Gazovaya promyshlennost*, 2001, no. 1, pp. 17–19.
13. Tosato F., Quaia S. Cathodic Protection of Extended Buried Conductor: a New Design Method. *IEE Proceedings B – Electric Power Applications*, 1992, vol. 139, no. 5, pp. 443.
14. Deng B., Feng L.J., Yan A.J. Influence of different anodes on cathodic protection for grounding grid. *Materials research innovations*, 2013, vol. 17, pp. 126–129. DOI: 10.1179/1432891713Z.000000000202.
15. Zhang H., Du Y., Li W., Lu M. Investigation on AC-Induced Corrosion Behavior and Product Film of X70 Steel in Aqueous Environment with Various Ions. *Jinshu Xuebao/Acta Metallurgica Sinica*, 2017, vol. 53, Iss. 8, pp. 975–982. DOI: 10.11900/0412.1961.2016.00566
16. Bassey O., Bassey O.E., Ogedengbe A. Corrosion prevention, control and management: Asset integrity measures in downstream process facilities. *SPE International Conference and Exhibition on Oilfield Corrosion 2014. New Challenges for a New Era*. Aberdeen, United Kingdom, 2014. pp. 39–62.
17. Qin J., Liu D., Zhang X., Zhao N., Shi C., Liu E.-Z., He F., Ma L., Li Q., Li J., He C. One-step synthesis of SnCo nanoconfined in hierarchical carbon nanostructures for lithium ion battery anode. *Nanoscale*, 2017, vol. 9, Iss. 41, pp. 15856–15864. DOI: 10.1039/c7nr04786j.
18. Izadi M., Shahrbabi T., Ramezanzadeh B. Active corrosion protection performance of an epoxy coating applied on the mild steel modified with an eco-friendly sol-gel film impregnated with green corrosion inhibitor loaded nanocontainers. *Applied Surface Science*, 2018, vol. 440, pp. 491–505. DOI: 10.1016/j.apusc.2018.01.185.
19. Fu S.-R., Li W.-H., Hao X.-J., Xu Y.-L. Application of cathodic protection with deep well anode technology to gas-pipeline network in anticorrosive engineering. *Corrosion and Protection*, 2013, vol. 34, Iss. 1, pp. 74–76.
20. Gilyazov T.T. Metody predotvratshcheniya razrusheniya truboprovoda ot bluzhdayushchikh tokov [Methods for preventing the destruction of the pipeline from stray currents]. *Novye tekhnologii – neftegazovomu region. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [New technologies for oil and gas region. Proc. of the International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists]. Tyumen, Tyumen Industrial University Press, 2017. pp. 170–172.
21. Aleksandrov O.Yu., Isupova E.V., Aginey R.V. Review of the results of the study of geomagnetically induced currents influence on underground oil and gas pipelines. *Zashchita okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse*, 2017, no. 1, pp. 44–49. In Rus.
22. Nikulin S.A., Spiridovich E.A., Aginey R.V., Karnavskiy E.L. Realization of methods for optimal control of operating modes of cathodic protection stations on the existing main gas pipeline. *Truboprovodny transport: teoriya i praktika*, 2015, no. 3 (49), pp. 38–43. In Rus.
23. Kalitsev D.M., Ilin M.S., Kabanets A.A. Analysis of methods for calculating the tread protection of pipelines. *Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya v sovremennom mire*, 2016, no. 14–1, pp. 162–167. In Rus.
24. Rakhmankulov D.L., Zentsov V.N., Kuznetsov M.V. *Sovremennaya tekhnika i tekhnologiya zashchity ot korrozii (teoriya i praktika)* [Modern equipment and technology of protection against corrosion (theory and practice)]. Moscow, Inter Publ., 2005. 408 p.
25. Tkachenko V.N. Analiz polya tokov katodnoy zashchity truboprovodnoy seti [Analysis of the field of currents of cathodic protection of a pipeline network]. *Zashchita metallov*, 2006, vol. 42, no. 5, pp. 132–135.
26. Bolotnov A.M., Glazov N.N., Glazov N.P., Shamshetdinov K.L., Kiselev V.D. Matematicheskay model i algoritm rascheta elektricheskogo polya katodnoy zashchity truboprovoda protivazhennyimi anodami [Mathematical model and algorithm for computing the electric field of pipeline cathodic protection with extended anodes]. *Protection of Metals*, 2008, vol. 44, no. 4, pp. 408–411.
27. Tomashov N.D. *Teoriya korrozii i zashchity metallov* [Theory of Corrosion and Protection of Metals]. Moscow, AN SSSR Publ., 1959. 592 p.
28. Al-Shamari A.R., Al-Mithin A.W., Al-Sulaiman S., Amer J., Prakash S. Pipeline integrity management through internal corrosion monitoring. *NACE – International Corrosion Conference Series*, 2014. pp. 13.
29. Janda D., Williams D. Lessons learned monitoring CP current from inside the pipe. *Pipeline Pigging and Integrity Management Conference*. Houston, United States, 2014. 15 p.

Received: 29 May 2018.

Information about the authors

Vyacheslav N. Zentsov, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University.

Anatoly M. Bolotnov, Dr. Sc., professor, Bashkir State University.

Elena A. Udalova, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University.

Aliya K. Mazitova, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University.

Irina V. Lapshakova, Cand. Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technological University.

Julia S. Rayzer, Cand. Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technological University.

Albina R. Maskova, Cand. Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technological University.

Anna S. Vasilyeva, student, Ufa State Petroleum Technological University.

УДК 621.311.238; 621.311.22

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СХЕМЫ ПАРОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ С КОМБИНАЦИЕЙ ТРЕХ ЦИКЛОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КПД ПРИ РАБОТЕ В СЕВЕРНЫХ ГАЗОДОБЫВАЮЩИХ РАЙОНАХ

Галашов Николай Никитович¹,

gal@tpu.ru

Цибульский Святослав Анатольевич¹,

stzibulsky@tpu.ru

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

Актуальность. Парогазовые установки рассматриваются как одно из перспективных направлений развития теплоэнергетических установок, работающих на природном газе. Интерес к их внедрению в России объясняется большими запасами природного газа, низкими капиталовложениями и минимальными выбросами вредных веществ в окружающую среду. Из термодинамики известно, что для достижения высокого КПД цикла необходимо иметь высокую температуру подвода теплоты и низкую температуру ее отвода, а также обеспечить работу оборудования с минимальными внутренними потерями и иметь рациональную тепловую схему взаимосвязи оборудования в цикле. На современном этапе максимальная температура подвода теплоты в камере горения газотурбинной установки при существующих конструкционных материалах и способах охлаждения элементов турбины достигла 1600 °C, а температура отвода теплоты в конденсаторе при работе цикла Ренкина на воде по условиям экономичности не может быть ниже 15 °C. При этих условиях на наиболее совершенных трехконтурных парогазовых установках с промежуточным перегревом пара достигнут электрический КПД 63 %. Для цикла Ренкина при работе на воде температура конденсации пара по условию замерзания должна быть выше 0 °C. Для парогазовой установки при работе в условиях низких среднегодовых температур окружающей среды, что характерно для России и особенно отдаленных северных районов добычи газа, можно отводить теплоту в цикле Ренкина значительно ниже 0 °C, но это надежно можно выполнить только применяя конденсаторы с воздушным охлаждением, если в качестве рабочего тела в цикле Ренкина использовать органическое рабочее тело. Недостатком современных органических рабочих тел является низкая предельная температура их термического разложения, которая составляет 300...400 °C.

Объект: парогазовые установки с циклами на трех рабочих телах, где верхний цикл Брайтона работает на продуктах горения природного газа, средний – цикл Ренкина – работает на воде и водяном паре в интервале температур 100...650 °C, а нижний – Органический цикл Ренкина – работает на органических рабочих телах в интервале температур -30...250 °C.

Цель: выбор рациональной технологической схемы парогазовой установки с применением циклов на трех рабочих телах и воздушного конденсатора для возможности надежного отвода теплоты от органического рабочего тела при температуре ниже 0 °C и определение оптимальных параметров циклов.

Методы. Сложные теплоэнергетические системы, включая парогазовые установки, характеризуются многообразием процессов, протекающих в их элементах. Такие установки можно эффективно исследовать только с помощью методов математического моделирования и оптимизации. При проведении исследований в данной работе использован системный подход, методы энергетических балансов и расчет термодинамических и теплофизических параметров рабочих тел с помощью современных сертифицированных программ.

Результаты. Разработана оригинальная схема парогазовой установки утилизационного типа с циклами на трех рабочих телах, где верхний цикл Брайтона работает на продуктах горения природного газа, средний цикл Ренкина работает на воде и водяном паре, нижний – Органический цикл Ренкина – работает на органическом рабочем теле с конденсацией его в воздушном конденсаторе. Разработана математическая модель и программа расчета предложенной схемы. Определено наиболее эффективное органическое рабочее тело для нижнего цикла Ренкина. Проведен параметрический анализ влияния основных параметров циклов на КПД брутто и нетто парогазовой установки.

Ключевые слова:

Парогазовая установка, органическое рабочее тело, Органический цикл Ренкина, воздушный конденсатор, математическое моделирование.

Введение

На современном этапе развития электроэнергетики России до 70 % электроэнергии производится на основе сжигания природного газа, при этом наиболее совершенными электрогенерирующими установками являются парогазовые установки (ПГУ) утилизационного типа с котлом-utiлизатором [1, 2]. За счет низких капитальных затрат, высокого КПД, низких выбросов вредных веществ в окружающую среду, небольшого потребления воды для технологического процесса ПГУ позволяют решить большой ряд экономических и экологических проблем в энергетике [3]. ПГУ являются ком-

бинацией двух энергетических установок: газотурбинной (ГТУ) и паротурбинной (ПТУ). При этом главную роль играет ГТУ, так как в ПГУ утилизационного типа на ней вырабатывается до 2/3 мощности, а для получения высоких КПД необходимо иметь высокую температуру газов перед турбиной. Современные мощные энергетические ГТУ фирм General Electric, Siemens, Mitsubishi при температуре перед газовой турбиной 1500–1600 °C имеют КПД выше 40 % [4].

КПД ПТУ зависит от тепловой схемы (одно, двух или трехконтурная), от температуры пара перед паровой турбиной, а также от температуры от-

вода тепла в конденсаторе. Для современных мощных ГТУ температура уходящих газов достигла 600...640 °C, что позволяет иметь температуру пара перед паровой турбиной 560...600 °C. Увеличение этой температуры связано с существенным удешевлением ГТУ и ПТУ и снижением их надежности и маневренности. Температура отвода тепла в конденсаторе при работе ПТУ на водяном паре ограничена температурой замерзания воды – 0 °C, а из-за экономических условий она обычно не ниже 20 °C. В Северных районах России, где в зимнее время температура воздуха до 8 месяцев ниже 0...–20 °C, можно уменьшить температуру отвода тепла в цикле Ренкина, если вместо охлаждаемых водой применять конденсаторы с воздушным охлаждением, а в качестве рабочего тела – органические вещества, не замерзающие при температурах ниже 0 °C, которые применяются в органическом цикле Ренкина (ОЦР). Но органические рабочие тела (OPT) разрушаются при температурах выше 300...400 °C. Поэтому предложена ПГУ на основе трех циклов: верхний – газотурбинный цикл Брайтона, средний – одноконтурный паротурбинный цикл Ренкина, и нижний – ОЦР. Применение OPT, не замерзающих при температурах до –50 °C, позволяет повысить КПД цикла, надежность работы воздушного конденсатора, а также уменьшить габариты турбины и конденсатора.

Применяемые в ПГУ на современном этапе ГТУ, работающие на основе цикла Брайтона, и ПТУ – на основе пароводяного цикла Ренкина хорошо описаны в [1, 2]. Большой интерес представляет применение ОЦР при совместной работе в комплексе с циклами Брайтона и Ренкина на водяном паре.

Опубликовано большое число работ по оптимизации параметров ОЦР и выбору рабочих тел для него [5–10]. В настоящее время имеется большой список рабочих тел для применения в ОЦР и выбор из них наилучшего для данных условий применения цикла является актуальной задачей.

В [11–14] предложено применять двойные циклы Ренкина, что позволяет оптимизировать параметры и использовать разные рабочие тела. Так, в [11] предлагается применять r1234yf, r1234ze, пентан, бутан, толуол, циклогексан, цикlopентан. Показано, что при правильном выборе рабочих тел рост эффективности может составить около 33 %. В [12] приведен термоэкономический анализ газовой турбины и парогазовой установки с двумя турбинами на CO₂ и промежуточным масляным контуром. Необходимо отметить, что в этой установке конденсация CO₂ возможна только в нижнем цикле, а для передачи теплоты от верхнего цикла к нижнему необходим газо-газовый теплообменник с низким коэффициентом теплопередачи больших размеров. В [13] рассмотрена установка при работе двух турбин на R124, R134a, R245fa, R600, R600a и R1234yf, при этом наилучшие результаты получены при работе на R245fa и R600.

В [14] проведен термоэкономический анализ и многоцелевая оптимизация комбинированного цикла с турбинами: газовой, паровой и на органическом рабочем теле. Недостатком этого цикла на трех рабочих телах является то, что паровая турбина и турбина органического цикла Ренкина имеют конденсаторы, из которых теплота конденсации отводится в окружающую среду. Также недостатком является то, что в ОЦР применен конденсатор с водяным охлаждением, температура конденсации в котором не может быть ниже 15 °C. Как показано в [15, 16], более экономичной является схема, когда в цикле паровой турбины нет конденсатора, а конденсация пара происходит в испарителе OPT и вся теплота конденсации пара передается рабочему телу нижнего цикла, в этом случае паровой цикл Ренкина не имеет внешней потери теплоты. А отвод теплоты в окружающую среду в значительно меньшем количестве есть только в конденсаторе ОЦР, особенно, если применить конденсатор с воздушным охлаждением, отводить из него теплоту можно при температурах конденсации значительно ниже 0 °C.

В работе [17] рассмотрена тепловая схема ПГУ тройного цикла с современной мощной ГТУ и паровым и органическим циклом Ренкина. Показано, что при низких температурах наружного воздуха можно получить КПД нетто до 63 %. К недостаткам этой схемы следует отнести применение промежуточного перегрева в паровом цикле, так как он уменьшает расход пара на турбину, из-за уменьшения теплоты, идущей на парообразование, а также усложняется схема ПГУ и снижается маневренность установки.

В [18] рассмотрена более простая схема ПГУ с одноконтурным пароводяным и органическим циклом Ренкина с воздушным конденсатором. Показано, что КПД этой схемы существенно зависит от выбора рабочего тела. Наибольший КПД получен для пентана. Недостатком этой схемы является то, что при высокой температуре рабочего тела на входе в котел-utiлизатор будет высокой температурой уходящих газов, в результате чего не будет полностью использован тепловой потенциал уходящих газов.

Из проведенного анализа следует, что для получения высоких КПД актуальны вопросы по выбору оптимальной схемы ПГУ с полным использованием теплоты уходящих газов в котле-utiлизаторе и минимальными потерями тепла в конденсаторе, а также выбор наиболее эффективных рабочих тел для циклов ПТУ.

Целью настоящей работы является выбор рациональной технологической схемы ПГУ с применением циклов на трех рабочих телах и воздушного конденсатора для возможности надежного отвода теплоты от органического рабочего тела при температуре ниже 0 °C, а также выбор OPT для ОЦР и определение оптимальных параметров циклов ПТУ при работе на водяном паре и OPT.

Схема и циклы работы парогазовой установки

Для исследований ПГУ с тремя циклами была разработана оригинальная схема (рис. 1), в которой обеспечивается низкая температура уходящих газов в котле-утилизаторе и низкая температура отвода теплоты в конденсаторе с воздушным охлаждением.

На рис. 2 в TS-диаграмме приведены процессы, протекающие в оборудовании схемы ПГУ. На рис. 2, а показаны процессы всех циклов, а на рис. 2, б представлены процессы в ОЦР, которые сложно понять на рис. 2, а.

ПГУ работает следующим образом. В верхнем цикле Брайтона в компрессоре ВК атмосферный воздух в адиабатном процессе 1–2 сжимается до давления в камере сгорания КС, при этом увеличивается его температура. В камеру сгорания дожимными компрессорами (не показаны на схеме) подается топливо, в результате его горения в изобарном процессе 2–3 подводится теплота и обеспечивается высокая температура продуктов сгорания топлива T_3 перед газовой турбиной (ТГ). В газовой турбине в адиабатном процессе 3–4 продукты сгорания со-

вершают работу и с температурой T_4 поступают в котел-утилизатор (КУ), в котором проходят через пароперегреватель (ПП), испаритель (И), экономайзер (ЭК) и газовый подогреватель (ГПОРТ), после чего с температурой уходящих газов $T_{yx} = T_{27}$ отводятся в дымовую трубу. В результате передачи теплоты в КУ температура дымовых газов в изобарном процессе снижается до состояний за ПП 24, за И 25, за ЭК 26 и за ГПОРТ 27.

В среднем цикле Ренкина конденсат пара из испарителя (ИОРТ) сжимается в адиабатном процессе 7–8 питательным насосом (НПВ) и подает в экономайзер (ЭК), где в изобарном процессе 8–9 нагревается до температуры на 8...10 К ниже, чем температура насыщения при давлении в барабане (Б), и идет в барабан. В испарителе (И) образуется пароводяная смесь, которая поступает в барабан (Б), а из него насыщенный пар идет в пароперегреватель (ПП), где в изобарном процессе 12–5 перегревается и поступает в турбину (ТП), в которой в адиабатном процессе 5–6 совершает работу и уходит в испаритель (ИОРТ), где в изобарном процессе 6–7 конденсируется и передает тепло ОРТ.

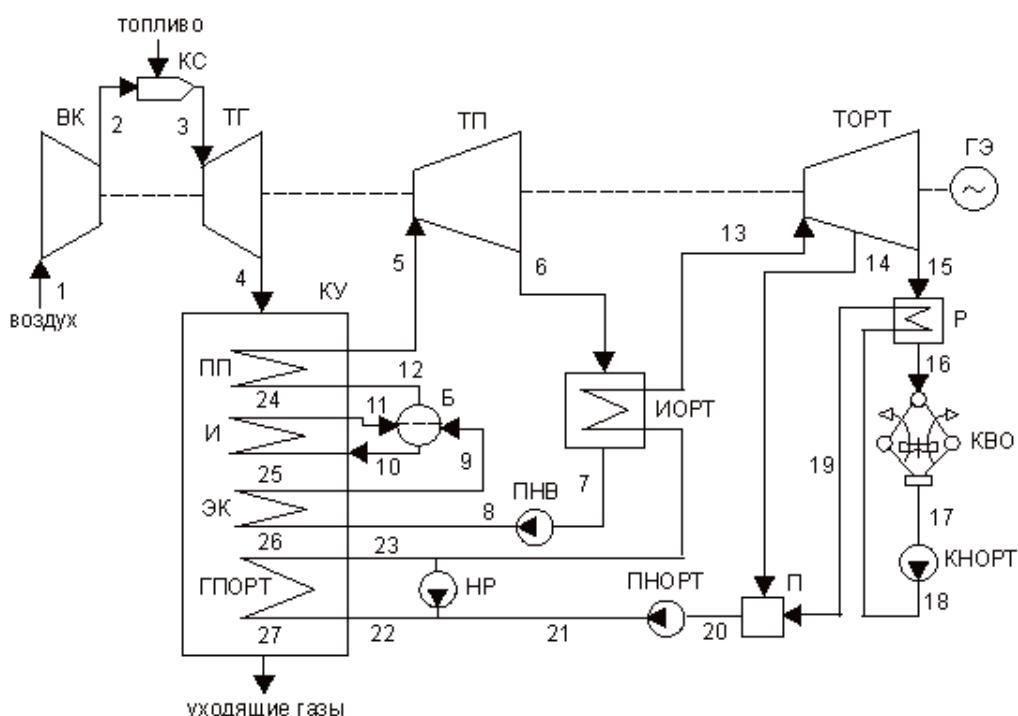


Рис. 1. Принципиальная тепловая схема ПГУ: К – компрессор, КС – камера сгорания, ТГ – турбина газовая, КУ – котел-утилизатор, ТП – турбина паровая, ТОРТ – турбина ОРТ, ПП – пароподогреватель, И – испаритель, Б – барабан, ЭК – экономайзер, ГЛОРТ – газовый подогреватель конденсата ОРТ, ИОРТ – испаритель ОРТ, ПНВ – питательный насос воды, Р – рекуператор ОРТ, КВО – конденсатор воздушного охлаждения, КНОРТ – конденсатный насос ОРТ, ГЭ – генератор электрического тока, НР – насос рециркуляции ОРТ, ПНОРТ – питательный насос ОРТ, П – регенеративный подогреватель ОРТ

Fig. 1. Cycle diagram of combine cycle gas turbine (CCGT): К (C) – compressor, KC (CC) – combustion chamber, ТГ (GT) – gas turbine, КУ (HRSG) – heat recovery steam generator, ТП (HPST) – high pressure steam turbine, ТОПТ (LPST) – low pressure steam turbine, ПП (SH) – superheater, И (EV) – evaporator, Б (D) – drum, ЭК (EC) – economizer, ГПОПТ (GH OWF) – gas heater organic working fluid, ИОПТ (EV OWF) – evaporator organic working fluid, ПНВ (WFP) – water feed pump, Р (R OWF) – recuperator organic working fluid, КБО (AC) – air condenser, КНОПТ (CP OWF) – condensate pump organic working fluid, ГЭ (EG) – electric generator, НР (RP OWF) – recirculation pump organic working fluid, ПНОПТ (FP OWF) – feed pump organic working fluid, П (RH OWF) – regenerative heater organic working fluid

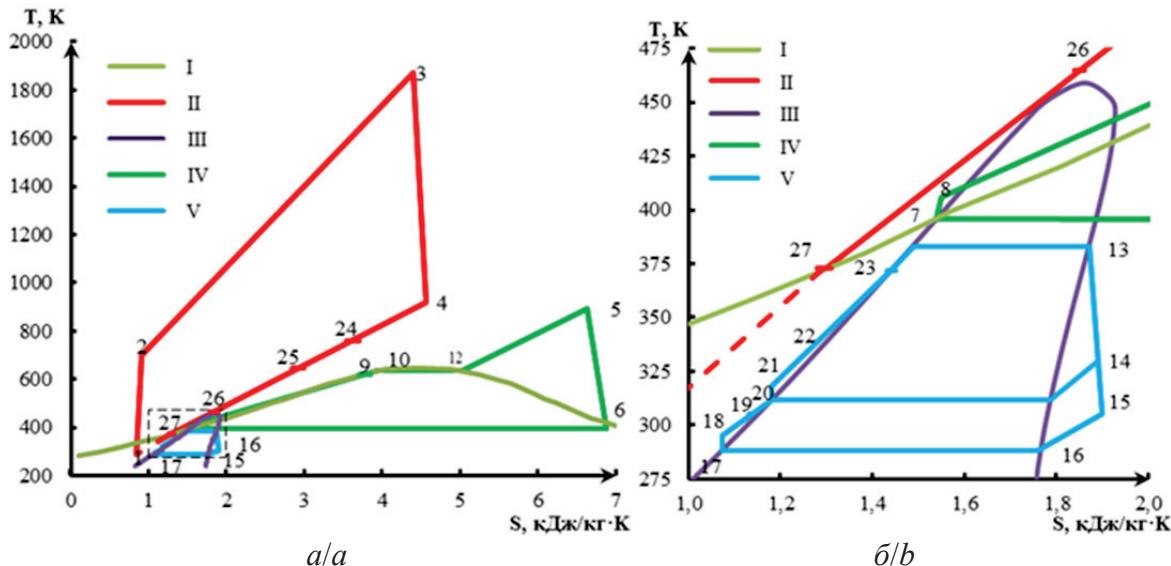


Рис. 2. Циклы ПГУ в TS-диаграмме: а) циклы ПГУ; б) ОЦР; числами обозначены точки, представленные на рис. 1; I – линии насыщения для воды и водяного пара, II – цикл ГТУ и отвода тепла от уходящих газов в КУ, III – линии насыщения для R365mfc, IV – цикл Ренкина на водяном паре, V – ОЦР

Fig. 2. TS-diagram of CCGT cycles: a) cycles of CCGT; b) cycle of Organic Rankine cycle (ORC); the numbers denote the points shown in Fig. 1; I – saturation line for water and water steam, II – Gas turbine unit (GTU) cycle and heat removal from flue gases in heat recovery steam generator (HRSG), III – saturation line of R365mfc, IV – Rankine cycle on water steam, V – ORC

В нижнем цикле (ОЦР) в испарителе (ИОРТ) в изобарном процессе 23–13 испаряется органическое рабочее тело при температуре насыщения, которая на 8...12 °С ниже температуры конденсации пара, и идет в турбину ТОРТ, где в адиабатном процессе 13–14–15 совершает работу и через рекуператор (Р) уходит в конденсатор воздушного охлаждения (КВО), в котором в изобарном процессе 16–17 конденсируется. Температура конденсации принимается на 10...15 °С выше температуры охлаждающего воздуха. Из конденсатора конденсат ОРТ насосом (КНОРТ) через рекуператор (Р) подается в ГПОРТ. В рекуператоре (Р) конденсат ОРТ подогревается в изобарном процессе 18–19 при охлаждении пара ОРТ в изобарном процессе 15–16. По нормам работы котлов-utiлизаторов для предотвращения низкотемпературной коррозии рабочее тело перед подачей в котел должно иметь температуру не ниже 60 °С. В данной схеме для подогрева ОРТ перед ГПОРТ возможны два способа – либо с помощью насоса рециркуляции (НР), либо подогревом в смешивающем подогревателе (П) паром из отбора 14 турбины ТОРТ. Подача конденсата ОРТ из подогревателя (П) в газовый подогреватель (ГПОРТ) производится питательным насосом (ПНОРТ) в адиабатном процессе 20–21. Мощность турбин ТГ, ТП, ТОРТ по общему валу передается в электрический генератор (ГЭ).

Математическая модель

Модель расчета схемы ПГУ представляет систему уравнений, характеризующих: процессы в оборудовании газотурбинной установки, в паровой и

ОРТ турбине, в компрессоре и насосах, а также уравнения материальных и энергетических балансов в теплообменном оборудовании.

Так как ряд рабочих тел (воздух, дымовые газы) представляют смеси различных веществ, чтобы упростить анализ были сделаны следующие допущения:

- оборудование работает в стационарном режиме;
- предполагается, что воздух и дымовые газы являются идеальными газовыми смесями;
- предполагается, что воздух состоит из 79 % N₂ и 21 % O₂;
- дымовые газы состоят из смеси воздуха, CO₂ и H₂O;
- топливом является природный газ, состоящий в основном из метана;
- давление окружающей среды $p_1=0,1013$ МПа;
- температура окружающей среды может меняться от -35 до 35 °С;
- температура воздуха на входе воздушного компрессора ГТУ поддерживается постоянной, $T_1=15$ °С.

Термодинамические и теплофизические параметры воздуха, продуктов сгорания топлива, воды, водяного пара и ОРТ определяются по функциям библиотеки «REFPROP» [19].

1. Модель цикла Брайтона

Температура на выходе компрессора

$$T_2=T_1(1+1/\eta_k(\varepsilon^m-1)), \quad (1)$$

где $\eta_k=0,92$ – изоэнтропийный КПД компрессора; $\varepsilon=p_2/p_1$ – степень повышения давления в компрессоре; $m=(k-1)/k$, где k – коэффициент адиабаты воздуха.

Эффективная мощность, подведенная от вала к воздуху в компрессоре, кВт

$$N_{\text{к}} = G_{\text{в}}(h_2 - h_1) / \eta_{\text{м}}, \quad (2)$$

где $G_{\text{в}}$ – расход воздуха, кг/с; h_1 , h_2 – энталпии воздуха на входе и выходе компрессора, определяются по давлениям и температурам в соответствующих точках цикла, кДж/кг; $\eta_{\text{м}}=0,98$ – механический КПД компрессора.

Тепловой баланс камеры сгорания

$$(G_{\text{в}}h_2 + BQ_{\text{н}})\eta_{\text{кС}} = G_{\text{г}}h_3, \quad (3)$$

где B – расход топлива, кг/с; $Q_{\text{н}}$ – низшая теплота сгорания, кДж/кг; $\eta_{\text{кС}}$ – КПД камеры сгорания; $G_{\text{г}}=G_{\text{в}}+B$ – расход дымовых газов; h_3 – энталпия газов на выходе из КС, определяется по давлению p_3 и температуре T_3 (задается), где $p_3=p_2-\Delta p_{\text{КС}}$, где $\Delta p_{\text{КС}}=0,05p_2$ – потери давления в КС.

Тепловая мощность, подведенная при сжигании топлива в КС, кВт: $Q_{\text{КС}}=BQ_{\text{н}}$.

Температура газов на выходе из газовой турбины

$$T_4 = T_3(1 - 1/\eta_{\text{ГТ}}(\varepsilon_1^{m_1} - 1)), \quad (4)$$

где $\eta_{\text{ГТ}}=0,9$ – изоэнтропийный КПД газовой турбины; $\varepsilon_1=p_3/p_4$ – степень повышения давления в газовой турбине, где $p_4=p_1+\Delta p_{\text{ку}}$, где $\Delta p_{\text{ку}}=0,05p_1$ – потери давления в котле-утилизаторе; $m_1=(k_1-1)/k_1$, где k_1 – коэффициент адиабаты продуктов сгорания топлива с воздухом.

Эффективная мощность газовой турбины, кВт

$$N_{\text{ГТ}} = G_{\text{г}}(h_3 - h_4)\eta_{\text{м}}, \quad (5)$$

где h_4 – энталпия газов на выходе из газовой турбины, определяется по давлению p_4 и температуре T_4 ; $\eta_{\text{м}}$ – механический КПД.

Эффективная мощность цикла ГТУ, кВт

$$N_{\text{ГТУ}} = N_{\text{ГТ}} - N_{\text{к}}. \quad (6)$$

2. Модель парового цикла Ренкина

Расход пара, поступающего в паровую турбину, определяется на основе решения уравнения теплового баланса системы ПП–И в КУ (рис. 1)

$$D_{\text{п}}(h_5 - h_9) = G_{\text{г}}(h_4 - h_{25}), \quad (7)$$

где h_5 – энталпия пара на выходе из ПП, определяется по давлению p_5 , которое задается, и по температуре T_5 , которая определяется как $T_5=T_4-\theta_5$, где θ_5 принимается 20...40 К; для определения энталпий h_9 и h_{25} необходимо определить давление в барабане как $p_{\text{Б}}=1,2p_5$, по нему определить температуру насыщения в барабане $T_{\text{Б}}$. Температура воды на входе в барабан $T_9=T_{\text{Б}}-\theta_9$, где $\theta_9=5$ К, а температура газа за И $T_{25}=T_{\text{Б}}+\theta_{\text{И}}$, где $\theta_{\text{И}}=10$ К. Энталпия h_9 определяется по T_9 и $p_{\text{Б}}$, а h_{25} по T_{25} и p_4 . По $T_{\text{Б}}$ определяются энталпия кипящей воды h_{10} и энталпия сухого насыщенного пара h_{12} .

Энталпия дымовых газов в точке 24 h_{24} определяется из уравнения теплового баланса ПП

$$D_{\text{п}}(h_5 - h_{12}) = G_{\text{г}}(h_4 - h_{24}). \quad (8)$$

Энталпия пароводяной смеси в точке 11 h_{11} определяется из уравнения теплового баланса И

$$D_{\text{п}}(h_{11} - h_{10}) = G_{\text{г}}(h_{24} - h_{25}). \quad (9)$$

Энталпия пара на выходе из паровой турбины h_6 определяется по давлению за турбиной p_6 , которое

задается, и процессу расширения в турбине, для этого определяется энтропия s_5 по T_5 и p_5 , а по s_5 и p_6 определяется энталпия в конце изоэнтропийного процесса расширения в турбине h_{6s} . Энталпия $h_6=h_5-(h_5-h_{6s})\eta_{\text{пп}}$, где $\eta_{\text{пп}}$ – внутренний относительный КПД паровой турбины. Энталпия кипящей воды на выходе ИОРТ h_7 определяется по давлению p_6 . Энталпия воды за ПНВ $h_8=h_7+\Delta h_{\text{ПНВ}}$, где повышение энталпии в ПНВ $\Delta h_{\text{ПНВ}}=(1,3p_{\text{Б}}-p_6)v_{\text{н}}/\eta_{\text{н}}$, где $v_{\text{н}}$ – удельный объем воды в насосе; $\eta_{\text{н}}=0,8$ – КПД насоса.

Энталпия дымовых газов за ЭК h_{26} определяется из теплового баланса

$$D_{\text{п}}(h_9 - h_8) = G_{\text{г}}(h_{25} - h_{26}). \quad (10)$$

Эффективная мощность паровой турбины, кВт

$$N_{\text{пп}} = D_{\text{п}}(h_5 - h_6)\eta_{\text{м}}. \quad (11)$$

3. Модель органического цикла Ренкина

Расход пара, поступающего в турбину ТОРТ, определяется на основе решения уравнения теплового баланса ИОРТ (рис. 1)

$$D_{\text{ОРТ}}(h_{13} - h_{23}) = D_{\text{п}}(h_6 - h_7)\eta_{\text{ИОРТ}}, \quad (12)$$

где h_{13} – энталпия сухого насыщенного пара ОРТ на выходе ИОРТ, определяется по температуре T_{13} , которая определяется как $T_{13}=T_7-\theta_{\text{ИОРТ}}$, где $\theta_{\text{ИОРТ}}$ принимается 10 К; энталпия h_{23} определяется из теплового баланса ГПОРТ

$$(D_{\text{ОРТ}} + D_{\text{Р}})(h_{23} - h_{22}) = G_{\text{г}}(h_{26} - h_{27}), \quad (13)$$

где $D_{\text{Р}}$ – расход ОРТ через НР при подогреве ОРТ перед ГПОРТ путем рециркуляции, при подогреве ОРТ в П $D_{\text{Р}}=0$; h_{22} – энталпия ОРТ на входе в ГПОРТ, определяется по заданной температуре 60 °С и давлению p_{21} за ПНОРТ, которое определяется как $1,3p_{13}$; давление p_{13} определяется как давление насыщения по температуре T_{13} ; энталпия h_{27} определяется по давлению p_4 и температуре уходящих дымовых газов, которая принимается 100...120 °С.

Расход $D_{\text{Р}}$ определяется из теплового баланса

$$(D_{\text{ОРТ}} + D_{\text{Р}})h_{22} = D_{\text{Р}}h_{23} + D_{\text{ОРТ}}h_{21}, \quad (14)$$

где $h_{21}=h_{20}+\Delta h_{\text{ПНОРТ}}$, $\Delta h_{\text{ПНОРТ}}=(p_{21}-p_{20})v_{\text{н}}/\eta_{\text{н}}$,

Давление в КВО $p_{16}=p_{17}$ определяется по температуре насыщения в конденсаторе $T_{\text{к}}$, которая принимается на 10...15 К выше температуры охлаждающего воздуха. Температура пара ОРТ за Р $T_{16}=T_{\text{к}}+5$ К. По T_{16} и p_{16} определяется h_{16} .

Энталпия кипящей жидкости ОРТ h_{17} определяется по $T_{\text{к}}$. Энталпия $h_{18}=h_{17}+\Delta h_{\text{КНОРТ}}$, $\Delta h_{\text{КНОРТ}}=(p_{18}-p_{17})v_{\text{н}}/\eta_{\text{н}}$, где $p_{18}=1,3p_{20}$. Давление за ТОРТ $p_{15}=1,1p_{16}$. Давление в отборе ТОРТ $p_{14}=1,05p_{20}$.

Энталпия пара на выходе из турбины ТОРТ h_{15} определяется по давлению за турбиной p_{15} и процессу расширения в турбине, для этого определяется энтропия s_{13} по T_{13} и p_{13} , а по s_{13} и p_{15} определяется энталпия в конце изоэнтропийного процесса расширения в турбине h_{15s} . Энталпия $h_{15}=h_{13}-(h_{13}-h_{15s})\eta_{\text{ТОРТ}}$, где $\eta_{\text{ТОРТ}}=0,87$ – внутренний относительный КПД турбины ТОРТ. Энталпия в отборе $h_{14}=h_{13}-(h_{13}-h_{14s})\eta_{\text{ТОРТ}}$, где h_{14s} определяется по s_{13} и p_{14} .

Энталпия h_{19} определяется из теплового баланса рекуператора

$$(h_{19}-h_{18})=(h_{15}-h_{16})\eta_p, \quad (15)$$

где $\eta_p=0,99$ – КПД рекуператора.

Энталпия $h_{20}=h_{19}$, если подогрев ОРТ перед ГПОРТ производится рециркуляцией, иначе h_{20} определяется как кипящая жидкость по p_{20} .

Расход пара на подогреватель (П) D_{14} определяется из уравнений материального и теплового баланса:

$$D_{14}+D_k=D_{OPT}; \quad (16a)$$

$$(D_{14}h_{14}+D_kh_{20})\eta_P=D_{OPT}h_{20}, \quad (16b)$$

где D_k – расход пара ОРТ в конденсатор; $\eta_P=0,99$ – КПД подогревателя.

Эффективная мощность турбины ТОРТ без отбора (17а) и с отбором (17б), кВт

$$N_{OPT}=D_{OPT}(h_{13}-h_{15})\eta_m. \quad (17a)$$

$$N_{OPT}=(D_k(h_{13}-h_{15})+D_{14}(h_{13}-h_{14}))\eta_m. \quad (17a)$$

Электрическая мощность ПГУ брутто, кВт

$$N_{bp}=(N_{TP}+N_{TP}+N_{OPT})\eta_r, \quad (18)$$

где $\eta_r=0,98$ – КПД ГЭ.

Электрический КПД ПГУ брутто

$$\eta_{bp}=N_{bp}/Q_{KC}. \quad (19)$$

Электрические мощности, затраченные на собственные нужды ПГУ, кВт:

- на питательный насос воды $N_{PNB}=D_n\Delta h_{PNB}$;
- на питательный насос ОРТ $N_{PNORT}=D_{OPT}\Delta h_{PNORT}$;
- на конденсатный насос ОРТ $N_{KNORT}=D_k\Delta h_{KNORT}$;
- на насос рециркуляции ОРТ $N_{HP}=D_p\Delta h_{HP}$, где $\Delta h_{HP}=(p_{21}-p_{23})v_n/\eta_n$;
- на вентиляторы КВО $N_{KBO}=G_{KBO}\Delta h_{KBO}$, где $\Delta h_{KBO}=\Delta p_g v_g/\eta_s$, $\Delta p_g=30...50$ кПа; G_{KBO} определяется из теплового баланса $G_{KBO}C_b\Delta T_b=D_k(h_{16}-h_{17})$, где $C_b=1,006$ кДж/кг – теплоемкость воздуха; $\Delta T_b=10...15$ К – нагрев воздуха в КВО;
- на дожимные компрессоры $N_{DK}=B\Delta h_{DK}$, где $\Delta h_{DK}=(p_2-p_1)v_{nr}/\eta_{DK}$, где $v_{nr}=1,27$ м³/кг – удельный объем природного газа; $\eta_{DK}=0,8$ – КПД ДК.

Суммарная электрическая мощность на собственные нужды ПГУ, кВт

$$N_{CH}=N_{PNB}+N_{PNORT}+N_{KNORT}+N_{HP}+N_{KBO}+N_{DK}. \quad (20)$$

Электрическая мощность ПГУ нетто, кВт

$$N_{HT}=N_{bp}-N_{CH}. \quad (21)$$

Электрический КПД ПГУ нетто

$$\eta_{HT}=N_{HT}/Q_{KC}. \quad (22)$$

КПД котла-утилизатора определяется как

$$\eta_{KU}=(h_4-h_{27})/(h_4-h_{OC}), \quad (23)$$

где h_{OC} – энталпия окружающей среды, определяется по температуре и давлению окружающего воздуха.

На основе уравнений (1)–(23) представленной модели разработана программа в MS Office Excel с подключенным модулем базы веществ REFPROP.

Результаты расчета и их анализ

Для цикла Брайтона была выбрана газотурбинная установка фирмы General Electric GE 9HA.02 [20], которая в номинальном режиме имеет элек-

трическую мощность 571 МВт; КПД нетто 43,9 %; степень повышения давления в компрессоре $\varepsilon=23,8$; температуру продуктов сгорания на входе в газовую турбину $T_3=1873$ К, а на выходе $T_4=918$ К; расход воздуха при температуре $T_1=288$ К и относительной влажности 60 % $G_b=938,4$ кг/с, а расход продуктов сгорания $G_r=964,5$ кг/с.

В качестве топлива для ГТУ выбран природный газ следующего состава, %: метан $CH_4=93,9$; этан $C_2H_6=1,3$; пропан $C_3H_8=1,3$; бутан $C_4H_{10}=0,8$; оксид углерода $CO=0,4$.

Для паротурбинного цикла Ренкина принятые следующие параметры: $\theta_5=25$ К; давление пара перед паровой турбиной $P_{op}=p_5=6...18$ МПа; давление за паровой турбиной $P_{2P}=p_6=0,05...0,3$ МПа.

Для ОЦР было выбрано ОРТ, имеющее наилучшие термодинамические и экологические характеристики. С учетом проведенного в разделе 1 анализа выбраны ОРТ: pentane, butane, R365mfc, RC318, R236ea, R236fa, R123, R245ca и R245fa.

С помощью программы проведены расчеты при $P_{op}=18$ МПа; $P_{2P}=0,2$ МПа; температуре уходящих газов 100 °C, с изменением температуры конденсации ОРТ в диапазоне -20...20 °C. Полученные в результате расчета зависимости КПД ПГУ брутто и нетто от температуры конденсации ОРТ приведены на рис. 3. На рис. 4 приведена *t-Q* диаграмма зависимости температуры уходящих газов, ОРТ, воды и пара от тепловой нагрузки поверхностей нагрева КУ, рассчитанная при тех же параметрах и температуре конденсации ОРТ 15 °C.

На рис. 3 видим, что для всех ОРТ при изменении температуры конденсации КПД брутто изменяется линейно и, в зависимости от вида ОРТ, в узком диапазоне. При этом наилучшими являются pentane и RC318. КПД нетто имеет существенный разброс в зависимости от вида ОРТ, что связано с влиянием вязкости и плотности рабочих тел на работу сжатия в насосах. Наилучшими по КПД нетто являются pentane и R365mfc, при этом RC318 оказался на последнем месте. В связи с тем, что pentane является горючим и в определенном соотношении с воздухом может быть взрывоопасным, для дальнейших исследований выбран фреон R365mfc. Из проведенного расчета следует, что выбор ОРТ надо производить по КПД нетто с учетом затрат энергии на собственные нужды.

Из рис. 4 следует, что без подогрева ОРТ в ГПОРТ температура уходящих газов будет 192 °C, таким образом ГПОРТ позволяет снизить температуру уходящих газов до 100 °C и повысить КПД КУ с 72,0 до 86,5 %, а также повысить температура ОРТ с 60 до 92 °C перед ИОРТ, что увеличивает расход ОРТ и повышение мощности ТОРТ.

Для оценки влияния параметров водяного пара на КПД ПГУ проведены расчеты с изменением давления перед паровой турбиной $P_{op}=p_5$ в диапазоне 6...18 МПа и давления за турбиной P_{2P} в диапазоне 0,05...0,3 МПа. Результаты приведены на рис. 5, 6, где РП обозначает регенеративный подогрев ОРТ перед ГПОРТ КУ, а РЦ подогрев рециркуляцией.

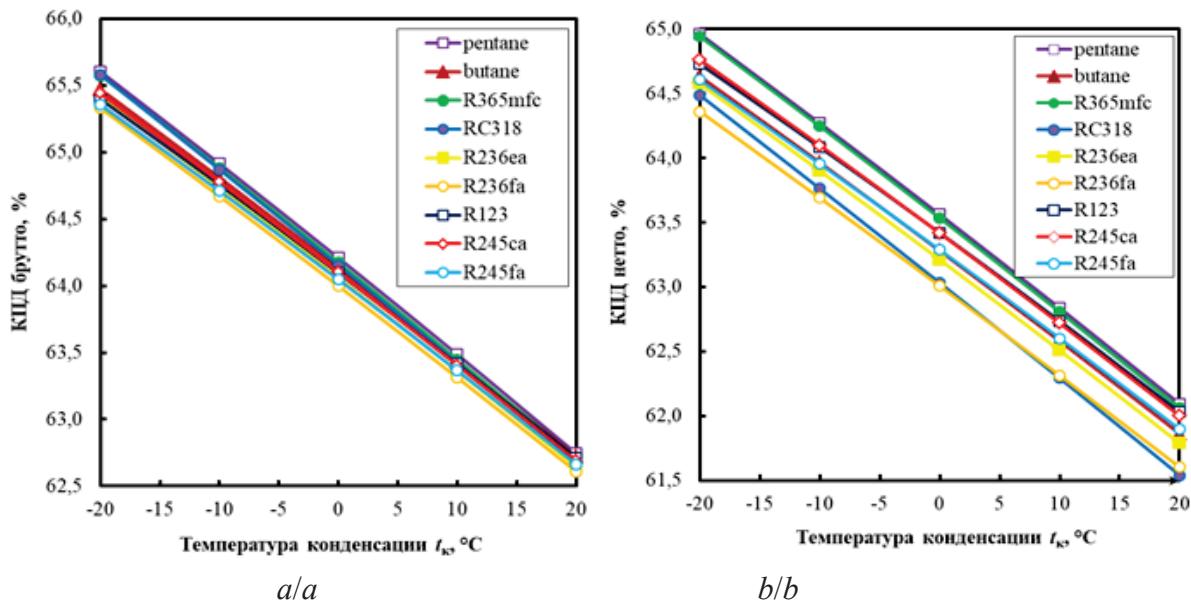


Рис. 3 а) КПД брутто; б) КПД нетто

Fig. 3. a) Gross efficiency; b) Net efficiency

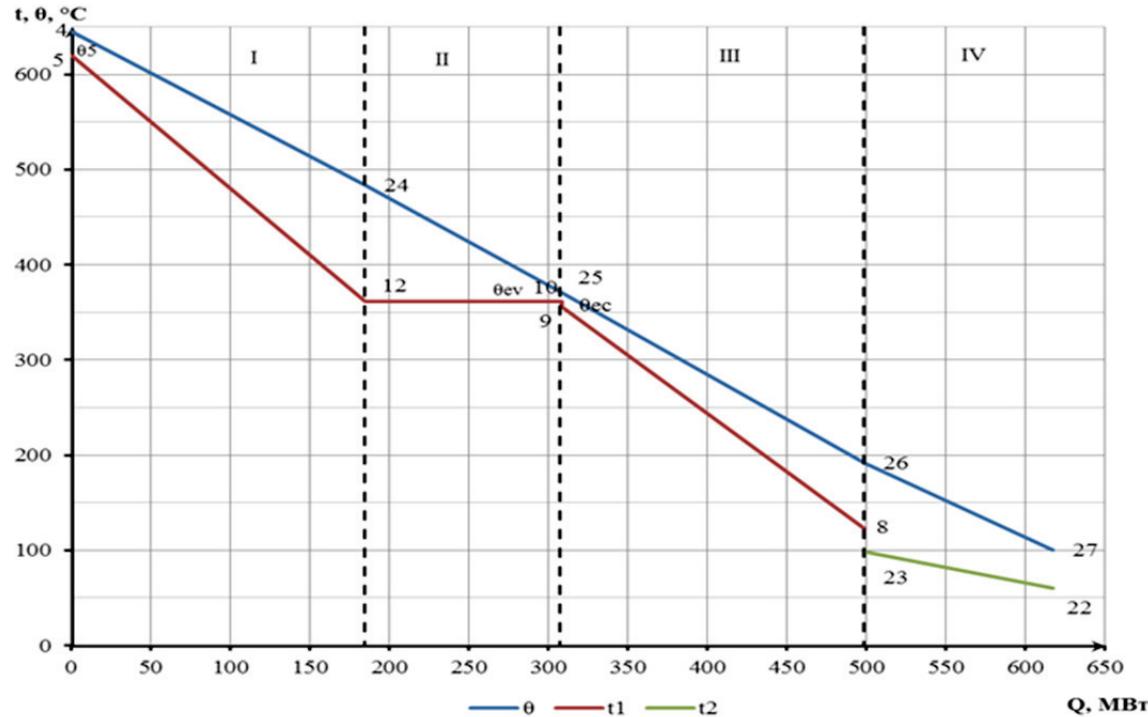


Рис. 4. t - Q – диаграмма КУ: θ – температура выхлопных газов, t_1 – температура воды и водяного пара, t_2 – температура ОРТ; числа соответствуют точкам на рис. 1; I – область пароперегревателя, II – область испарителя, III – область экономайзера, IV – область ГПОРТ

Fig. 4. t - Q -diagram of heat recovery steam generator (HRSG): θ – exhaust gas temperature of the Gas turbine unit (GTU), t_1 – water vapor temperature of the high pressure circuit, t_2 – low pressure circuit OWF temperature; the numbers denote the points shown in Fig. 1; I – superheater, II – evaporator, III – economizer, IV – GH OWF

На рис. 5 видим, что рост давления пара перед паровой турбиной линейно повышает КПД ПГУ, при этом рост давления на 2 МПа увеличивает КПД брутто на 0,25 %, а КПД нетто – на 0,3 %. Регенеративный подогрев ОРТ перед КУ увеличивает

КПД брутто и нетто на 0,4 % по сравнению с подогревом рециркуляцией.

Из рис. 6 следует, что в зависимости от давления за паровой турбиной P_{2n} имеется оптимум КПД ПГУ. Оптимальное давление P_{2n} зависит от

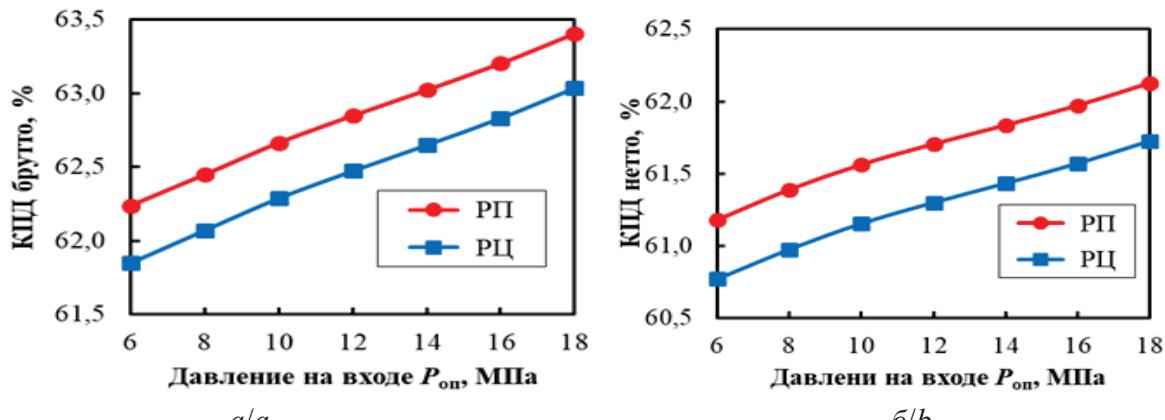


Рис. 5. Зависимость КПД брутто (а) и нетто (б) ПГУ от давления $P_{0\text{ws}}$
 Fig. 5. Characteristic curve of gross (a) and net (b) efficiency of CCGT from pressure $P_{0\text{ws}}$

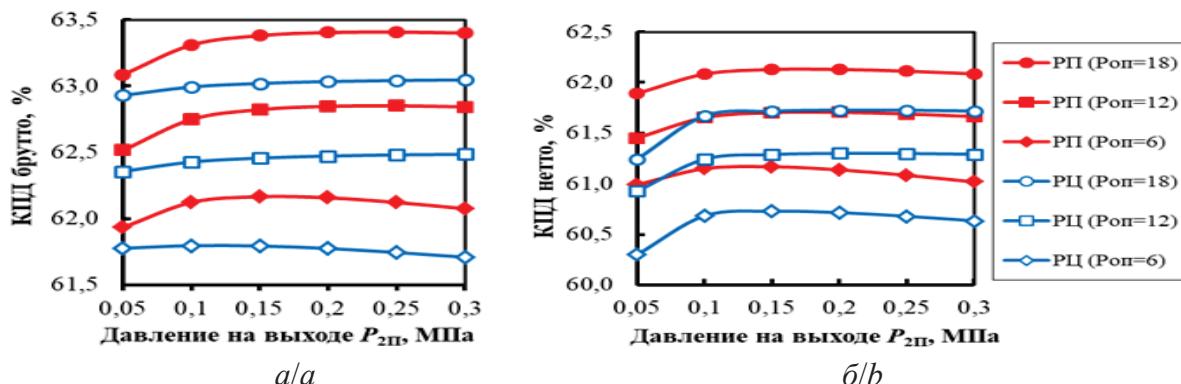


Рис. 6. Зависимость КПД ПГУ брутто (а) и нетто (б) от $P_{2\text{ws}}$ и $P_{0\text{ws}}$, МПа
 Fig. 6. Characteristic curve of the gross (a) and net (b) efficiency of the CCGT from the pressure $P_{2\text{ws}}$ and $P_{0\text{ws}}$, MPa

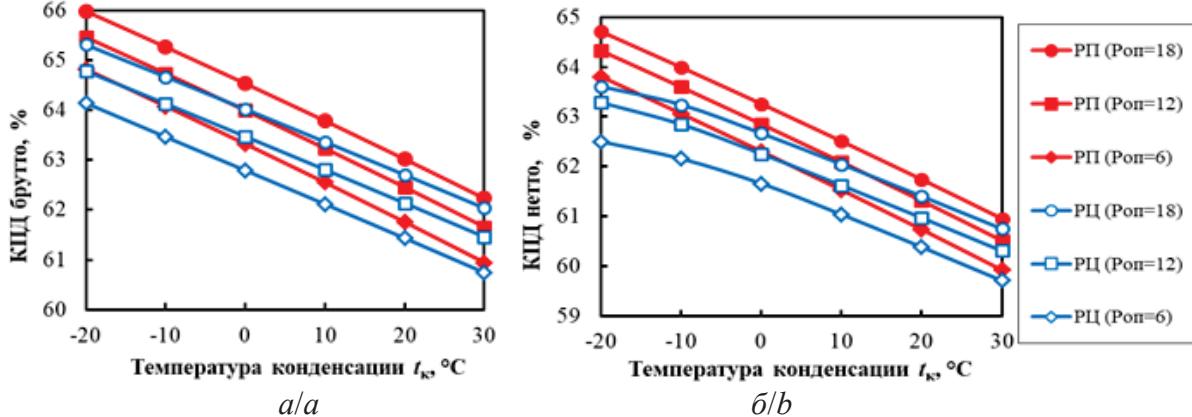


Рис. 7. Зависимость КПД ПГУ брутто (а) и нетто (б) от температуры конденсации t_k и $P_{0\text{ws}}$
 Fig. 7. Characteristic curve of the gross (a) and net (b) efficiency of the CCGT from condensation temperature t_k and $P_{0\text{ws}}$

способа подогрева ОРТ перед КУ (РП или РЦ) и давления пара $P_{0\text{ws}}$. При этом их влияние более выражено для КПД ПГУ нетто. Так, при подогреве ОРТ перед КУ рециркуляцией максимум КПД ПГУ брутто и нетто слабо выраженный, имеется только сильное падение КПД ПГУ нетто при давлении $P_{2\text{ws}}$ ниже 0,1 МПа. При регенеративном

подогреве ОРТ перед КУ в зависимости от давления $P_{0\text{ws}}$ максимум КПД ПГУ нетто смешен в сторону меньших давлений $P_{2\text{ws}}$. Так, для КПД ПГУ брутто при $P_{0\text{ws}}=6$ МПа максимум при $P_{2\text{ws}}=0,15...0,2$ МПа, а для $P_{0\text{ws}}=12$ и 18 МПа максимум при $P_{2\text{ws}}=0,2...0,3$ МПа. Для КПД ПГУ нетто максимум более выраженный и смешен в сторону

меньших P_{2n} . Так, при $P_{on}=6$ МПа максимум при $P_{2n}=0,1...0,15$ МПа, а для $P_{on}=12$ и 18 МПа максимум при $P_{2n}=0,15...0,2$ МПа.

На рис. 7 видим, что снижение температуры конденсации t_k линейно повышает КПД ПГУ брутто. При подогреве ОРТ перед КУ рециркуляцией темп роста КПД ниже, что связано с ростом расхода ОРТ по линии рециркуляции и уменьшением его расхода на турбину. Особенно влияние рециркуляции оказывается на КПД ПГУ нетто, из-за увеличения затрат мощности на насосы рециркуляции при низких t_k видим изгиб кривых КПД вниз. При регенеративном подогреве ОРТ КПД нетто изменяется линейно, при этом снижение t_k на 10 °C ведет к росту КПД ПГУ брутто и нетто на 0,76 %.

Проведенные расчеты показывают, что для увеличения КПД ПГУ необходимо увеличение давления пара перед паровой турбиной, снижение температуры конденсации ОРТ и оптимизация давления за паровой турбиной.

Выводы

1. Разработана оригинальная схема парогазовой установки утилизационного типа с циклами на трех рабочих телах, где верхний цикл Брайтона работает на продуктах сгорания природного газа, средний цикл Ренкина работает на воде и водяном паре, нижний – Органический цикл Ренкина – работает на органическом рабочем теле с конденсацией его в воздушном конденса-

торе. Разработана математическая модель и программа расчета предложенной схемы.

2. Для органического цикла Ренкина определено наиболее эффективное органическое рабочее тело – фреон R365mfc.
3. Проведен параметрический анализ влияния основных параметров циклов Ренкина на КПД брутто и нетто парогазовой установки при подогреве ОРТ перед КУ с помощью регенеративного подогрева в смешивающем подогревателе паром из отбора турбины ОРТ и рециркуляцией ОРТ через газовый подогреватель ОРТ. Определено, что регенеративный подогрев более эффективен, чем рециркуляция.
4. Выявлено, что рост давления пара перед паровой турбиной линейно повышает КПД ПГУ, при этом рост давления на 2 МПа увеличивает КПД брутто на 0,25 %, а КПД нетто – на 0,3 %.
5. Определено, что в зависимости от давления за паровой турбиной P_{2n} имеется оптимум КПД ПГУ. Так для КПД ПГУ брутто при $P_{on}=6$ МПа максимум находится в интервале $P_{2n}=0,15...0,2$ МПа, а для $P_{on}=12$ и 18 МПа максимум в интервале $P_{2n}=0,2...0,3$ МПа. Для КПД ПГУ нетто максимум смещен в сторону меньших P_{2n} . Так, при $P_{on}=6$ МПа максимум в интервале $P_{2n}=0,1...0,15$ МПа, а для $P_{on}=12$ и 18 МПа максимум в интервале $P_{2n}=0,15...0,2$ МПа.
6. Выявлено, что снижение температуры конденсации ОРТ на 10 °C ведет к росту КПД ПГУ брутто и нетто на 0,76 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Combined-Cycle Gas & Steam Turbine Power Plants / R. Kehlhofer, F. Hannemann, F. Stirnimann, B. Rukes. Tulsa, Oklahoma, USA: PennWell Corporation, 2009. – 434 с.
2. Трухин А.Д. Парогазовые установки электростанций. – М.: ИД МЭИ, 2013. – 648 с.
3. Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций. – М.: ИД МЭИ, 2002. – 584 с.
4. Ольховский Г.Г. Перспективные газотурбинные и парогазовые установки для энергетики (обзор) // Теплоэнергетика. – 2013. – № 2. – С. 3–12.
5. Multi-objective optimisation and fast decision-making method for working fluid selection in organic Rankine cycle with low-temperature waste heat source in industry / Xu Zhang, Hao Bai, Xiancong Zhao, Ali Diabat, Jian Zhang, Huanmei Yuan, Zefei Zhang // Energy Conversion and Management. – 2018. – V. 172. – P. 200–211.
6. Design optimization of ORC systems for waste heat recovery on board a LNG carrier / M. Soffiato, Ch.A. Frangopoulos, G. Manente, S. Rech, A. Lazzaretto // Energy Conversion and Management. – 2015. – V. 92. – P. 523–534.
7. A multi-criteria approach for the optimal selection of working fluid and design parameters in Organic Rankine Cycle systems / A. Tofolo, A. Lazzaretto, G. Manente, M. Paci // Applied Energy. – 2014. – V. 121. – P. 219–251.
8. Yang M., Yeh R. Analyzing the optimization of an organic Rankine cycle system for recovering waste heat from a large marine engine containing a cooling water system // Energy Conserve Manage. – 2014. – V. 88. – P. 999–1010.
9. How to quantitatively describe the role of the pure working fluids in subcritical organic Rankine cycle: a limitation on efficiency / Weicong Xu, Shuai Deng, Li Zhao, Wen Su, Ying Zhang, Shuang-jun Li, Minglu Ma // Energy Conversion and Management. – 2018. – V. 172. – P. 316–327.
10. Working Fluids for Low-Temperature Organic Rankine Cycles / B. Saleh, G. Koglbauer, M. Wendland, J. Fischer // Energy. – 2007. – V. 32. – P. 1210–1221.
11. Braimakis K., Karellas S. Exergetic optimization of double stage Organic Rankine Cycle (ORC) // Energy. – 2018. – V. 149. – P. 296–313.
12. Cao Y., Rattner A.S., Dai Y. Thermo-economic analysis of a gas turbine and cascaded CO₂ combined cycle using thermal oil as an intermediate heat-transfer fluid // Energy. – 2018. – V. 162. – P. 1253–1268.
13. Parametric and working fluid analysis of a dual-loop organic Rankine cycle (DORC) used in engine waste heat recovery / G. Shu, L. Liu, H. Tian, H. Wei, G. Yu // Applied Energy. – 2014. – V. 113. – P. 1188–1198.
14. Thermo-economic analysis and multiobjective optimization of a combined gas turbine, steam, and organic Rankine cycle / A. Mohammadi, M. Ashouri, M.H. Ahmadi, M. Sadeghzadeh, T. Ming // Energy Science and Engineering. – 2018. – V. 6. – P. 506–522.
15. Galashov N.N., Tsibulsky A.S. Thermal Efficiency of Three-Cycle Utilization-Type Steam-Gas Units // Power Technology and Engineering. – 2015. – V. 48. – P. 459–463.
16. Галашов Н.Н., Цибульский С.А. Анализ эффективности парогазовых установок триарного типа // Известия томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325. – № 4. – С. 33–38.

17. Галашов Н.Н., Цибульский С.А. Анализ влияния основных параметров паротурбинного цикла на эффективность триарных парогазовых установок // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 4. – С. 14–21.
18. Galashov N., Tsibulskiy S., Serova T. Analysis of the properties of working substances for the organic Rankine cycle based database «refprop» // Termophysical basis of energy technologies 2015: EPJ web of conferences. – Tomsk, – 2016. – V. 110 (01068). – 6 p.
19. Lemmon E.W., Huber M.L., McLinden M.O. Reference fluid thermodynamic and transport properties-REFPROP. 2013. URL: <https://wwwnist.gov/programs-projects/reference-fluid-thermodynamic-and-transport-properties-database-refprop> (дата обращения: 19.02.2019).
20. Параметры газовой турбины 9НА. 2018. URL: <https://wwwge.com/power/gas/gas-turbines/9ha> (дата обращения: 19.02.2019).

Поступила 27.03.2019 г.

Информация об авторах

Галашов Н.Н., кандидат технических наук, доцент НОЦ И.Н. Бутакова инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Цибульский С.А., ассистент НОЦ И.Н. Бутакова инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.311.238; 621.311.22

PARAMETRIC ANALYSIS OF THE DIAGRAM OF THE COMBINED-CYCLE GAS TURBINE WITH A COMBINATION OF THREE CYCLES FOR IMPROVING EFFICIENCY WHEN OPERATING IN NORTHERN GAS PRODUCING AREAS

Nikolay N. Galashov¹,

gal@tpu.ru

Svyatoslav A. Tsibulskiy¹,

stzibulsky@tpu.ru

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

The relevance. Combined-cycle gas turbines are considered as one of the promising directions in development of thermal power plants operating on natural and synthesis gas. The interest in their introduction in Russia is caused by large reserves of natural gas, low capital investment and minimal emissions of harmful substances into the environment. It is known from thermodynamics that in order to achieve high cycle efficiency, it is necessary to have a high heat supply temperature and low heat removal temperature, and to ensure equipment operation with minimal internal losses, and to have a rational thermal scheme of equipment interconnection in a cycle. At the present stage, the maximum temperature of heat supply in the combustion chamber of a gas turbine installation with existing structural materials and methods for cooling turbine elements has reached 1600 °C, and heat removal temperature in the condenser during the operation of the Rankine cycle on water cannot be lower than 15 °C. Under these conditions, the electric efficiency of 63 % is achieved at the most advanced three-loop combined-cycle gas turbine with intermediate superheating of steam. For the Rankine cycle when working on water, the condensation temperature of the steam should be above 0 °C according to the freezing condition. For a combined-cycle plant, when operating in conditions of low average annual ambient temperatures, which is typical for Russia and especially remote northern gas production areas, heat can be removed in the Rankine cycle well below 0 °C, but this can be done reliably only by using air-cooled condensers, if an organic working body is used as a working body in the Rankine cycle. The disadvantage of modern organic working fluid is the low limiting temperature of their thermal decomposition, which is usually below 300...400 °C.

Subject of the research is combined-cycle plants with cycles on three working bodies, where the upper cycle of a gas turbine unit operates on gas combustion products, the middle cycle of a steam turbine unit operates on water and steam in the temperature range of 100...650 °C, and the lower cycle – Organic Rankine cycle operates on organic working fluid in the range of temperatures –30...200 °C.

The aim of the study is the choice of a rational technological diagram of a combined-cycle plants using cycles on three working bodies and an air condenser to enable reliable heat removal from the organic working fluid at temperature below 0 °C and to determine the optimal parameters of the cycles.

Methods. Complex heat and power systems, including steam and gas installations, are characterized by a variety of processes occurring in their elements. Such installations can be effectively investigated only with the help of mathematical modeling and optimization methods. When conducting research the authors have applied a systematic approach, methods of energy balances and the calculation of thermodynamic and thermophysical property of working bodies using modern certified programs.

Results. The authors developed the original diagram of a combined-cycle gas turbine unit with cycles on three working bodies. In this diagram, the Brighton upper cycle operates on combustion products of natural gas, the average Rankine cycle operates on water and water vapor, the lower – Organic Rankine cycle operates on organic working fluid with condensation in an air condenser. The mathematical model and a program for calculating the proposed scheme was developed. The authors carried out the parametric analysis of the cycles main parameters influence on the efficiency and power of the combine cycle gas turbine and determined the most effective organic working fluid for the lower Rankine cycle.

Key words:

Combined-cycle gas turbine, organic working bodies, Organic Rankine cycle, air condenser, math modeling.

REFERENCES

1. Kehlhofer R., Hannemann F., Stirnimann F., Rukes B. *Combined-Cycle Gas & Steam Turbine Power Plants*. Tulsa, Oklahoma, USA, 2009, PennWell Corporation. 434 p.
2. Trukhny A.D. *Parogazovye ustanovki elektrostantsiy* [Steam-gas installations of power plants]. Moscow, MEI Publ. House, 2013. 648 p.
3. Tsanev S.V., Burov V.D., Remezov A.N. *Gazoturbinnye i parogazovye ustanovki teplovykh stantsiy* [Gas turbine and steam-gas installations of thermal power plants]. Moscow, MEI Publ. House, 2002. 584 p.
4. Olkhovsky G.G. *Perspektivnye gazoturbinnye i parogazovoye ustanovki dlya energetiki (obzor)*. *Teployenergetika*, 2013, no. 2, pp. 3–12. In Rus.
5. Xu Zhang, Hao Bai, Xiancong Zhao, Ali Diabat, Jian Zhang, Huanmei Yuan, Zefei Zhang. Multi-objective optimisation and fast decision-making method for working fluid selection in organic Rankine cycle with low-temperature waste heat source in industry. *Energy Conversion and Management*, 2018, vol. 172, pp. 200–211.
6. Soffiato M., Frangopoulos Ch.A., Manente G., Rech S., Lazzaretto A. Design optimization of ORC systems for waste heat recovery on board a LNG carrier. *Energy Conversion and Management*, 2015, vol. 92, pp. 523–534.
7. Toffolo A., Lazzaretto A., Manente G., Paci M. A multi-criteria approach for the optimal selection of working fluid and design parameters in Organic Rankine Cycle systems. *Applied Energy*, 2014, vol. 121, pp. 219–251.
8. Yang M., Yeh R. Analyzing the optimization of an organic Rankine cycle system for recovering waste heat from a large marine engine containing a cooling water system. *Energy Converse Manage*, 2014, vol. 88, pp. 999–1010.
9. Weicong Xu, Shuai Deng, Li Zhao, Wen Su, Ying Zhang, Shuangjun Li, Minglu Ma. How to quantitatively describe the role of the

- pure working fluids in subcritical organic Rankine cycle: A limitation on efficiency. *Energy Conversion and Management*, 2018, vol. 172, pp. 316–327.
10. Saleh B., Koglbauer G., Wendland M., Fischer J. Working Fluids for Low-Temperature Organic Rankine Cycles. *Energy*, 2007, vol. 32, pp. 1210–1221.
11. Braimakis K., Karella S. Exergetic optimization of double stage Organic Rankine Cycle (ORC). *Energy*, 2018, vol. 149, pp. 296–313.
12. Cao Y., Rattner A.S., Dai Y. Thermo-economic analysis of a gas turbine and cascaded CO₂ combined cycle using thermal oil as an intermediate heat-transfer fluid. *Energy*, 2018, vol. 162, pp. 1253–1268.
13. Shu G., Liu L., Tian H., Wei H., Yu G. Parametric and working fluid analysis of a dual-loop organic Rankine cycle (DORC) used in engine waste heat recovery. *Applied Energy*, 2014, vol. 113, pp. 1188–1198.
14. Mohammadi A., Ashouri M., Ahmadi M.H., Sadeghzadeh M., Ming T. Thermo-economic analysis and multiobjective optimization of a combined gas turbine, steam, and organic Rankine cycle. *Energy Science and Engineering*, 2018, vol. 6, pp. 506–522.
15. Galashov N.N., Tsibulsky S.A. Thermal Efficiency of Three-Cycle Utilization-Type Steam-Gas Units. *Power Technology and Engineering*, 2015, vol. 48, Iss. 6, pp. 459–463.
16. Galashov N.N., Tsibulsky S.A. Analysis of the efficiency of combined-cycle installations of the trinar type. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 4, pp. 33–38. In Rus.
17. Galashov N.N., Tsibulsky S.A. Analysis of the influence of the main parameters of the steam-turbine cycle on the efficiency of trinar steam-gas installations. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 4, pp. 14–21. In Rus.
18. Galashov N., Tsibulskiy S., Serova T. Analysis of the properties of working substances for the organic Rankine cycle based database «Refprop». *EPJ web of conferences. Termophysical basis of energy technologies 2015*. Tomsk, 2016. Vol. 110 (01068), 6 p.
19. Lemmon E.W., Huber M.L., McLinden M.O. *Reference fluid thermodynamic and transport properties REFPROP*. 2013. Available at: <https://www.nist.gov/programs-projects/reference-fluid-thermodynamic-and-transport-properties-database-refprop> (accessed 19 February 2019).
20. *Parametry gazovoy turbiny 9HA* [Gas turbine 9HA parameters]. 2018. Available at: <https://www.ge.com/power/gas/gas-turbines/9ha> (accessed 19 February 2019).

Received: 27 March 2019.

Information about the authors

Nikolay N. Galashov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Svyatoslav A. Tsibulskiy, assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 622.323:517.1

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ГИПОТЕЗА ФИЗИЧЕСКОЙ КАРТИНЫ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ПОГРУЖНОГО ОБОРУДОВАНИЯ СКВАЖИН С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО ОБРАТНОГО КЛАПАНА

Азеев Александр Александрович¹,

3-a@li.ru

Булчаев Нури Джамалайлович¹,

nbulchaev@yandex.ru

Безверхая Елена Владимировна¹,

bezverhaya.elena@mail.ru

¹ Институт нефти и газа Сибирского Федерального университета,
Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79.

Актуальность. Анализ технических средств и методов борьбы с пескопроявлениемами дает основание предполагать наличие значительных резервов повышения их эффективности. В частности, установлено, что большинство методов снижения влияния механических примесей на работу насосного оборудования в настоящее время либо не решают проблему кардинально, либо не носят долговременного характера. Гидродинамическая очистка погружного оборудования, несмотря на свою эффективность, невозможна без проведения спускопередъемных операций. Альтернативой этого способа являются устройства клапанного типа. Однако их применение сдерживается из-за того, что не решен вопрос подбора оптимальных конструктивных параметров данных устройств. В связи с вышеизложенным есть необходимость проведения соответствующих теоретических исследований.

Цель: провести системный анализ и предложить гипотезу физической картины процесса очистки погружного оборудования скважин с применением модернизированного обратного клапана.

Методы: системный анализ процесса очистки погружного оборудования скважин.

Результаты. Системный анализ работы очистных установок клапанного типа показывает, что из всех элементов внутренней структуры наибольшее число связей имеют параметры специального очистного оборудования. Следовательно, дальнейшее изучение рассматриваемой системы связано с выделением соответствующей подсистемы, определяющей только процесс очистки, а также с выяснением физической картины этого процесса. Предложена гипотеза физической картины процесса очистки, учитывая которую, можно заметить, что в подсистеме «Условия эксплуатации – конструктивные и технологические параметры клапана – производительность» в большей степени реализуется основное назначение всей системы. Выделение этой подсистемы отдельно позволило в общем виде найти взаимосвязь производительности процесса очистки и основных элементов внутренней структуры этого процесса. Практическая польза найденной взаимосвязи заключается в возможности обоснованного поиска оптимальных конструктивных параметров установки клапанного типа и скорости очистного потока через нее, в зависимости от основных факторов.

Ключевые слова:

Обратный клапан, добывающая скважина, очистка, фильтр, центробежный насос.

Введение

Анализируя существующие способы промывки погружного оборудования [1–15], включая область забоя скважин, можно отметить следующее. Во-первых, все известные методы очистки в настоящее время либо не решают проблему вредного влияния механических примесей, солей и отложений кардинально, либо не носят долговременного характера. В частности, что касается новых перспективных механических методов борьбы с пескопроявлениемами: несмотря на столь обнадеживающие результаты первых опытов использования сепараторов песка [8], нельзя говорить о целесообразности их массового использования для защиты установки электроцентробежного насоса (ЭЦН) и штангового глубинного насоса во всех без исключения скважинах с терригенными коллекторами. Перспективно их применение после гидравлического разрыва пласта, а также в одной компоновке с ЭЦН на сильно обводненных скважинах, находящихся на грани рентабельности, так как это позво-

лит использовать более экономичный вариант исполнения насоса. Кроме того, для всех методов очистки [1, 5–10] характерно использование трудоемких и длительных спускопередъемных операций.

Во-вторых, наиболее эффективным из всех существующих способов очистки погружного оборудования скважин является гидродинамический способ очистки специальными насадками высокого давления [10–15]. Однако их применение невозможно без проведения спускопередъемных операций. В-третьих, единственное решение, которое позволяет сократить необходимость частого выполнения спускопередъемных операций связано с применением устройств клапанного типа, являющихся, в частности, модернизацией стандартного трехпозиционного обратного клапана [16–18]. Согласно работам [16, 17], обратное открывание модернизированного обратного клапана происходит без длительного повышения давления в насосно-компрессорной трубе (НКТ) за счет опускания на

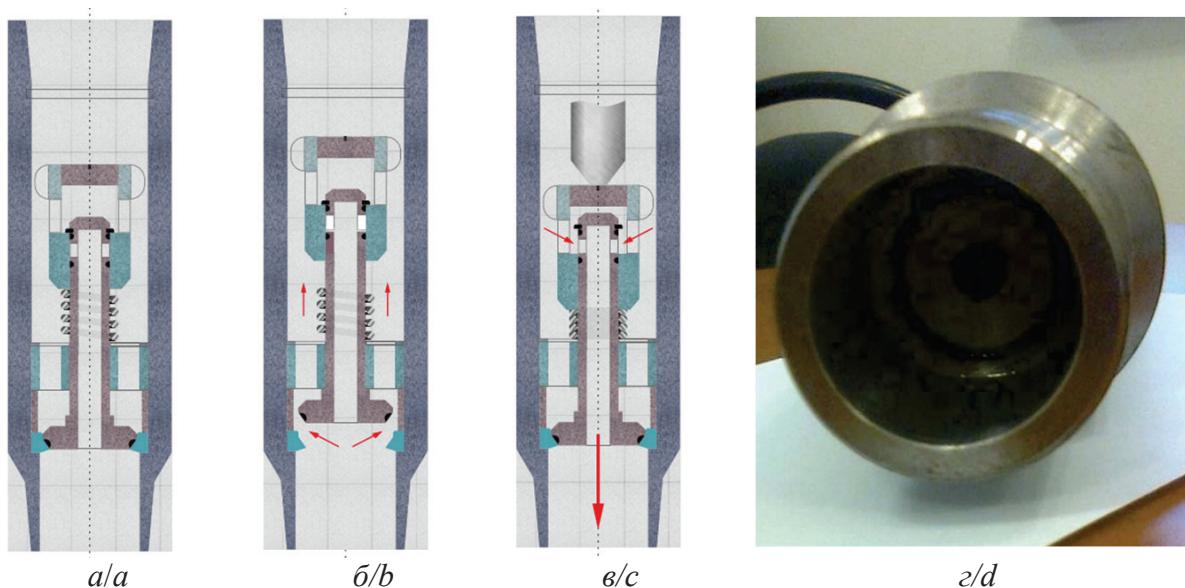


Рис. 1. Модернизированный обратный клапан: а) остановка установки электроцентробежного насоса (УЭЦН); б) работа УЭЦН; в) спуск груза для промывки приемной сетки УЭЦН; г) фотография клапана

Fig. 1. Improved backpressure valve: a) stop of Electrical Submersible Pumping (ESP System); b) ESP System operation; c) descent of freight for washing of a reception grid of the ESP System; d) valve photo

скребковой проволоке груза через лубрикатор (рис. 1). Этот груз, благодаря своему весу, превышающему силу упругости пружины, сожмет ее и переместит втулку вниз до положения, соответствующего обратному открыванию клапана. По истечении определенного времени груз приподнимают, и втулка под действием сжатой пружины возвращается в крайнее верхнее положение, при котором прекращается переток жидкости из НКТ в скважину.

Анализ результатов предыдущих исследований [8, 10, 11, 16, 19–23] дает основание предполагать наличие значительных резервов повышения эффективности технических средств и методов борьбы с пескопроявлением. В работах [11, 16] не решен вопрос подбора конструктивных параметров устройств клапанного типа, при которых обеспечиваются минимальные гидравлические сопротивления. Для поиска решения этого вопроса есть необходимость проведения соответствующих теоретических исследований.

Системный анализ процесса очистки

Структуру процесса очистки погружного оборудования скважин, с позиции системного подхода, целесообразно рассмотреть в виде подсистем верхнего, среднего и нижнего уровня, имеющих между собой соответствующие функциональные связи. Пример подобной структуры, приведенный на рис. 2, позволяет наглядно показать взаимосвязь конструктивных, технологических и технико-экономических показателей очистных установок.

Из рис. 2 видно, что из всех элементов внутренней структуры наибольшее число связей имеют па-

раметры специального рабочего оборудования. Следовательно, для их дальнейшего изучения необходимо выделить соответствующую подсистему, определяющую только процесс очистки, а также выяснить физическую картину этого процесса. На основании результатов предварительных исследований [16], в качестве допущения, в упрощенном виде физическую картину процесса очистки можно представить как совокупность отдельных физических процессов, чередующихся в пространстве друг за другом (рис. 3).

Технология очистки приемной сетки насоса происходит следующим образом. С помощью груза, подаваемого внутрь насосно-компрессорной трубы через лубрикатор на скребковой проволоке, производится сжатие пружины исполнительной втулки модернизированного обратного клапана, что вызывает свободный переток жидкости с устья к приемному фильтру насоса. Далее последовательность происходящих друг за другом физических процессов включает в себя следующие этапы.

На первом этапе поток очистной жидкости, подаваемый с устья насосной установкой, проходит по насосно-компрессорной трубе и встречает на своем пути клапанный механизм, пройдя через который на выходе образует уже несколько потоков более высокого давления. На втором этапе полученные потоки жидкости смешиваются и перемещаются по насосным трубам далее, проходя через погружной центробежный насос до его приемных фильтров. При условии постоянства величины гидравлических сопротивлений в элементах клапанного механизма и погружного насоса общие потери на трение в ходе продвижения очистного потока



Рис. 2. Структурная схема процесса работы гидродинамической установки клапанного типа в ходе очистки погружного оборудования скважины

Fig. 2. Block diagram of the valve type hydrodynamic device operation at purification of well submersible equipment

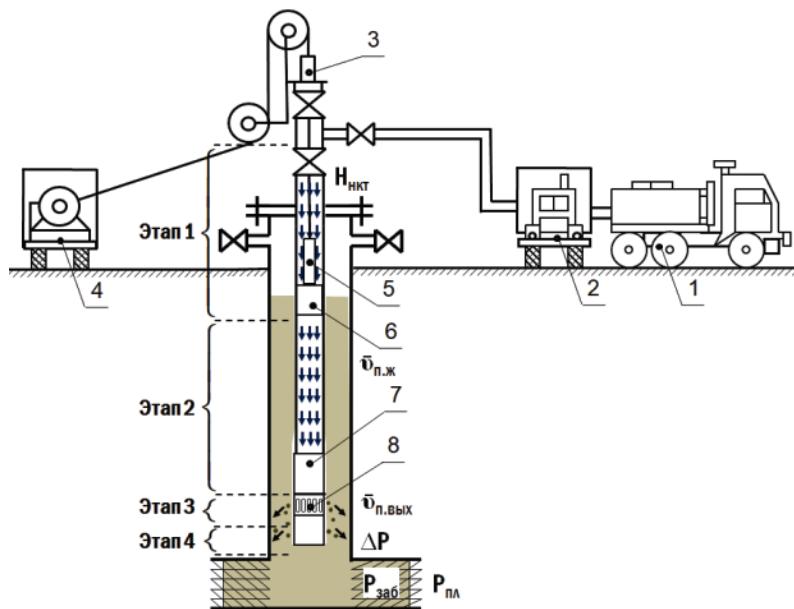


Рис. 3. Схема к расчету процесса очистки погружного оборудования скважины с применением модернизированного обратного клапана с функцией двухстороннего перепуска жидкости через себя: 1 – автоцистерна; 2 – насосный агрегат; 3 – лебедка; 4 – лебедка; 5 – груз; 6 – модернизированный клапан; 7 – центробежный насос; 8 – приемный фильтр

Fig. 3. Scheme to calculation of well submersible equipment purification using the upgraded backpressure valve with the function of bilateral restart-up of liquid: 1 is the tanker truck; 2 is the pump unit; 3 is the lubricator; 4 is the winch; 5 is the freight; 6 is the upgraded valve; 7 is the centrifugal pump; 8 is the reception filter

будут расти в прямой пропорции к длине пройденного пути. В связи с этим на некотором расстоянии от устьевой насосной установки давление потока на отложение внутри приемного фильтра может стать равным связующим усилиям между частицами отложения, следовательно, его разрушение бу-

дет затруднено. При этом в зависимости от степени загрязнения фильтра и связующих сил между частицами отложения поток начнет перемещаться либо через фильтр в межтрубное пространство, либо в обратную сторону, вызывая повышение уровня жидкости в насосно-компрессорной трубе перед

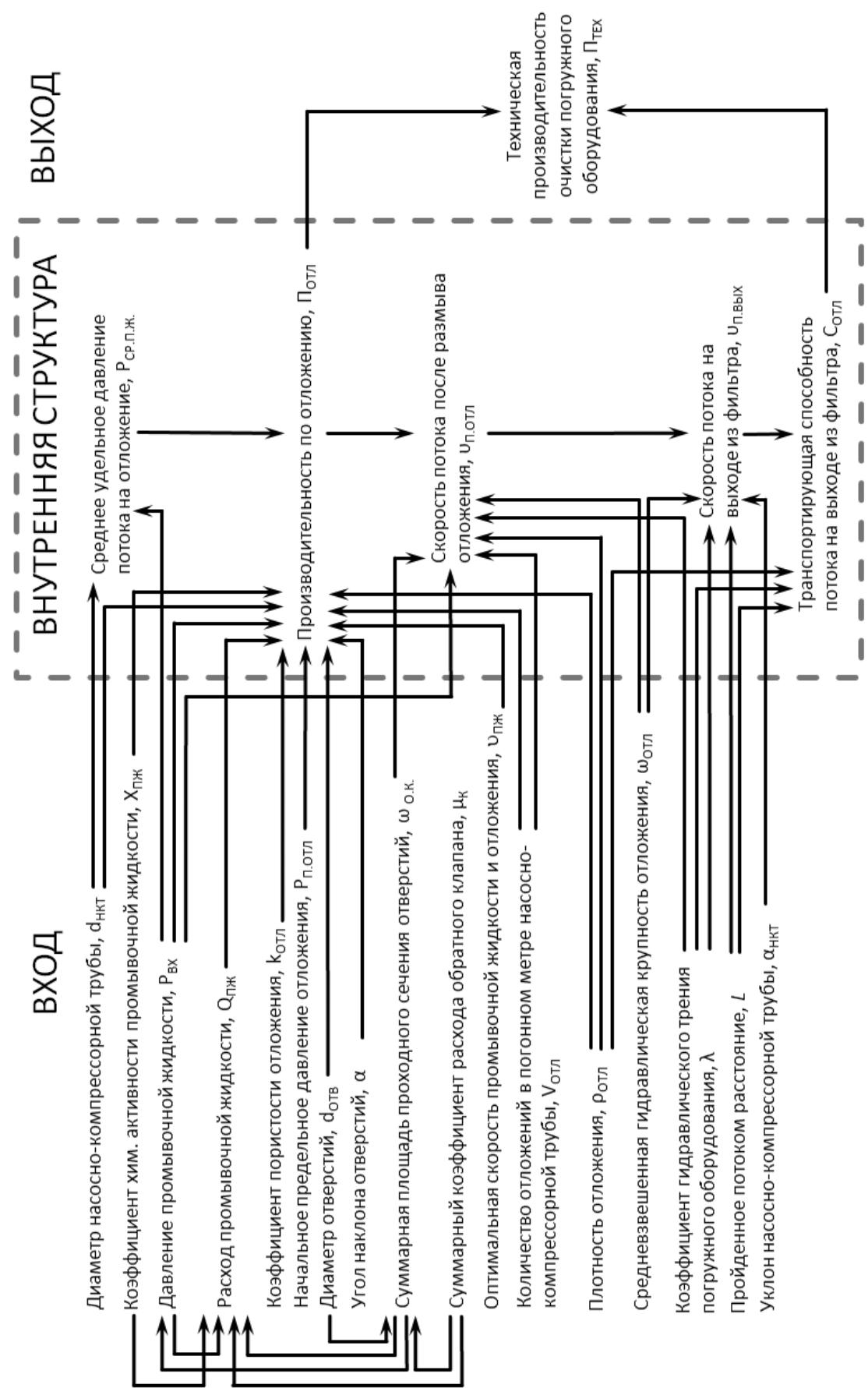


Рис. 4. Структурная схема процесса очистки погружного оборудования скважин модернизированным обратным клапаном

Fig. 4. Block diagram of well submersible equipment purification with the upgraded backpressure valve

преградой. Возможен также комбинированный вариант, с частичным истечением очистного потока через фильтр и изменением гидростатического уровня. На третьем этапе очистная жидкость, взаимодействуя с отложениями приемной сетки фильтра, начинает их разрушать, образуя многофазный поток, включающий частицы отложения, очистного состава и пластового флюида. На четвертом этапе многофазный поток по межтрубному пространству перемещается ниже с замедлением скорости, при этом твердые частицы выпадают в виде осадка в зумпф.

Учитывая описанную выше гипотезу физической картины рабочего процесса, можно заметить, что в подсистеме «Условия эксплуатации, конструктивные и технологические параметры – параметры специального рабочего оборудования – производительность» в большей степени реализуется основное назначение системы. Эту подсистему целесообразно выделить отдельно, например, согласно рис. 4.

Элементы внутренней структуры подсистемы описывают параметры процессов, связанных с работой специального рабочего оборудования, к которому относится клапанный механизм. В частности, к элементам внутренней структуры относятся: среднее удельное давление потока на отложение ($P_{\text{ср.п.ж}}$), производительность по отложению ($\Pi_{\text{отл}}$), скорость потока после размыва отложения ($v_{\text{п.отл}}$), скорость потока на выходе из фильтра ($v_{\text{п.вх}}$) и т. д. Параметры входа имеют прямые связи с параметрами внутренней структуры и через них влияют на выход подсистемы, т. е. на техническую производительность очистного оборудования.

Формулу технической производительности [24] установки клапанного типа для очистки погружного оборудования в общем виде можно записать следующим образом:

$$\Pi_{\text{тех}} = f \left(d_{\text{НКТ}}, X_{\text{п.ж}}, P_{\text{вх}}, k_{\text{отл}}, P_{\text{п.отл}}, d_{\text{отл}}, \alpha, \omega_{\text{o.k}}, \mu_{\text{k}}, V_{\text{отл}}, v_{\text{п.ж}}, \rho_{\text{отл}}, \lambda, L \right), \quad (1)$$

где $d_{\text{НКТ}}$ – внутренний диаметр НКТ, м; $X_{\text{п.ж}}$ – коэффициент химической активности промывочной жидкости; $P_{\text{вх}}$ – давление на входе в обратный клапан, МПа; $Q_{\text{п.ж}}$ – расход промывочной жидкости через одно из отверстий, $\text{м}^3/\text{ч}$; $k_{\text{отл}}$ – коэффициент проприости отложения; $P_{\text{п.отл}}$ – минимальное предельное давление разрушения отложений, Н; $d_{\text{отл}}$ – диаметр отверстий в корпусе обратного клапана, м; α – угол наклона отверстий к оси клапана и НКТ, град; $\omega_{\text{o.k}}$ – площадь поперечного сечения отверстия обратного клапана, м^2 ; μ_{k} – суммарный коэффициент расхода обратного клапана; $V_{\text{отл}}$ – объем отложений в погонном метре НКТ или фильтров, м^3 ; $v_{\text{п.ж}}$ – оптимальная скорость движения смеси очистной жидкости и отложения, с выпадением осадка за пределами очищаемой зоны, $\text{м}/\text{ч}$; $\rho_{\text{отл}}$ – плотность отложения, $\text{кг}/\text{м}^3$; λ – коэффициент гидравлического трения погружного оборудования; L – пройденное потоком расстояние, м.

С целью уточнения выражения (1) примем, что достижение основной цели выделенной подсистемы на рис. 4 обеспечивается при соблюдении следующих ограничений и условий:

- отложение полностью удаляется с очищаемого погружного оборудования во всем диапазоне изменения скорости очистного потока, т. е. производительность по удалению отложения равна $\Pi_{\text{отл}} = v_{\text{п.ж}} V_{\text{отл}}$;
- толщина и свойства отложения одинаковы на всех внутренних поверхностях очищаемого оборудования и области фильтра на приеме насоса: $k_{\text{отл}}, P_{\text{п.отл}}, V_{\text{отл}}, \rho_{\text{отл}}, \omega_{\text{отл}} = \text{const}$;
- гидравлические и геометрические характеристики погружного оборудования постоянны на всем протяжении в скважине: $d_{\text{НКТ}}, \lambda = \text{const}$;
- параметры специального клапана являются постоянными: $d_{\text{отл}}, \alpha, \omega_{\text{o.k}}, \mu_{\text{k}} = \text{const}$;
- давление, расход и очистные свойства потока газожидкостной смеси, обеспечиваемые комплексом оборудования, постоянны и соответствуют необходимым и достаточным затратам энергии для удаления отложения: $P_{\text{вх}}, Q_{\text{п.ж}}, X_{\text{п.ж}} = \text{const}$;
- влиянием на процесс очистки забойного и пластового давления пренебрегается.

Таким образом, если параметры клапанного устройства $d_{\text{отл}}, \alpha, \omega_{\text{o.k}}, \mu_{\text{k}}$ неизменны в ходе всего процесса очистки подземного оборудования, имеющего постоянные параметры $d_{\text{НКТ}}, \lambda, k_{\text{отл}}, P_{\text{п.отл}}, V_{\text{отл}}, \rho_{\text{отл}}, \omega_{\text{отл}}$, что обеспечивает постоянство параметров $P_{\text{вх}}, Q_{\text{п.ж}}$, при постоянной $X_{\text{п.ж}}$, то скорость очистной смеси можно представить как функцию расстояния L , пройденного потоком жидкости через подземное оборудование [24]:

$$v_{\text{п.ж}} = f(L). \quad (2, [24])$$

Отсюда следует, что общая техническая производительность [24] очистной установки клапанного типа и производительность по удалению отложения при неизменных значениях входных параметров будут равны между собой и функционально зависеть от пройденного потоком расстояния:

$$\begin{cases} \Pi_{\text{тех}} = \Pi_{\text{отл}} = v_{\text{п.ж}} V_{\text{отл}}; \\ \Pi_{\text{тех}} = f(L). \end{cases} \quad (3, [24])$$

Практический интерес поиска оптимальной скорости очистного потока $v_{\text{п.ж}}$ через установку клапанного типа в зависимости от основных факторов процесса заключается в построении номограмм, пользуясь которыми можно выбирать скорость этого потока для скважины конкретной глубины, диаметра и степени зарастания отложениями.

Технология очистки с применением модернизированного обратного клапана, изготовленного с учетом описанных выше формул, была испытана на одной из скважин НГДУ «Туймазанефть». Дебит скважины после 146 сут эксплуатации снизился с 47 до 29 $\text{м}^3/\text{сут}$. Расчетный вес груза для срабатывания клапана составил 15,5 кг. После оста-

новки скважины и обратной циркуляции жидкости из НКТ в скважину в течение 10 мин ее вновь запустили. Новый дебит составил 42 м³/сут, т. е. восстановился на 89 %.

Заключение

Системный подход к процессу очистки погружного оборудования скважин гидродинамическим

способом позволил выявить основные элементы процесса и их взаимосвязь. Показана практическая польза поиска оптимальных конструктивных параметров установки клапанного типа и скорости очистного потока через нее, в зависимости от глубины скважины, диаметра насосно-компрессорной трубы и степени застарения отложениями приемной сетки фильтра электроцентробежного насоса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Апасов Р.Т., Шошаева З.А. Способы защиты от механических примесей в добываемой жидкости // Инновации в науке: научный журнал. – 2017. – № 1 (62). – С. 86–88.
2. Кадетов А.В. Технологии НПФ «Пакер» для осложненного фонда скважин // Инженерная практика. – 2018. – № 4. – С. 73–75.
3. Валиханов А.В. Вопросы подъема обводненной и безводной нефти фонтанным и насосным способами. – Казань: Таткнигоиздат, 1971. – 148 с.
4. Мищенко И.Т. Скважинная добыча нефти. – М.: Нефть и газ, 2003. – 816 с.
5. Михайлов А.Г. Комплексная защита скважинного оборудования при пескодразрывании в ООО «РН-Пурнефтегаз» // Территория нефтегаз. – 2010. – № 12. – С. 84–89.
6. Ашрафян М.О. Совершенствование конструкций забоев скважин. – М.: Недра, 1986. – 156 с.
7. Магадова Л.А. Разработка композиции для крепления призабойной зоны пласта в скважинах подземных хранилищ газа // Территория НЕФТЕГАЗ. – 2012. – № 5. – С. 63–67.
8. Якимов С.Б. Сепараторы песка для защиты погружных насосов. Текущая ситуация и перспективы применения технологии // Территория НЕФТЕГАЗ. – 2014. – № 2. – С. 44–58.
9. Атрушкевич С.А. Эжекторная очистка скважин. Опыт разработки и применения // Время колтюбинга. Время ГРП. – 2017. – № 3 (061). – С. 26–27.
10. ACTive – Семейство активных сервисов ГНКТ // Schlumberger. 2019. URL: <https://www.slb.ru/upload/iblock/4b5/active.pdf> (дата обращения 28.05.2018).
11. Bohnhorst D. Hydrodynamische Kanalreinigungsgeräte // Stadthygiene. – 1961. – № 11. – С. 233–240.
12. Integrated Wellbore Cleanout Systems: Improving Efficiency and Reducing Risk / A. Ali, C.G. Blount, S. Hill, J. Pokhriyal, X. Weng, M.J. Loveland, S. Mokhtar, J. Pedota, M. Rodso, R. Rolovic, W. Zhou // Oilfield Review. – 2005. – V. 17. – № 2. – P. 4–13.
13. Pipe cleaning nozzle: Pat. 3744723 US on the invention, Int. Cl. B05b1/26, 1973.
14. Nozzle: Pat. 3814330 US on the invention, Int. Cl. B05b1/14, 1974.
15. Vorrichtung zum Reinigen von Rohren, Kanalen, Behältern sowie der Siebe und Filze von Papiermaschinen: Pat. 400028 CH hauptpatent, Int. Cl. E03F, 1966.
16. Булчаев Н.Д. Защита насосного оборудования нефтяных скважин в осложненных условиях эксплуатации: монография. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. – 138 с.
17. Клапан обратный электроцентробежной установки и способ очистки фильтра на приеме насоса: пат. № 2544930 Рос. Федерации, № 2013142546/03; заявл. 17.09.13; опубл. 20.03.2015, Бюл. № 8. – 9 с.
18. Азеев А.А. Автоматизация процесса очистки внутрискважинного оборудования на основе клапана с аналоговым механизмом // Газовая промышленность. – 2016. – № 4. – С. 82–87.
19. Penberthy W.L., Shaughnessy C.M. Sand Control. SPE Series on Special Topics, V. 1. Society of Petroleum Engineers Publ., 1992. – 98 р.
20. Practical Approaches to Sand Management / A. Acock, T. O'rourke, D. Shirmboh et al. // Oilfield Review. – 2004. – V. 16. – № 1. – P. 10–27.
21. Harrisberger C. Jr, Harrisberger W. Stability of sand arches: a key to sand control // Journal of Petroleum Technology. – 1970. – V. 22 (7). – P. 821–829.
22. Смольников С.В. Повышение эффективности эксплуатации продуктивных пластов, сложенных слабосцепментированными песчаниками: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2015. – 24 с.
23. Литвиненко К.В. Прогнозирование технического состояния УЭЦН в условиях интенсивного выноса мехпримесей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Уфа, 2016. – 24 с.
24. Азеев А.А. Повышение производительности комплекса оборудования для бестраншейного ремонта трубопроводов способом комбинированного торообразного рукава: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Братск, 2011. – 23 с.

Поступила 29.05.2018 г.

Информация об авторах

Азеев А.А., кандидат технических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Института нефти и газа Сибирского Федерального университета.

Булчаев Н.Д., кандидат технических наук, заведующий кафедрой разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Института нефти и газа Сибирского Федерального университета.

Безверхая Е.В., кандидат технических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Института нефти и газа Сибирского Федерального университета.

UDC 622.323:517.1

SYSTEMATIC ANALYSIS AND HYPOTHESIS OF PHYSICAL PATTERN OF WELL SUBMERSIBLE EQUIPMENT PURIFICATION USING THE UPGRADED BACKPRESSURE VALVE

Alexander A. Azeev¹,

3-a@li.ru

Nurdi J. Bulchaev¹,

nbulchaev@yandex.ru

Elena V. Bezverkhaya¹,

bezverkhaya.elena@mail.ru

¹ Siberian Federal University,
82, Svobodny avenue, Krasnoyarsk, 660041, Russia.

Relevance. Analysis of technical means and methods of controlling sand entry allows supposing the presence of significant reserves to improve their effectiveness. In particular, it was found that most methods of reducing the influence of mechanical impurities on performance of pumping equipment currently or do not solve the problem fundamentally, or do not have a long-term nature. Hydrodynamic cleaning of submersible equipment, despite its efficiency, is impossible without tripping. The alternative to this method is the device of the valve type. However, their application is constrained because of the unsolved issue of selection of optimal design parameters of these devices. In this relation, there is a need for appropriate theoretical research.

The main aim of the research is to carry out a system analysis and to propose a hypothesis of physical pattern of well submersible equipment purification using the upgraded backpressure valve.

Methods: systematic analysis of well submersible equipment purification.

Results. System analysis of operation of valve-type water treatment plants shows that the parameters of a special purification equipment have the largest number of relations among all the elements of the internal structure. Therefore, further study of the system is related to selection of corresponding subsystem, which determines only purification as well as to determination of this process physical pattern. The authors have proposed the hypothesis of purification physical nature. Taking into account this pattern, you can notice that the main aim of the entire system is implemented in the subsystem «Operating conditions – constructive and technological parameters of valve performance». Identification of this subsystem allowed in general determining the relationship between purification performance and the main elements of the internal structure of this process. Practical use of the found interrelations is in possibility of informed search for optimal design parameters of the valve type device and purification flow rate through it, depending on the main factors.

Key words:

Backpressure valve, producing well, purification, filter, electrical submersible pumping.

REFERENCES

1. Apasov R.T., Shoshaeva Z.A. Ways to protect against mechanical impurities in the produced fluid. *Innovatsii v nauke: nauchny zhurnal*, 2017, no. 1 (62), pp. 86–88. In Rus.
2. Kadetov A.V. Technologies NPF «Packer» for a complicated well stock. *Inzhenernaya praktika*, 2018, no. 4, pp. 73–75. In Rus.
3. Valikhanov A.V. *Voprosy podema obvodnennoy i bezvodnoy nefti fontannym i nasosnym sposobami* [The issues of lifting watered and anhydrous oil in a fountain and pumping way]. Kazan, Tat-knigoizdat Publ., 1971. 148 p.
4. Mishchenko I.T. *Skvazhinaya dobycha nefti* [Downhole oil production]. Moscow, Neft i gaz Publ., 2003. 816 p.
5. Mikhaylov A.G. Complex protection of the borehole equipment at sand entry in Ltd company «RN-Purneftegaz. Territoriya NEFTEGAZ», 2010, no. 12, pp. 84–89. In Rus.
6. Ashrafyant M.O. *Sovershenstvovanie konstruktsiy zaborov skvazhin* [Perfection of wells designs]. Moscow, Nedra Publ., 1986. 156 p.
7. Magadova L.A. Development of composition for fastening bottomhole zone of layer in wells of underground gas storages. *Territoriya NEFTEGAZ*, 2012, no. 5, pp. 63–67. In Rus.
8. Yakimov S.B. Sand separators for protection of submersible pumps. Current situation and prospects of use of technology. *Territoriya NEFTEGAZ*, 2014, no. 2, pp. 44–58. In Rus.
9. Atrushkevich S.A. Ejector cleaning wells. Experience of development and application. *Vremya kolytubinga. Vremya GRP*, 2017, no. 3 (061), pp. 26–27. In Rus.
10. ACTive – Semeystvo aktivnykh servisov GNKT [ACTive is the family of CT active services]. Schlumberger. 2019. Available at: <https://www.slb.ru/upload/iblock/4b5/active.pdf> (accessed 28 May 208).
11. Bohnhorst D. Hydrodynamische Kanalreinigungsgeräte [Hydrodynamic sewer cleaning devices]. Stadtehygiene, 1961, no. 11, pp. 233–240.
12. Ali A., Blount C.G., Hill S., Pokhriyal J., Weng X., Loveland M.J., Mokhtar S., Pedota J., Rodsjo M., Rolovic R., Zhou W. Integrated Wellbore Cleanout Systems: Improving Efficiency and Reducing Risk. *Oilfield Review*, 2005, vol. 17, no. 2, pp. 4–13.
13. Donald W. *Pipe cleaning*. Pat. 3744723 US on the invention, 1973.
14. Masters Ph.C. *Nozzle*. Pat. 3814330 US on the invention, 1974.
15. Hammelmann P. *Vorrichtung zum Reinigen von Rohren, Kanalen, Behältern sowie der Siebe und Filze von Papiermaschinen* [Containers and sieves and felts of paper machines]. Pat. 400028 CH hauptpatent, 1966.
16. Bulchaev N.D. *Zashchita nasosnogo oborudovaniya neftyanykh skvazhin v oslozhnennykh usloviyakh eksploatatsii* [Protection of pumping equipment of oil wells in complicated operating conditions]. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2015. 138 p.
17. Valeev M.D., Vedernikov V.Y., Bulchaev N.D., Salimgareev S.M., Gasarov V.Z. *Klapan obratnoy elektrotsentrobezhnoy ustanovki i sposob ochistki filtra na prieme nasosa* [The reverse valve of the electric centrifugal installation and the way of cleaning the filter at the pump intake]. Patent RF, no. 2544930, 2015.

18. Azeev A.A. Automation of process of cleaning of the intra borehole equipment on the basis of the valve with the analog mechanism. *Gazovaya promyshlennost*, 2016, no. 4, pp. 82–87. In Rus.
19. Penberthy W.L., Shaughnessy C.M. *Sand Control. S P E Series on Special Topics*. Society of Petroleum Engineers Publ., 1992. Vol. 1, 98 p.
20. Acock A., O'rourke T., Shirmboh D. Practical Approaches to Sand Management. *Oilfield Review*, 2004, vol. 16, no. 1, pp. 10–27.
21. Harrisberger C. Jr, Harrisberger W. Stability of sand arches: a key to sand control. *Journal of Petroleum Technology*, 1970, vol. 22 (7), pp. 821–829.
22. Smolnikov S.V. *Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii produktivnykh plastov slozhennykh slabostsementirovannymi peschannikami*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Increase in efficiency of operation of the productive layers put by slightly cemented sandstones. Cand. Diss. Abstract]. Moscow, 2015. 24 p.
23. Litvinenko K.B. *Prognozirovanie tekhnicheskogo sostoyania UECN v usloviyah intensivnogo vynosa mekhprimesey*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Forecasting of technical condition of ESP in the conditions of intensive carrying out of mechanical impurity. Cand. Diss. Abstract]. Ufa, 2016. 24 p.
24. Azeev A.A. *Povyshenie proizvoditelnosti kompleksa oborudovaniya dlya bestransheynogo remonta truboprovodov sposobom kombinirovannogo toroobraznogo rukava*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Increasing the productivity of a complex of equipment for trenchless pipeline repair using the method of a combined toroidal liner. Cand. Diss. Abstract]. Bratsk, 2011. 23 p.

Received: 29 May 2018.

Information about the authors

Alexander A. Azeev, Cand. Sc., associate professor, Siberian Federal University.

Nurdi J. Bulchaev, Cand. Sc., head of department, Siberian Federal University.

Elena V. Bezverkhaya, Cand. Sc., associate professor, Siberian Federal University.

УДК 622.791(315)

ОЦЕНКА ГАЗОНОСНОСТИ ПЛАСТА К₁₀ В ПРЕДЕЛАХ ШЕРУБАЙНУРИНСКОГО УЧАСТКА КАРАГАНДИНСКОГО УГОЛЬНОГО БАССЕЙНА

Кабирова Светлана Васильевна¹,

kabirsv@mail.ru

Ворошилов Валерий Гаврилович¹,

v_g_v@tpu.ru

Портнов Василий Сергеевич²,

vs_portnov@mail.ru

Ахматнуров Денис Рамильевич²,

d_akhmatnurov@mail.ru

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

² Карагандинский государственный технический университет,
Республика Казахстан, 100027, г. Караганда, пр. Нурсултана Назарбаева, 56.

Цель: исследование газоносности угольного пласта К₁₀ для оценки ресурсов метана и возможности его добычи на Шерубайнуринском участке Карагандинского угольного бассейна.

Методика. Для определения величины природной газоносности угольного пласта К₁₀ Карагандинского угольного бассейна были использованы три методики, основанные на расчетных и фактических данных по газовыделению из пласта при его разработке: 1) расчет газоносности по коэффициентам Лэнгмюра; 2) отбор и обработка проб угля по способу фирмы DMT GmbH & Co. KG; 3) измерение фактического газовыделения. Далее проводилось уточнение указанной величины на основе сравнения результатов, полученных различными способами. Исследования проводились на поле шахты «Абайская» АО «АрселорМиттал Темиртау» при отработке пласта К₁₀.

Результаты. Газоносность пласта К₁₀ в пределах Шерубайнуринского участка оценивается в среднем в 17,5 м³/т. Однако способ определения природной газоносности пластов по количеству выделившегося метана дает весьма усредненную величину. Проделанные исследования показали, что результаты определений природной газоносности угольных пластов, выполненных по способу фирмы DMT Gmb&Co, имеют хорошую сходимость с расчётной величиной. Газоносность угольных пластов Шерубайнуринского участка нарастает с глубиной по зависимости, описываемой уравнением регрессии, в общем случае, имеющем вид уравнения Ленгмюра. Результаты исследований показывают, что в практически нетронутом массиве на расстоянии 38...42 м от стенки выработки газоносность постоянна.

Научная новизна. Выполнены комплексные исследования газоносности угольного пласта и характера влияния разгрузки на ее величину в Карагандинском бассейне.

Практическая значимость. Сопутствующий добыче угля газ метан при разработке шахт используется для выработки электроэнергии и обеспечения потребностей самой шахты. В будущем на территории Казахстана утилизация угольного метана позволит экономить природный газ и сокращать выбросы парниковых газов. Это перспективный энергетический рынок. Газопроницаемость и метаноносность угольных пластов – это главные критерии оценки метаноугольных площадей при их подготовке к освоению. Исследования газоносности угольных пластов позволят правильно оценивать ресурсы метана и возможности его добычи на Шерубайнуринском участке Карагандинского угольного бассейна

Ключевые слова:

Метан, угольный пласт, дегазация, перспективы добычи, промышленное использование, метанобезопасность, газоотдача.

Постановка проблемы

Основными источниками энергии являются: нефть, природный газ, горючие сланцы, уголь, уран и торф; на них приходится около 93 % производимой энергии. Остальные 7 % за счет возобновляемых источников, таких как вода, солнце, ветер и другие геотермики. Вместе с тем ни один вид природных ресурсов, как бы ни велики были его запасы, не может быть неисчерпаемым. При нынешних темпах потребления природных ресурсов в мире нефтепродуктов хватит примерно на 41 год, неразведенной их части – ещё на 10–25 лет, природного газа – на 55 лет. Решение данной проблемы возможно за счет разработки альтернативных источников сырья.

Во всем мире метан угольных пластов признан одним из альтернативных источников энергетического сырья. Изучение потенциала его разведки и последующей добычи в Республике Казахстан становится все более актуальным.

Наибольший интерес представляют залежи метана, приуроченные к угленосным толщам Карагандинского угольного бассейна. Исследования газоносности угольных пластов карагандинской свиты в связи с планируемой добычей угольного метана являются частью Стратегической программы развития Республики Казахстан [1].

Основной стратегией развития Республики Казахстан до 2030 г. выступает создание единой и независимой национальной топливно-энергетиче-

ской промышленности. Решение такой задачи основывается, прежде всего, на мобилизации и сбалансированном использовании всех угольных ресурсов Казахстана. Важным направлением развития топливно-энергетического комплекса страны является освоение нетрадиционных источников сырья, основной среди которых – метан угольных месторождений. Этот газ представляет собой наиболее экологически чистый, доступный и дешевый из известных в мире нетрадиционных источников энергетического сырья.

Значительные ресурсы метана в угольных месторождениях Республики Казахстан, высокая его концентрация в угольных толщах, наличие инфраструктуры и крупных потребителей газа в непосредственной близости от месторождений предопределяют возможность широкомасштабной добычи и утилизации газа метана.

Использование метана угольных месторождений позволит значительно улучшить экономическую обстановку в ряде регионов Казахстана.

Следует отметить, что Карагандинский угольный бассейн ежегодно выбрасывает в атмосферу более 500 млн м³ метана, Экибастузский бассейн около 2 млрд м³, при этом по своей роли в создании парникового эффекта 1 т метана эквивалентна 3 т углекислого газа. Освоение метаноугольных месторождений Казахстана позволит уменьшить количество выбросов метана в атмосферу и кардинально повысить безопасность горных работ при добывче угля. Реализация угольного метана не только поможет решать энергетические проблемы индустриальных регионов Центрального и Восточного Казахстана, но и окажет влияние на дальнейшее развитие социальной сферы и решение экологических проблем столицы – города Нур-Султан [2–8].

Распределение метана в угленосной толще подчиняется закономерностям газовой статики, которые отражают изменение газоносности горного массива в зависимости от его пористости, газового давления, температуры, естественной влажности, газопроницаемости, стадии метаморфизма и других факторов.

В ненарушенном горными работами массиве происходит миграция газа, однако газодинамические процессы здесь соизмеримы с геологическими периодами, поэтому при расчетах их не учитывают. В массиве содержатся газы воздушного происхождения (углекислый газ, азот, инертные и другие газы), которые проникают в недра с земной поверхности, и газы, генерирующиеся при метаморфизме угля и пород (метан, водород, сероводород, гомологи метана). В результате диффузионного движения газов в различных направлениях в толще образуются: азотно-углекислотная, азотная, азотно-метановая и метановая зоны. Первые три зоны образуют область газового выветривания, которая граничит с метановой зоной, где содержание метана превышает 80 % и газовое давление выше 0,1...0,15 МПа [9–13].

Газоносность угленосной толщи определяется, в первую очередь, ее газопроницаемостью, сорбционной емкостью пород и установившимся газовым давлением [1, 14].

Сорбционная емкость угленосных толщ согласно [15] определяется первичной газоносностью по формуле (1):

$$x = x_{\text{cp}} + x_{\text{cb}} = \frac{abP}{1+aP} + \frac{m_i P}{kP_1}, \quad (1)$$

x_{cp} , x_{cb} – соответственно количество сорбированного и свободного газа, Дж/моль; a , b – константы сорбции; P , P_1 – давление газа в толще и на земной поверхности, МПа; m_i – пористость, %; k – коэффициент сжимаемости газа.

Сорбционная газоемкость массива зависит также от газового давления, которое растет с глубиной. По глубине толщи различают три пояса с различными величинами и характером изменения газового давления [16] (рис. 1).

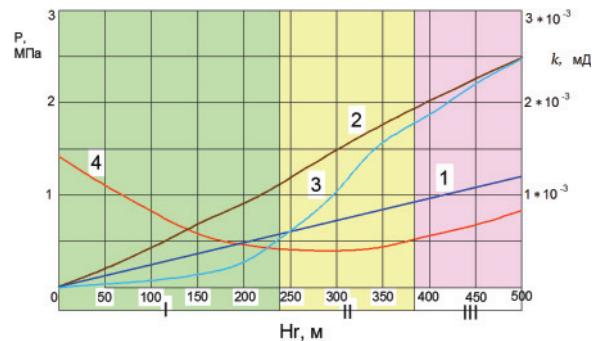


Рис. 1. График зависимости газопроницаемости (k) угольных пластов и газового давления (P) от глубины горных работ H ; 1 – гидростатическое давление; 2 – статическое давление горных пород; 3 – давление метана в угольных пластах; 4 – газопроницаемость угольных пластов; I, II, III – зоны изменения давления и газопроницаемости

Fig. 1. Graph of coal seams gas permeability (k) and gas pressure (P) dependence on the depth of mining works H ; 1 is the hydrostatic pressure; 2 is the rocks static pressure; 3 is the methane pressure in coal seams; 4 is the gas permeability of coal seams; I, II, III are the zones of pressure and gas permeability change

В первом поясе давление газа приближается к гидростатическому. Во втором поясе, который находится в верхней части метановой зоны, давление газа становится выше гидростатического, но остается ниже статического давления пород. Третий пояс располагается в наиболее глубокой части метановой зоны, где давление газа приближается к статическому давлению пород. Закономерность изменения газового давления с глубиной рассчитывается по формуле (2) Г.Д. Лидина [15]:

$$P = B(H_1 - H_0)^v + P_0, \quad (2)$$

где H_1 – глубина замера давления, м; H_0 – глубина верхней границы метановой зоны, м; B , v – эмпирические коэффициенты.

Расчеты показывают, что в угольных бассейнах стран СНГ газовое давление на максимально доступных глубинах колеблется от 3 до 5 МПа, в отдельных случаях поднимаясь выше 10 Мпа.

Газоносность угленосной толщи определяется также естественной газопроницаемостью, которая зависит от условий залегания пластов, степени обнажения толщи и длительности циклов эрозии. Различают три пояса изменения естественной газопроницаемости толщи по глубине (рис. 1).

Газопроницаемость пород верхнего пояса повышается по мере приближения к земной поверхности. Так как во втором поясе газовое давление ниже статического давления пород, то газопроницаемость толщи здесь понижена. По мере увеличения газового давления в третьем поясе газопроницаемость толщи вновь возрастает за счет статического давления пород.

Между пластовым давлением (P) и газопроницаемостью (k) существует количественная связь, выражаемая формулой (3) [15]:

$$k = k_0 e^{-bP}, \quad (3)$$

где k_0 – начальная газопроницаемость, мД; b – коэффициент; e – основание натуральных логарифмов.

Газопроницаемость ископаемых углей в природных условиях зависит от макроструктуры угольного пласта, степени и характера заполнения фильтрующего объема пор природной влагой, градиента давления метана и особенностей проявления горного давления.

В ненарушенном угольном массиве фильтрующий скелет угля обладает высоким сопротивлением и сравнительно малопроницаем, поэтому газопроницаемость угольного пласта в значительной степени зависит от целостности массива. По газопроницаемости угольные пласти разделяются на: высокогазопроницаемые – $k > 2 \dots 3 \cdot 10^{-3}$ мД; среднегазопроницаемые $k = 1 \dots 2 \cdot 10^{-3}$ мД; низкогазопроницаемые $k < 1 \cdot 10^{-3}$ мД.

Газопроницаемость углей основных бассейнов стран СНГ в 3–5 раз выше газопроницаемости пород. В табл. 1 приведены средние значения газопроницаемости разрабатываемых угольных пластов Карагандинского бассейна [16], полученные экспериментальным путем.

Таблица 1. Средние величины газопроницаемости разрабатываемых угольных пластов Карагандинского бассейна

Table 1. Average values of the developed coal seams gas permeability of the Karaganda basin

| Пласт Layer | Глубина от поверхности, м Depth from a surface, m | Выход летучих, % Volatile content, % | Средняя величина газопроницаемости, 10^{-2} мД Average size of gas permeability, 10^{-2} mD |
|-----------------|--|---|---|
| K ₁₈ | 400...500 | 28...32 | 0,6...0,9 |
| K ₄ | 350...500 | 26...31 | 0,3...0,7 |
| K ₁₃ | 400...500 | 25...30 | 0,9...1,1 |
| K ₁₂ | 250...450 | 23...28 | 3,3...5,5 |
| K ₁₀ | 400...450 | 21...27 | 1,0...1,5 |
| K ₇ | 400...500 | 20...26 | 1,2...1,8 |
| K ₄ | 250...400 | 20...25 | 1,0...1,1 |
| K ₃ | 300...400 | 19...24 | 0,8...1,0 |
| K ₂ | 200...300 | 22...28 | 0,7...0,9 |
| A ₅ | 300...450 | 23...25 | 0,7...0,9 |

В табл. 2 приведены расчетные значения изменения газопроницаемости в зависимости от глубины залегания разрабатываемых угольных пластов Карагандинского бассейна, выполненные А.К. Акимбековым и А.А. Маховым в КарГТУ. Коэффициент анизотропии для пластов Карагандинского бассейна колеблется от 5 до 6.

Таблица 2. Расчетные значения газопроницаемости угольных пластов на различных глубинах

Table 2. Calculated values of coal seams gas permeability at various depths

| Пласт Layer | Интервал глубин, м Interval of depths, m | Газопроницаемость, 10^{-2} мД Gas permeability, 10^{-2} mD |
|--------------------------------|---|---|
| K ₁₀ | 400 | 1,51 |
| | 600 | 0,19 |
| | 800 | 0,05 |
| K ₁₂ | 400 | 2,77 |
| | 600 | 0,35 |
| | 800 | 0,09 |
| Д ₁ –Д ₅ | 400 | 5,85 |
| | 600 | 0,75 |
| | 800 | 0,19 |
| Д ₆ | 400 | 3,89 |
| | 600 | 0,50 |
| | 800 | 0,13 |

Анализ данных табл. 1, 2 свидетельствует о достаточно высокой достоверности и сходимости результатов, полученных экспериментальным и расчётным путём.

Наибольшие значения газопроницаемости по напластованию угольных пластов имеет пласт K₁₂ и пласти долинской свиты Д₁, Д₅ и Д₆. В Карагандинском бассейне глубина зоны газового выветривания составляет 50...230 м. На этих глубинах газоносность угольных пластов достигает 25...30 м³/т, а газоносность пород – 4...6 м³/т [17].

Максимальная газоносность углей и газопроницаемость пород установлена в Карагандинском бассейне на глубинах около 500 м. Вне зоны газового выветривания от 150–200 до 300–500 м происходит интенсивное повышение газоносности с максимальным значением на глубине 500 м. Ниже этой глубины темп роста газоносности снижается и приближается к предельным значениям сорбционной емкости. Уменьшение темпа роста газоносности с глубиной объясняется снижением сорбционной емкости толщи с ростом температуры пород, однако на этих глубинах газоносность составляет десятки кубометров газа на 1 т угля.

Общей закономерностью изменения метаноносности является увеличение газоносности с возрастанием степени метаморфизма угля. Связь газоносности со степенью метаморфизма имеет сложный характер. Максимальной газоносностью (до 40 м³/т) обладают угли, находящиеся в группе низкометаморфизованных антрацитов и полуантрацитов. Угли с выходом летучих от 4,5 до 24 %, как правило, имеют газоносность выше 20 м³/т. Значения от 10 до 20 м³/т наблюдаются у углей с выходом летучих от 4,5 до 14,5 % и от 23 до 43 % [1, 15].

Приведенные выше данные показывают, что на распределение газа в угленосной толще оказывает влияние ряд факторов, из которых главными являются газовое давление и газопроницаемость.

Выделение ранее нерешенных частей общей проблемы

Эффективность проводимых дегазационных мероприятий по угольным пластам, как правило, определяется газовым состоянием угольного массива (параметрами температуры и давления газа, газоносностью пород), физическими свойствами и строением угля, существующими технологиями и экономическими условиями добычи.

Когда пласти с газоносностью 15...20 м³/т разрабатываются высокопроизводительными очистными забоями с нагрузками более 2000 т/сут, наблюдается значительное отставание подготовительных работ от очистных. В результате время для предварительной дегазации пласта сокращается, что ведёт к простоям очистных забоев по газу. Кроме того, с увеличением глубины горных работ естественная скорость газовыделения в дегазационные скважины часто не обеспечивает требуемого уровня извлечения газа из пласта. Это обусловлено низкой природной фильтрационной и диффузационной проницаемостью угля, его высокой газоемкостью и низкой (по сравнению с газовыми коллекторами) пористостью.

Газопроницаемость и метаноносность углей являются одним из важнейших критериев оценки перспективности метаноугольных площадей для подготовки к освоению.

Поэтому для определения перспективности добычи метана из угольных пластов необходимы детальные исследования по определению газоносности и проницаемости угольных пластов на тех участках, где планируется такие мероприятия. В Карагандинском угольном бассейне одним из таких объектов является Шерубайнуринский участок.

Формулировка целей статьи

Изучение природной газоносности угольного пласта K₁₀ на Шерубайнуринском участке Карагандинского угольного бассейна производилось с целью определения перспективности добычи метана из угольных пластов этого участка. При этом ставились следующие задачи:

- экспериментальное определение газоносности пласта K₁₀ способом отбора проб и путем пересчета газообильности выемочного участка при отработке пластов;
- определение газоносности пласта K₁₀ расчётным способом;
- сравнение экспериментальных и расчётных данных по метаноносности пласта K₁₀;
- установление основных закономерностей изменений метаноносности угольного пласта K₁₀ в зависимости от глубины его залегания.

- определение характера влияния разгрузки призабойной зоны пласта на величину метаноносности.

Изложение основного материала

Границы поясов с различными величинами и характером изменения газового давления и газопроницаемости (рис. 1) являются зонами термодинамической неустойчивости углепородного массива. Поэтому при техногенном воздействии на угольные пласти в этих зонах они будут обладать повышенной газоотдающей способностью. В нашей работе такие зоны повышенной флюидоактивности определены на глубинах 250, 360...370 и 500 м. Эти данные нашли практическое подтверждение: в работе [18] приводится график влияния глубины залегания пласта на дебит скважин гидрорасщепления (рис. 2).

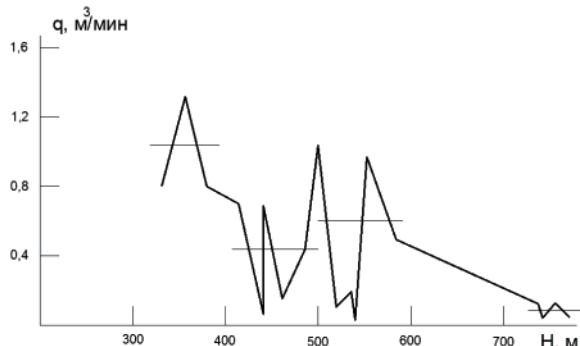


Рис. 2. Влияние глубины залегания пласта на дебит скважин гидрорасщепления

Fig. 2. Dependence of gas release intensity in the hydrodynamic wells on the formation depth

Как видно из этого графика, наибольший дебит скважины имеют на глубине 360 и 500 м, т. е. на границе поясов с различными величинами и характером изменения газового давления и проницаемости.

Для расчета газовыделения из угольного пласта необходимо знать закономерности изменения исходного газового давления в процессе ведения горных работ. Исследованиями [16] установлено, что при переходе в зону повышенных статических напряжений кривая газового давления выпадает и меняет форму с выпуклой на вогнутую (рис. 3). Эмпирическую функцию, описывающую газовое давление в угольном пласте за период времени с момента его обнажения и до стабилизации напряженно-деформированного состояния, можно определить по формуле (4):

$$P_x = P_0 + (P_1 - P_0) e^{-\frac{x^2}{2l^2(t)}}, \quad (4)$$

где P_x , P_0 — соответственно, давление газа на расстоянии x от обнаженного пласта и первоначальное давление в пласте, МПа; P_1 — давление газа на вскрытой поверхности пласта, МПа; $l(t)$ — глубина залегания зоны разгрузки, м.

Расчетные значения давления газа в угольном пласте в зоне влияния очистных работ, определенные по формуле, имеют незначительное расхождение с данными, определенными экспериментальным путем (рис. 3).

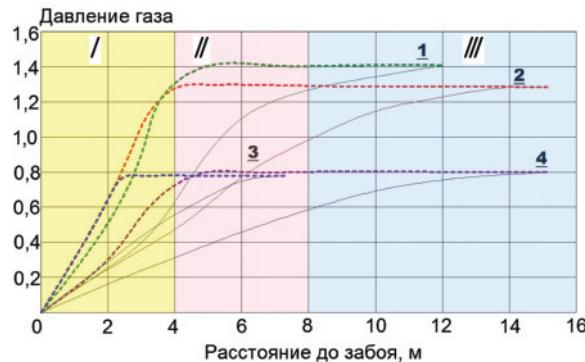


Рис. 3. График зависимости давления газа P в разрабатываемом угольном пласте от расстояния X до забоя с учетом физико-механических свойств пород: сплошные линии – для момента обнажения пласта, пунктирные – для момента затухания деформаций; 1, 2, 3, 4 – различные пласти; I – блочное расщепление, II – зона неупругих деформаций, III – зона упругих деформаций

Fig. 3. Graph of dependence of gas pressure P in the developed coal seam on the distance X to the face, taking into account the rheological properties of the rocks: solid lines – for formation opening time, dotted lines – for deformations attenuation moment; 1, 2, 3, 4 are the different seams; I – block dismemberment, II – inelastic deformation zone, III – elastic deformation zone

Глубина залегания угольного пласта оказывает существенное влияние на его газоносность [17]. Газоносность угольных пластов Шерубайнуринского участка нарастает с глубиной по зависимости, описываемой уравнением регрессии (рис. 4), и в общем случае имеет вид уравнения Ленгмюра (5) [1]:

$$X = X_r \frac{100 - W - A_c}{100} \text{ м}^3/\text{т}, \quad (5)$$

где X_r – природная метаноносность сухой беззолевой массы угля, $\text{м}^3/\text{т}$; W – природная влажность угля, %; A_c – зольность угля, %.

Природная метаноносность сухой беззолевой массы угля (X_r , $\text{м}^3/\text{т}$ с.б.м.) определяется из выражения (6) [1]:

$$X_r = \frac{1,3c(H - H_0)}{1 + b(H - H_0)} \text{ м}^3/\text{т}, \quad (6)$$

где H – глубина разработки, м; H_0 – глубина зоны газового выветривания, м; c и b – коэффициенты уравнения Ленгмюра.

Значения параметров уравнений (5) и (6) принимаются по «Классификатору метаноносности угольных пластов Карагандинского бассейна» [19] с учётом уточнённых параметров по фактическому метановыделению в подготовительные выработки, а для новых полей – по данным геологических отчётов.

Остаточная метаноносность угля, оставленного в целиках, вычисляется по формуле (7) [1]:

$$X_o = 0,001 X_{o,r} (100 - W - A_c), \quad (7)$$

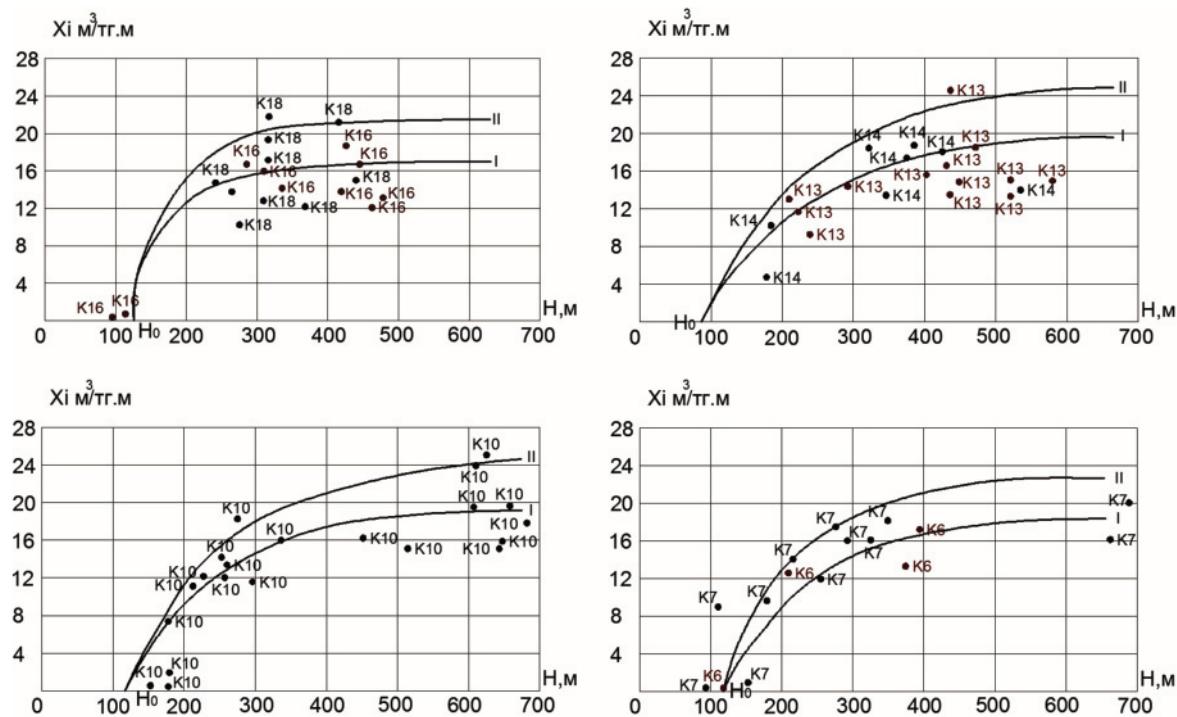


Рис. 4. Графики изменения газоносности пластов K_{18} , K_{16} , K_{14} , K_{13} , K_{12} , K_{10} , K_7 , K_6 в зависимости от глубины их залегания на Шерубайнуринском участке: I – без учета потерь при отборе проб; II – с учетом потерь

Fig. 4. Graphs of changes in gas content of seams K_{18} , K_{16} , K_{14} , K_{13} , K_{12} , K_{10} , K_7 , K_6 , depending on the depth of their location in the Sherubaynurinsky district: I – without taking into account losses during sampling; II – taking into account the losses

где $X_{o,r}$ – остаточная газоносность сухой беззольной массы угля при атмосферном давлении, m^3/t с.б.м. принимается по табл. 3.

Таблица 3. Остаточная метаноносность ($X_{o,r}$) углей
Table 3. Residual methane content ($X_{r,g,c}$) of coals

| Значения $X_{o,r}$, m^3/t с.б.м. при выходе летучих веществ, % Values $X_{r,g,c}$ of $\text{m}^3/\text{t.d.a.w.}$ at an exit of volatiles, % | | | | |
|--|---------|---------|---------|---------|
| 12...18 | 18...26 | 26...35 | 35...42 | 42...50 |
| 7...6 | 6...5 | 5...4 | 4...3 | 3...2 |

Если до начала разработки угольный или сближенные к нему пласти (слои) были надработаны или подработаны, то в расчётные формулы вместо природной метаноносности пласта (X) подставляется остаточная метаноносность ($X_{o,r}$).

При многократной надработке или подработке остаточная метаноносность определяется по тем же формулам путём подстановки в них вместо (X) значения ($X_{o,r}$) после предыдущей надработки или подработки.

На основании факта выполнивания изотермы газоемкости угля при высоких давлениях метана можно предположить, что с увеличением глубины залегания темпы роста газоносности замедляются.

Давление метана P_g в угольных пластах возрастает по закону, близкому к гидростатическому [16] и вычисляется по формуле (8):

$$P_g = 10^{-2} \cdot (H - H_0). \quad (8)$$

Многочисленные измерения газового давления в шахтных условиях подтверждают эту связь. Данные экспериментальных работ по измерению газового давления в пласте D_6 Карагандинского бассейна на глубине 450...500 м показали, что его величина колеблется в пределах 2...3,5 МПа.

Описанная зависимость отражает плавное нарастание газового давления с увеличением глубины залегания пласта. Вместе с тем на практике отмечены случаи значительного выделения метана из угольных пластов суфлярного типа, что свиде-

тельствует о наличии в угленосной толще локальных зон с аномальными увеличениями газового давления и газоносности по сравнению с соседними участками.

Расчетное изменение природной газоносности пласта K_{10} с учетом зольности, выполненное нами, приведено на рис. 5. При расчете коэффициенты Лэнгмюра c и b принимались 0,265 и 0,0119 соответственно, $H_0 = 133$ м, $A_s = 25,4\%$, $W = 4,3\%$ («Классификатор метаноносности угольных пластов Карагандинского бассейна» [19]).

Характер изменения газоносности описывается уравнением (9):

$$X = AH^2 + BH + C, \quad (9)$$

где X – природная газоносность пласта с учетом влажности и зольности, m^3/t ; H – глубина залегания пласта, м; A , B , C – эмпирические коэффициенты, равные соответственно: 0,00006; 0,0686; 1,9857.

Практически газоносность угольных пластов можно определить путем отбора проб из угольного массива, а также путем пересчета газообильности выемочного участка при отработке пластов.

В управлении «Спецшахтомонтажгазация» УД АО «АрселорМиттал Темиртау» существует лаборатория по определению газоносности угольных пластов, оборудованная аппаратурой немецкой фирмы DMT и использующая ее методику отбора и разделки проб [20]. Специальным буровым инструментом с пневматическим приводом бурится скважина по пласту. Через каждые 2 м отбираются пробы угля и помещаются в герметичный сосуд.

Длина скважины составляет 20...22 м. В лаборатории с помощью газоанализатора определяется количество выделившегося газа из одной емкости. Затем проба размалывается и опять определяется количество выделившегося метана. Кроме содержания метана определяется влажность угля, зольность и выход летучих.

По содержанию метана из нескольких проб, отобранных с разных глубин, строится результатирующая кривая газоносности угля.

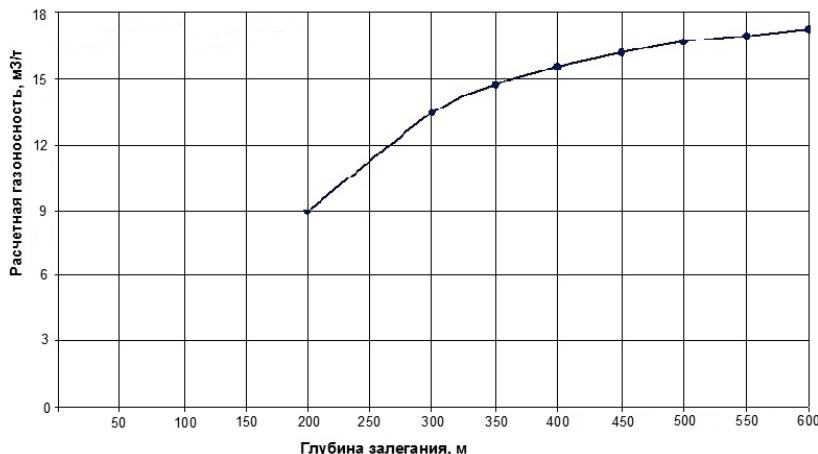


Рис. 5. Расчетное изменение с глубиной газоносности пласта K_{10} на шахте «Абайская»

Fig. 5. Estimated change with the depth of gas content of the K_{10} seam at the Abayskaya mine

Кривая отражает состояние угольного массива. Массив, непосредственно прилегающий к стенкам выработки, подвергся разгрузке и расчленению на блоки с образованием значительных трещин. В этой зоне газоносность пласта минимальная. С увеличением расстояния от стенки выработки влияние разгрузки уменьшается, зона блочного расчленения сменяется зоной неупругих деформаций, с постепенным уменьшением количества трещин в массиве. В этой зоне газоносность нарастает. На расстоянии 10...15 м от стенки выработки влияние разгрузки на массив минимально, здесь находится зона упругих деформаций, газоносность близка к природной.

Результаты работ по отбору проб угля из скважин, пробуренных с конвейерного промштрека 33K₁₀-С шахты «Абайская» на расстоянии 55 и 65 м от монтажной камеры 33K₁₀-С показали, что характер изменения газоносности выглядит следующим образом (рис. 6).

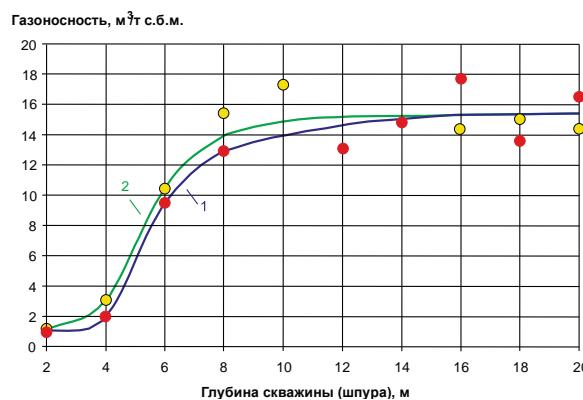


Рис. 6. Замеренное изменение газоносности пласта K₁₀ с глубиной скважины (шпура) в штреке 33K₁₀-С, шахта «Абайская»: 1 – в 65 м от монтажной камеры; 2 – в 55 м от монтажной камеры

Fig. 6. Measured change in gas content of the formation along the depth of the well in the drift 33K₁₀-C, Abayskaya mine: 1 – 65 m from the installation chamber; 2 – 55 m from the installation chamber

Газоносность угля в интервале скважины от 2 до 4 м увеличивается слабыми темпами, из-за значительных трещин, образовавшихся в результате деформации массива пород (блочное расчленение) (рис. 5, кривые 1 и 2). Затем с 4 до 8 м наблюдается ее резкое увеличение (зона неупругих деформаций, количество трещин резко сокращается). И с 8...9 м кривая роста практически выпадает, достигнув своего максимума в зоне упругих деформаций. Газоносность пласта K₁₀ в районе монтажной камеры 33K₁₀-С шахты «Абайская» на глубине 520 м составляет 18,9...19,3 м³/т.

Нами выявлена взаимозависимость расстояния от контура выработки до границ зон различного геомеханического и газодинамического состояния (10):

$$X^{n+1} + X - 1 = 0, \quad (10)$$

где X – отношение расстояния до границы предыдущей зоны к расстоянию до границы последую-

щей зоны; n – порядковый номер зоны, начиная от контура выработки.

По этой зависимости, зная размеры одной из зон, можно определить размеры других зон.

На шахте «Абайская» были проведены также работы по определению газоносности пласта K₁₀ на южном блоке. Глубина залегания пласта в месте отбора проб составляла 435 м. Пробы отбирались из скважины, пробуренной по пласту станком СБГ-1М в интервалах 38, 40, 42 м. Результаты исследований показывают, что в практически нетронутом массиве на расстоянии 38...42 м от устья скважины газоносность постоянна. Ее колебания возможны в зонах геологических нарушений, повышенного горного давления и т. д. Общая газоносность – 14,5 м³/т, газоносность при давлении 1 бар – 2,7 м³/т, десорбируемый газ – 11,8 м³/т [21].

Характер изменения газоносности пластов с расстоянием от стенок выработок определяется свойствами угольного массива, такими как: пластичность, влажность, трещиноватость, степень разгруженности.

Например, на шахте им. Кузембаева произошелся отбор проб угля пласта K₁₀ из парной выработки вентиляционного штрека 37K₁₀-В. Результаты обработки показали, что на глубине 570 м газоносность пласта K₁₀ закономерно нарастает до своего максимального значения, что свидетельствует о том, что блочное расчленение практически отсутствует или располагается в пределах 2 м от стенки выработки. Зона неупругих деформаций распространяется от 2 до 10 м. От 10 до 21 м расположена зона упругих деформаций, в которой образование трещин не происходит и газоносность угольного массива практически не меняется. Общая газоносность пласта на этой глубине составляет 17,2 м³/т, газоносность при давлении 1 бар – 2,7 м³/т, десорбируемый газ – 14,5 м³/т.

Если провести прямую линию через точку, лежащую в пределах зоны неупругих деформаций, то тангенс угла ее наклона характеризует состояние угольного массива в комплексе, т. е. чем больше тангенс, тем меньше подвержен массив деформациям с образованием трещин и, наоборот, чем тангенс меньше, тем больше массив подвергся изменению [22, 23].

Природная газоносность угольных пластов может быть также определена по количеству выделившегося метана при их отработке.

С сентября 2012 г. по декабрь 2013 г. на шахте «Абайская» производилась отработка северного блока пласта K₁₀ лавой 33 K₁₀-С.

Вентиляционный штрек был проведен на глубине 470 м, конвейерный – 540 м. Расчетная газоносность пласта 16,3–16,9 м³/т. За время работы лавы было добыто 1,15 млн т угля, средствами вентиляции извлечено 112,5 млн м³ метана, скважинами пластовой дегазации каптировано 4,6 млн м³. Таким образом, относительная газообильность выемочного участка составила 6,5 м³/т.

Результаты ранее проведенных исследований показали, что около 80 % метана, содержащегося в угле, выделяется в результате механического разрушения при работе комбайна, около 20 % остается в связанном состоянии. Учитывая это обстоятельство, можно сказать, что средняя газоносность пласта составляла 7,8 м³/т.

На шахте «Абайская» с мая 2011 г. по февраль 2012 г. производилась отработка южного крыла пласта К₁₀ лавой 321К₁₀–Ю. Вентиляционный штрек 321К₁₀–Ю был проведен на глубине 540 м, а конвейерный штрек 321К₁₀–Ю – на глубине 480 м. Вынимаемая мощность пласта составляла 3,2 м. Расчетная газоносность пласта К₁₀ по классификатору составила 16,2...16,9 м³/т.

За время работы лавы средствами вентиляции было извлечено 74,8 млн м³ метана при общей добыче 629 тыс. т угля. Скважинами предварительной и передовой дегазации было капитировано 40,2 млн м³. Таким образом, если отнести количество метана, выделившегося из отбитого угля в вентиляционную струю и скважины пластовой дегазации, к общей добыче угля, то получим относительную газообильность выемочного участка, равную 14,6 м³/т.

Следует отметить, что абсолютная газообильность выемочных участков достигала 140 м³/мин при нагрузке на лаву около 3000 т/сут, однако применяемые на шахте средства дегазации обеспечили необходимый уровень снижения метанообильности горных выработок.

Заключение

Газоносность пласта К₁₀ в условиях Шерубайнуринского участка оценивается в среднем в

17,5 м³/т. Однако способ определения природной газоносности пластов по количеству выделившегося метана дает весьма усредненную величину, так как трудно учесть точное количество метана, выделившегося из вынимаемой части пласта, невынимаемой части пласта, отбитого угля и вмещающих пород.

Проведенные исследования показали, что результаты определений природной газоносности угольных пластов, выполненных по способу фирмы DMT GmbH & Co. KG, при соблюдении всех требований, дают хорошую сходимость с расчётной величиной.

Газоносность угольных пластов Шерубайнуринского участка нарастает с глубиной по зависимости, описываемой уравнением регрессии, в общем случае имеющим вид уравнения Ленгмюра. На основании факта выполнования изотермы газоемкости угля при высоких давлениях метана можно предположить, что с увеличением глубины залегания темпы роста газоносности замедляются.

Характер изменения газоносности пластов с расстоянием от стенок выработок определяется свойствами угольного массива, такими как: пластичность, влажность, трещиноватость, степень разгруженности.

Газоносность угля в интервале от 2 до 4 м от стенки выработки увеличивается слабыми темпами, из-за значительных трещин, образовавшихся в результате деформации массива пород (блочное расчленение). Затем с 4 до 8 м наблюдается ее резкое увеличение (зона неупругих деформаций). С 8...9 м кривая роста практически выполняется, достигнув своего максимума в зоне упругих деформаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Некоторые аспекты исследования газоносности пласта К₁₀ в условиях шахты «Абайская» УД АО АМТ / Е.Н. Филимонов, В.С. Портнов, В.В. Егоров, Ю.Ю. Стефлюк, А.А. Кенетаева. – Караганда: Изд-во КарагТУ, 2016. – 98 с.
- Selection of monitoring techniques for a carbon storage and enhanced coalbed methane recovery pilot test in the Central Appalachian Basin / E.S. Gilliland, N. Ripepi, M. Conrad, M.J. Miller, M. Karmis // Int. J. Coal Geol. – 2013. – № 118. – P. 105–112.
- Coalbed methane produced water in China: status and environmental issues / Y. Meng, D. Tang, H. Xu, Y. Li, L. Gao // Environmental science and pollution research. – 2014. – V. 21. – P. 6964–6974.
- Coalbed methane production potential for Taldykuduk block Karaganda Coal Basin, Kazakhstan / E. Chavonnard, L. Kaba, T. Le, C. Moyne, I. Panfilov, S. Kabirova, R. Sadykov, U. Zhabpasbayev. – France, Anglet: JEMP, 2016. – 150 p.
- Pashin J.C. Origin and Consequences of Variable Gas Saturation in Coalbed Methane Reservoirs of the Black Warrior Basin // International Journal of Coal Geology. – 2010. – V. 82. – P. 135–146.
- Qin Yong, Ye Jianping. Review on Development of CBM Industry in China // Geoscience Technology Workshop, Opportunities and Advancements in Coal Bed Methane in the Asia Pacific. – Australia, Brisbane, 2015. – № 80454. – 31 p.
- Coalbed Methane / Ahmed Al-Jubori, Sean Johnston, Chuck Boyer, Stephen W. Lambert // Clean Energy for the World, Oilfield Review. – 2009. – V. 21. – № 2. – P. 4–13.
- Durant R.F. Hybrid Downhole Microseismic and Microdeformation Monitoring of a Vertical Coal Seam Gas Well // 2016 SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition. – Perth, Australia, 25–27 October 2015. – P. 2–18.
- Optimizing Horizontal Completion Techniques in the Barnett Shale Using Microseismic Fracture Mapping / M.H. Fisher, J.R. Heinze, C.D. Harris, B.M. Davidson // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Houston, Texas, 26–29 September 2004. – P. 2–13.
- Weatherall G.D. Interval Pressure Transient Test and Stress Testing in Coal Bed Methane Using Dual Packer Formation Testers: Case Studies from Indonesia // OTC 25012. Society of Petroleum Engineers. Offshore Technology Conference. Asia. – Malaysia, Kuala Lumpur, 2014. – P. 148–156.
- Ruichen Shen, Zijian Wang, Lei Qiao. The Advanced Technology of Drilling and Completion for CBM in China. Search and Discovery Article #80452 // Adapted from oral presentation given at AAPG Asia Pacific Region, Geoscience Technology Workshop, Opportunities and Advancements in Coal Bed Methane in the Asia Pacific, Brisbane. – Queensland, Australia, 2015, February 12–13. – P. 78–94.
- О реализации pilotного проекта по извлечению метана из неизгруженных угольных пластов / Н.А. Дрижд, Ф.А. Мулла-

Поступила 17.01.2019 г.

Информация об авторах

Кабирова С.В., аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

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

Портнов В.С., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой геологии и разведки месторождений полезных ископаемых Карагандинского государственного технического университета.

Ахматнуров Д.Р., PhD, старший преподаватель кафедры геологии и разведки месторождений полезных ископаемых Карагандинского государственного технического университета.

UDC 622.791(315)

ESTIMATION OF GAS SATURATION OF COALBED NO. K₁₀ WITHIN THE SHERUBAYNURINSKY AREA OF THE KARAGANDA COAL-BASIN

Svetlana V. Kabirova¹,

kabirsv@mail.ru

Valery G. Voroshilov¹,

v_g_v@tpu.ru

Vasiliy S. Portnov²,

vs_portnov@mail.ru

Denis R. Akhmatnurov²,

d_akhmatnurov@mail.ru

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

² Karaganda State Technical University,
56, Nursultan Nazarbaev avenue, Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan.

The aim of the research is to study gas content of the K₁₀ coal reservoir for assessment of methane resources and possibility of its production in the Sherubainurinsky area of the Karaganda coal basin.

Methodology. To determine the value of natural gas content of the coal seam K₁₀ of the Karaganda coal basin, the authors have used three methods based on the calculated and actual data on gas evolution from formation during its development: 1) calculation of gas content by the Langmuir coefficients; 2) sampling and processing of coal samples by the method of DMT GmbH & Co. KG; 3) measurement of actual gas emission. Furthermore, the specified value was refined on the basis of comparison of the results obtained by different methods. Investigations were carried out on the field of the Abayskaya mine of ArcelorMittal Temirtau JSC during the development of the coal seam K₁₀.

Results. The gas content of the K₁₀ reservoir within the Sherubainurinsky site is estimated at an average of 17,5 m³/t. However, the method for determining the natural gas-bearing formation of reservoirs by the amount of released methane gives rather average value. The studies have shown that the results of determination of natural gas content of coal seams, made by the method of the company DMT GmbH & Co. KG, have good convergence with the calculated value. The gas content of the coal seams of the Sherubainurinsky site increases with depth according to the dependence described by the regression equation, in general, having the form of the Langmuir equation. The research results show that in a virtually intact array at a distance of 38... 42 m from the production wall, gas content is constant.

Scientific novelty: comprehensive studies of the coal bed gas content and the nature of the effect of unloading on its value of the Karaganda coal-basin.

Practical significance. Coal-basin. Associated coal mining gas methane in the development of mines is used to generate electricity and meet the needs of the mine itself. In the future, utilization of coalbed methane in Kazakhstan will save natural gas and reduce greenhouse gas emissions. This is a promising energy market. The gas permeability and methane content of coal seams are the main criteria for assessing the methane-coal areas during their preparation for development. Investigations of the gas content of coal seams will correctly assess the resources of methane and the possibility of its production in the Sherubainurinsky site of the Karaganda coal basin.

Key words:

Methane, coal seam, degassing, production prospects, industrial use, methane safety, gas output.

REFERENCES

- Fillimonov E.N., Portnov V.S., Egorov V.V., Steflyuk Yu.Yu., Kenetaeva A.A. Nekotorye aspekty issledovaniya gazonosnosti plasta k₁₀ v usloviyakh shakhty «Abayskaya» Ugolnogo Departamenta Arcelor Mittal Temirtau» [Some aspects of the study of gas content of the reservoir k₁₀ in the conditions of the mine «Abayskaya» CD AMT]. Karaganda, KarGTU Publ., 2016, 98 p. In Rus.
- Gilliland E.S., Ripepi N., Conrad M., Miller M.J., Karmis M. Selection of monitoring techniques for a carbon storage and enhanced coalbed methane recovery pilot test in the Central Appalachian Basin. *Int. J. Coal Geol.*, 2013, no. 118, pp. 105–112.
- Meng Y., Tang D., Xu H., Li Y., Gao L. Coalbed methane produced water in China: status and environmental issues. *Environmental science and pollution research*, 2014, vol. 21, pp. 6964–6974.
- Chavonand E., Kaba L., Le T., Moyne C., Panfilov I., Kabirova S., Sadykov R., Zhabasbayev U. Coalbed methane production potential for Taldykuduk block Karaganda Coal Basin, Kazakhstan. Anglet, France, JEMP, 2016. 150 p.
- Pashin J.C. Origin and Consequences of Variable Gas Saturation in Coalbed Methane Reservoirs of the Black Warrior Basin. *International Journal of Coal Geology*, 2010, vol. 82, pp. 135–146.
- Qin Yong, Ye Jianping A. Review on Development of CBM Industry in China. *Geoscience Technology Workshop, Opportunities and Advancements in Coal Bed Methane in the Asia Pacific*, 2015, no. 80454, 31 p.
- Ahmed Al-Jubori, Sean Johnston, Chuck Boyer, Stephen W. Lambert. Coalbed Methane. *Clean Energy for the World, Oilfield Review*, 2009, vol. 21, no. 2, pp. 2–18.
- Durant R.F. Hybrid Downhole Microseismic and Microdeformation Monitoring of a Vertical Coal Seam Gas Well. *SPE 182300*.

- Prepared for the 2016 SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition.* Perth, Australia, 25–27 October 2015. pp. 2–18.
- 9. Fisher M.H., Heinze J.R., Harris C.D., Davidson B.M. Optimizing Horizontal Completion Techniques in the Barnett Shale Using Microseismic Fracture Mapping. *SPE 90051. SPE Annual Technical Conference and Exhibition.* Houston, Texas, 26–29 September 2004. pp. 2–13.
 - 10. Weatherall G.D. Interval Pressure Transient Test and Stress Testing in Coal Bed Methane Using Dual Packer Formation Testers: Case Studies from Indonesia. *OTC 25012. Offshore Technology Conference-Asia.* Malaysia, Kuala Lumpur, 2014. pp. 148–156.
 - 11. Ruichen Shen, Zijian Wang, Lei Qiao. The Advanced Technology of Drilling and Completion for CBM in China. *Adapted from oral presentation given at AAPG Asia Pacific Region, Geoscience Technology Workshop, Opportunities and Advancements in Coal Bed Methane in the Asia Pacific, Brisbane.* Queensland, Australia, 2015, February 12–13. pp. 78–94.
 - 12. Drizhd N.A., Mullagaliyev F.A., Kabirova S.V., Akbarov E.E., Achmatnurov D.R. O realizatsii pilotnogo proekta po izvlecheniyu metana iz nerazgryzhennykh ugodnykh plastov [On implementation of a pilot project for extraction of methane from unloaded coal seams]. *Gornye nauki v industrialno-innovatsionnom razvitiu strany. Materialy konferentsii, posvyashchennoy 70-letiyu Instituta gornogo dela im. D.A. Kunaeva* [Mining Sciences in industrial and innovative development of the country. Proc. of the conference dedicated to the 70th anniversary of the Institute of Mining named after D.A. Kunaev]. Almaty, 2015. Vol. 87, pp. 306–310.
 - 13. Ivakhnenko O., Aimukhan A., Kenshimova A., Mullagaliyev F., Akbarov E., Mullagaliyev L., Kabirova S., Almukhametov A. Advances in coalbed methane reservoirs integrated characterization and hydraulic fracturing for improved gas recovery in Karaganda Coal Basin, Kazakhstan. *Science Direct. Energy Procedia*, 2017, vol. 125, pp. 477–485.
 - 14. Kolmakov V.A. *Metanovydelenie i borba s nim v shakhtakh* [Methane release and control in the mines]. Moscow, Nedra Publ., 1981. 134 p.
 - 15. Airuni A.T. *Gazoobilnost kamenougodnykh shakht SSSR. Kompleksnoe osvoenie gasonosnykh mestozhdenii* [Gas richness of coal mines of the USSR. Integrated development of coal gas deposits]. Ed. by G.D. Lidin. Moscow, Nauka Publ., 1990. 213 p.
 - 16. Drizhd N.A., Kamarov R.K., Akhmatnurov D.R., Zamalyev N.M., Shmidt-Fedotova I.M. Coal bed methane Karaganda basin in the gas balance Republic of Kazakhstan: status and prospects. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 2017, no. 1, pp. 12–20.
 - 17. Vasyuchkov Yu.F. *Fiziko-khimicheskie sposoby degazatsii ugodnykh plastov* [Physico-chemical methods of coal seam degassing]. Moscow, Nedra Publ., 1986. 256 p.
 - 18. Puchkov L.A., Slastunov S.V., Kolikov K.S. *Izvlechenie metana iz ugodnykh plastov* [Methane extraction from coal seams]. Moscow, MGGU Publ., 2002. 384 p.
 - 19. *Klassifikator metanonosnosti ugodnykh plastov* [Classifier of methanosity coal beds of the Karaganda basin]. Karaganda, USSR Ministry of Coal Industry Publ., 1986. 54 p.
 - 20. Fillimonov E.N., Atygaev R.K., Varshavskaya O.V., Baimukhametov T.K. *Gazonosnost plasta D6 v zone ego otrobotki lavoy 312D6-Z na shakte «Kazakhstanskaya»* [Gas content of the D6 stratum in the zone of its mining with lava 312D6-Z at the «Kazakhstan» mine]. *Aktualnye problemy preduprezhdeniya i likvidatsii chrezvychaynykh situatsiy tekhnogenного kharaktera. Sbornik dokladov i vystubleniy 3 Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Actual problems of prevention and emergency response of man-made character. Collection of reports and speeches of the 3rd International Scientific and Practical Conference]. Karaganda, Kazakhstan, 2013. pp. 100–110.
 - 21. Drizhd N.A., Zamalyev N.M., Akhmatnurov D.R., Shmidt-Fedotova I.M., Mysin R.A. *Sostoyanie i perspektivy dobachi metana na polyakh likvidirovannykh ugodnykh shakht Katagandinskogo basseina. Monografiya* [State and prospects of methane production in the fields of liquidated coal mines of the Karaganda basin Monograph]. Karaganda, KarGTU Publ., 2016. 274 p.
 - 22. Shashenko A.N., Kykharev E.V., Gapeev S.N., Eremenko A.Yu. *Poshagovaya protsedura otsenki parametrov podrabortannogo ugleporodnogo massiva kak gazovogo kollektora* [Step-by-step procedure for estimating the parameters of subsupply coal-bearing massif as a gas collector]. *Nauchny vestnik Natsionalnogo Gornogo Universiteta*, 2014, no. 6, pp. 38–45.
 - 23. Shashenko A.N., Kykharev E.V., Logynova A.O., Eremenko A.Yu. *Otsenka prostranstvennykh i kollektorskikh parametrov tekhnogenного gazovogo mestorozhdeniya po geomekhanicheskim kharakteristikam vmeschchayushchego ugleporodnogo massiva* [Evaluation of spatial and reservoir parameters of a technogenic gas field according to the geomechanical characteristics of the surrounding coal and rock massif]. *Nauchny vestnik Natsionalnogo Gornogo Universiteta*, 2014, no. 1, pp. 33–40.

References: 17 January 2019.

Information about the authors

Svetlana V. Kabirova, postgraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

Valery G. Voroshilov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Vasiliy S. Portnov, Dr. Sc., professor, head of the Department «Geology and Exploration of Mineral Deposits», Karaganda State Technical University.

Denis R. Akhmatnurov, PhD, senior lecturer, Karaganda State Technical University.

УДК 661.879.1.04–52

АЛГОРИТМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ДЕСУБЛИМАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ГЕКСАФТОРИДА УРАНА

Николаев Александр Валерьевич¹,
niv@tpu.ru

Криницын Николай Станиславович¹,
kns@tpu.ru

Дядик Валерий Феодосиевич¹,
dyadik@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 635050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность исследования обусловлена требованием к равномерному заполнению товарным гексафторидом урана транспортных емкостей и принятием решения о прекращении наполнения ёмкости по степени её объёмного заполнения. Указанное требование может быть достигнуто вводом в эксплуатацию автоматизированной системы управления аппаратом десублимации. **Цель:** разработка алгоритма расчёта интервала захолаживания трубчатки аппарата десублимации, обеспечивающего накопление заданной толщины слоя десублимата в автоматизированном режиме.

Объект: аппарат десублимации производства гексафторида урана.

Методы: математическое моделирование технологических процессов; проведение полных факторных экспериментов на математической модели; регрессионный анализ; статистический анализ; производственные эксперименты на аппарате десублимации производства ГФУ.

Результаты. Для реализации системы стабилизации заданной толщины слоя десублимата на охлаждаемом элементе в качестве управляющего воздействия используется длительность интервала захолаживания. Для проведения вычислительных экспериментов и нахождения аналитической зависимости расчёта длительности интервала захолаживания используется математическая модель аппарата десублимации, описывающая протекающие в нём теплообменные и массообменные процессы. Адекватность модели подтверждена сравнением результатов математического моделирования и производственных данных. Вывод об адекватности модели сделан по величине приведённой среднеквадратичной погрешности предсказания моделью производственных данных. В результате полного факторного эксперимента на разработанной математической модели получено уравнение расчёта интервала захолаживания. Уравнение позволяет исходя из значений регистрируемых на производстве технологических переменных рассчитывать необходимую длительность интервала захолаживания трубчатки, в течение которого будет накоплен заданный оператором слой десублимата.

Ключевые слова:

Десублимация, гексафторид урана, теплообмен, массоперенос, математическое моделирование.

Введение

Производство гексафторида урана (ГФУ) является востребованным в России на сегодняшний день. Активная программа Госкорпорации Росатом по развитию и строительству новых энергоблоков АЭС ежегодно увеличивает количество потребителей данного продукта [1]. Сублиматный завод АО «Сибирский химический комбинат» является единственным производителем ГФУ в России. Это накладывает высокие требования к стабильности работы предприятия и качеству выпускаемой продукции.

Непрерывная работа предприятия в целом и узла десублимации в частности обеспечивает выполнение поставленных планов перед заводом по выборке ГФУ. Одним из факторов, позволяющих оперативно изменять производительность аппарата десублимации, является варьирование длительности интервала захолаживания [2]. За счёт этого изменяется толщина слоя накапливаемого десублимата, а следовательно, и масса сбрасываемого продукта в единицу времени. Однако неконтролируемое увеличение длительности интервала захолаживания может привести к накоплению критической

массы, в результате сброса которой произойдет забивание высыпной горловины, и выходу аппарата из строя. С другой стороны, слишком частые сбросы десублимата приведут к снижению эффективности аппарата и высокому проскоку сырья. Помимо длительности захолаживания на толщину накапливаемого слоя влияет вид и состав перерабатываемого сырья. В зависимости от доли тетрафторида урана или октаоксида триурана в составе загружаемого сырья концентрация ГФУ в составе технологического газа изменяется от 30 до 70 об. %.

Показателем качества выпускаемой продукции является значение насыпной плотности. Она характеризуется плотностью накапливаемого слоя десублимата и, как следствие, конечной массой заполняемых транспортных ёмкостей. Насыпная плотность зависит от длительности захолаживания, температуры контактной поверхности между технологическим газом и наросшим десублиматором, а также от расхода технологического газа и концентрации ГФУ в его составе. Рациональным способом стабилизации плотности ГФУ в условиях производства является тепловой сброс продукта в момент накопления слоя десублимата фиксиро-

ванной толщины, что обеспечит стабильность производительности аппарата и минимизацию тепловых переходных процессов.

Конструкция аппарата

Для осуществления процесса десублимации в промышленности применяются теплообменные аппараты различных конструкций [3, 4]. На Сибирском химическом комбинате используется кожухотрубный теплообменник (рис. 1), представляющий собой вертикальный обогреваемый цилиндрический аппарат. Внутри аппарата смонтирована трубчатка из трубок Фильдо, разделенная на секции.

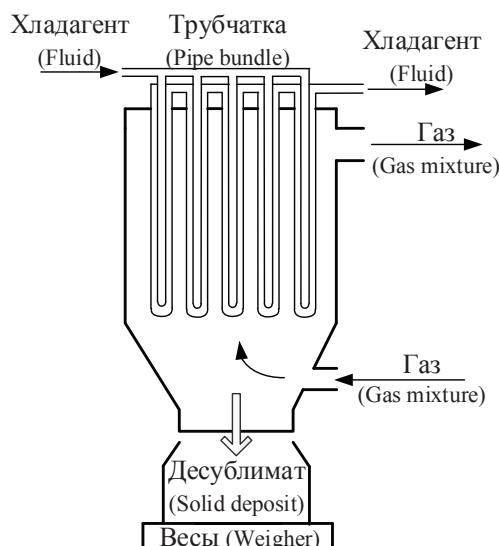


Рис. 1. Конструкция аппарата десублимации

Fig. 1. Construction of deposition apparatus

Работа аппарата десублимации предусматривает два режима: накопление десублимата на внешней поверхности трубчатки и его сброс. Накопление обеспечивается подачей хладагента в трубчатку аппарата. В результате охлаждения трубчатки и технологического газа на поверхности нарастает слой десублимата. Режим сброса характеризуется подачей в трубчатку аппарата теплоносителя. За счёт нагревания поверхности на границе раздела трубчатки и десублимата происходит сублимация пограничного слоя. Под действием силы тяжести корки десублимата осыпаются в транспортную емкость, находящуюся под аппаратом.

Накопление твёрдого ГФУ в транспортной емкости происходит вплоть до её заполнения до фиксированного уровня, что обеспечивает постоянство объема в ней. Масса заполняемых транспортных емкостей отслеживается с помощью весоизмерительного устройства. На рис. 2 представлен график, отражающий динамику заполнения двух транспортных емкостей сбрасываемым десублиматом. Итоговая масса емкостей различается на 3 %, что выходит за пределы установленного на заводе допуска в 1 %.

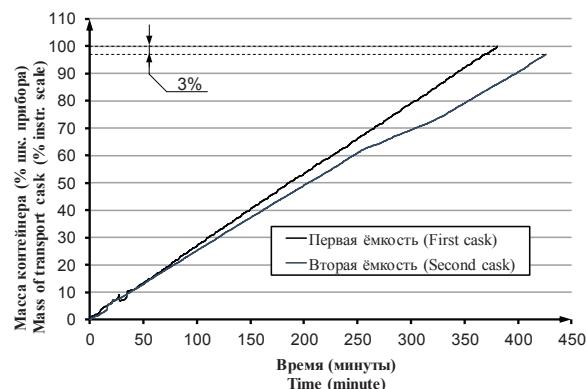


Рис. 2. График заполнения двух транспортных емкостей

Fig. 2. Graph of loading of two transport casks

В настоящее время на Сублиматном заводе АО «СХК» реализована система управления аппаратами узла десублимации с фиксированным интервалом захолаживания. На вход аппарата десублимации поступает технологический газ, состав и расход которого изменяются в зависимости от состава перерабатываемого сырья. Как результат, доля ГФУ в составе технологического газа меняется от 30 до 70 об. %. Принимая во внимание фиксированный интервал захолаживания трубчатки аппарата десублимации, никак не зависящий от состава технологического газа на входе в аппарат, можно говорить о накоплении на поверхности охлаждаемых элементов слоя десублимата различной толщины. Это является причиной нестабильности насыпной плотности готового продукта в транспортных емкостях.

Для прогнозирования величины насыпной плотности готового продукта и производительности аппарата десублимации предлагается реализовать систему стабилизации заданной толщины слоя десублимата. Для этого при расчёте интервала захолаживания следует учитывать влияющие на процесс накопления десублимата регистрируемые на производстве технологические переменные: расход и состав технологического газа на входе аппарата, температуру хладагента в трубчатке аппарата [5, 6].

Для проведения вычислительных экспериментов с целью получения регрессионного уравнения, позволяющего рассчитывать интервал захолаживания трубчатки десублиматора, используется модернизированная математическая модель аппарата десублимации производства гексафторида урана [7]. При модернизации модели добавлено уравнение, учитывающее изменение давления технологического газа внутри аппарата. Это позволило рассчитать текущую скорость передвижения технологического газа, на которую влияют тепловые и масообменные процессы, происходящие внутри аппарата. Для математического моделирования работы действующего на производстве аппарата десублимации в модели учтены реальные геометрические размеры и режимы его работы.

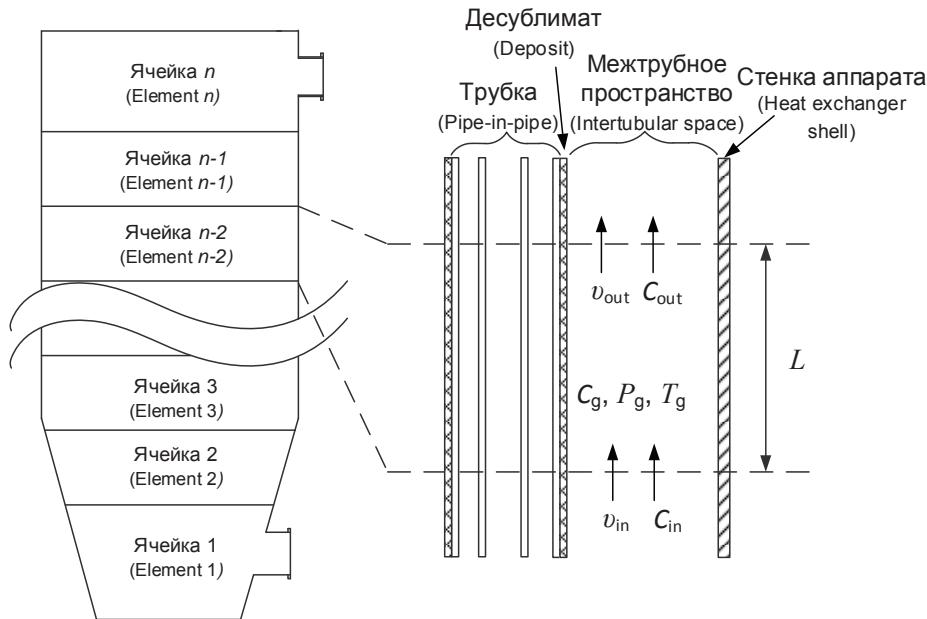


Рис. 3. Направления потоков в одной ячейке: v_{in} , v_{out} – скорость газа на входе и выходе, м/с; C_{in} , C_{out} – концентрация газа на входе и выходе, моль/м³; L – высота ячейки, м; T_g – температура газа в ячейке, К; P_g – давление газа в ячейке, Па; C_g – концентрация газа в ячейке, моль/м³

Fig. 3. Gas mixture flow directions in an element: v_{in} , v_{out} are the inlet and outlet gas mixture velocity, respectively, m/s; C_{in} , C_{out} are the inlet and outlet concentration, respectively, mole/m³; L is the element height, m; T_g is the gas mixture temperature, K; P_g is the gas mixture pressure, Pa; C_g is the gas mixture concentration, mole/m³

Математическая модель аппарата десублимации

Движение газа

Математическая модель десублиматора построена с использованием ячеекой структуры [8]. Применение такой структуры подразумевает разбиение пространства на поперечные ячейки по высоте аппарата. Моделирование заключается в последовательном расчёте параметров всех ячеек по выбранному направлению. Направление расчёта соответствует направлению движения технологического газа в межтрубном пространстве аппарата: снизу вверх. На рис. 3 представлены направления потоков технологического газа в одной ячейке высотой L .

В ячеекой модели аппарата десублимации приняты следующие допущения:

- расчет распределения компонентов технологического газа только по одной пространственной координате (по высоте десублиматора);
- пренебрежение распределением потока и температуры технологического газа по радиусу аппарата;
- фазовому переходу подвергается только UF_6 ;
- скорость движения и температура хладагента по высоте аппарата во всех секциях одинаковы;
- плотность десублимата постоянна;
- десублиматор равномерно распределяется между трубками, входящими в одну секцию;
- переходные процессы при смене теплоносителя в трубчатке происходят мгновенно.

Каждая ячейка десублиматора описывает состояние технологического газа в межтрубном про-

странстве и представляет собой модель идеального смешения, то есть характеризуется полным и мгновенным перемешиванием вновь поступающего вещества с уже находящимся в ячейке. Учитывая состав технологического газа (UF_6 , NF , O_2 , N_2 , F_2), процесс изменения концентраций веществ внутри ячейки описывается законом сохранения массы в виде системы уравнения:

$$\begin{cases} \frac{dC_{UF_6}}{dt} = \frac{1}{V_{elt}} (v_{in} A_{in} C_{UF_6,in} - v_{out} A_{out} C_{UF_6,out}) - \frac{W_{UF_6}}{V_{elt}}; \\ \frac{dC_y}{dt} = \frac{1}{V_{elt}} (v_{in} A_{in} C_{y,in} - v_{out} A_{out} C_{y,out}), \end{cases}$$

где y – компонент технологического газа NF , O_2 , N_2 , F_2 ; W_{UF_6}/V_{elt} описывает явление десублимации UF_6 ; A_{in} , A_{out} – площадь поперечного сечения ячейки, м²; V_{elt} – объём ячейки, м³; W_{UF_6} – скорость десублимации.

Текущая концентрация компонентов технологического газа рассчитывается из уравнения Менделеева–Клейперона:

$$\frac{dC_g}{dt} = \frac{1}{RT_g} \frac{dP_g}{dt},$$

где $C_g = C_{UF_6} + C_{HF} + C_{O_2} + C_{N_2} + C_{F_2}$ – концентрация газовой смеси, моль/м³; R – газовая постоянная, Дж/моль·К;

Изменение давления в ячейке за счёт проходящих тепловых и массообменных процессов рассчитывается как суперпозиция всех его составляющих:

$$\frac{dP_g}{dt} = RT_{in} v_{in} \frac{A_{in}}{V_{elt}} C_{in} - RT_g \frac{W_{UF_6}}{V_{elt}} + RC_g \frac{dT_g}{dt},$$

где T_{in} – температура газа на входе, К.

Каждое слагаемое описывает следующее взаимодействие: $RT_{in} v_{in} \frac{A_{in}}{V_{elt}} C_{in}$ – изменение давление за счёт движения потока технологического газа;

$RT_g \frac{W_{UF_6}}{V_{elt}}$ – изменение давление за счёт массообменных процессов; $RC_g \frac{dT_g}{dt}$ – изменение давления за счёт тепловых процессов.

Для расчёта температуры технологического газа и массы накапливаемого десублимата на трубчатке аппарата в рамках одной ячейки используются уравнения, учитывающие теплообменные и массообменные процессы, протекающие внутри ячейки.

В связи с последовательным и циклическим режимом работы секций трубчатки аппарата десублимации выполняется моделирование накопления и сброса десублимата посекционно. Это подразумевает, что для каждой из секций ведётся расчёт следующих составляющих в рамках каждой ячейки:

- температура накопленного десублимата;
- масса наросшего слоя десублимата.

Тепловые взаимодействия внутри ячейки

Направление движения тепловых потоков в рамках одной ячейки представлено на рис. 4.

Выражения для расчёта температуры технологического газа и температуры десублимата для i секции в рамках одной ячейки получены из формулы расчёта количества теплоты, передаваемого при нагревании и охлаждении:

$$\frac{dT_g}{dt} = \frac{1}{c_g m_g} \frac{Q_g}{dt}, \quad \frac{dT_{ds,i}}{dt} = \frac{1}{c_{ds} m_{ds,i}} \frac{Q_{ds,i}}{dt},$$

где i – номер секции; T_{ds} – температура десублимата, К; T_g – температура технологического газа, К; c_g, c_{ds} – теплёмкость технологического газа и десублимата соответственно, кДж/кг·К; m_g, m_{ds} – масса технологического газа и десублимата соответственно, кг.

Количество тепла, передаваемое технологическому газу в ячейке, вычисляется как суперпозиция всех источников тепла, взаимодействующих с ним:

$$Q_g = Q_{shell} + Q_{in} + \sum_{i=1}^9 Q_{pt,i}.$$

Количество тепла, передаваемое слою десублимата, отложившемуся на поверхности одной секции в ячейки, вычисляется как суперпозиция всех источников тепла, взаимодействующих с ним:

$$Q_{ds,i} = Q_g + Q_{pt,i} + Q_{fluid,i}.$$

Количество тепла, передаваемое от стенки аппарата к технологическому газу, определяется по формуле:

$$Q_{shell} = U_{shell} A_{shell} (T_{shell} - T_g),$$

где A_{shell} – площадь поверхности, через которую передаётся тепло от стенки аппарата к газу, м²; U_{shell} – коэффициент теплопередачи от стенки к газу, Вт/(м²·К); T_{shell} – температура стенки аппарата десублимации, К.

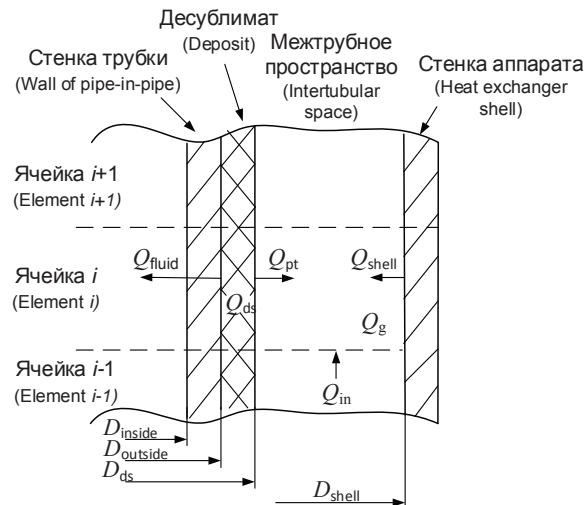


Рис. 4. Направления движения тепловых потоков внутри ячейки: Q_{pt} – тепловой поток от десублимата к теплоносителю, кДж; Q_g – количество тепла, передаваемое технологическому газу, кДж; Q_{shell} – тепловой поток от стенки аппарата к газу, кДж; Q_{ds} – количество тепла, передаваемое слою десублимата, кДж; Q_{in} – количество тепла, приносимое входным потоком, кДж; Q_{fluid} – количество тепла, передаваемое хладагенту, кДж; D_{inside} – внутренний диаметр трубы, м; $D_{outside}$ – наружный диаметр трубы, м; D_{ds} – диаметр трубы со слоем десублимата, м

Fig. 4. Heat transfer directions in the element: Q_{pt} is the amount of heat transfer from deposit to gas mixture, kJ; Q_g is the amount of heat energy of the gas mixture in the element, kJ; Q_{shell} is the amount of heat transfer from the exchanger shell to the gas mixture, kJ; Q_{ds} is the amount of heat energy of the deposit, kJ; Q_{in} is the amount of heat transfer from the inlet gas mixture flow, kJ; Q_{fluid} is heat transfer from the deposition to fluid, kJ; D_{inside} is the inside diameter of the outer pipe, m; $D_{outside}$ is the outside diameter of the outer pipe, m; D_{ds} is the outside diameter of the outer pipe with the deposition layer, m

Количество тепла, передаваемое от входного потока технологического газа Q_{in} в ячейку, определяется через разность энталпий:

$$Q_{in} = v_{in} A_{in} C_{in} (s_g(T_g) - s_{in}(T_{in})),$$

где s_g – энталпия состояния технологического газа в ячейке, кДж/моль; s_{in} – энталпия состояния технологического газа во входном потоке, кДж/моль.

Фазовый переход газообразного гексафторида в твёрдый является экзотермическим процессом. Тепловой эффект от превращения определяется разностью энталпий веществ в этих агрегатных состояниях:

$$Q_{\text{pt} i} = m_{\text{ds} i} (s_{\text{UF}_6 \text{ g}} (T_g) - s_{\text{UF}_6 \text{ ds}} (T_{\text{ds} i})),$$

где $s_{\text{UF}_6 \text{ g}}$ – энталпия газообразного UF_6 , кДж/моль; $s_{\text{UF}_6 \text{ ds}}$ – энталпия твёрдого UF_6 на i секции, кДж/моль; $m_{\text{ds} i}$ – масса нового десублимата на i секции, моль.

Количество тепла, передаваемого от теплоносителя к слою десублимата, движущегося в секции, рассчитывается:

$$Q_{\text{fluid} i} = U_{\text{fluid} i} A_{\text{sur} i} (T_{\text{fluid} i} - T_{\text{ds} i}),$$

где $A_{\text{sur} i}$ – площадь поверхности, через которую передаётся тепло в i секции хладагенту, м^2 ; $U_{\text{fluid} i}$ – коэффициент теплопередачи в i секции от слоя десублимата к хладагенту, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $T_{\text{fluid} i}$ – температура хладагента в i секции, К.

Массообменные процессы

Аппарат десублимации предназначен для получения твёрдого гексафторида урана из технологического газа. Данный процесс является фазовым переходом первого рода газ–твёрдое. Согласно диаграмме состояния гексафторида урана, данный процесс происходит при температуре ниже 329,5 К и атмосферном давлении. В таблице приведены температуры фазовых переходов для остальных компонентов технологического газа при атмосферном давлении [9–11].

Таблица. Температура фазового перехода компонентов газа

Table. Phase transformation temperature of gas mixture components

| Компонент газа Gas mixture component | Температура конденсации, К Condensation, K | Температура затвердевания, К Solidification, K |
|---|---|---|
| HF | 292,9 | 189,9 |
| N ₂ | 77,2 | 63,14 |
| O ₂ | 90 | 53 |
| F ₂ | 88 | 55 |

Как видно из табл. 1, при температуре в 329,5 К ни один из компонентов технологического газа не подвержен процессу десублимации. Таким образом, в аппарате будет проходить десублимация только гексафторида урана. При моделировании используются физические свойства UF_6 , описанные в литературе [12–14]. Существует ряд работ по моделированию процесса десублимации ГФУ в осадительных ёмкостях и поверхностных аппаратах [15, 16]. Однако используемые в работах методы описания процесса десублимации сложно применимы для проточных аппаратов.

При описании массообменных процессов рассматривались два режима работы: захолаживание и отпаривание. Процесс захолаживания характеризуется длительным поддержанием разности температур хладагента и технологического газа на стенах трубчатки. Скорость нарастания десублимата напрямую связана с концентрацией веществ в технологическом газе. Масса десублимата на i секции определяется следующим уравнением [17]:

$$\frac{m_{\text{ds} i}}{dt} = KA_{\text{ds} i} M_{\text{UF}_6} \frac{d(C_{\text{UF}_6} (T_g) - C_{\text{eq}} (T_{\text{ds} i}))}{dt},$$

где K – коэффициент скорости массопередачи, $\text{м}/\text{с}$; $A_{\text{ds} i}$ – площадь взаимодействия поверхности трубы i секции и газа, м^2 ; M_{UF_6} – молярная масса UF_6 , кг/моль; C_{eq} – равновесная концентрация, моль/ м^3 ; C_{UF_6} – концентрация газообразного гексафторида в ячейке, моль/ м^3 :

Процесс нарастания и уплотнения десублимата является достаточно сложным для математического описания. Существуют исследования по выявлению закономерностей влияния длительности процесса десублимации и температуры десублимации на плотность получаемого продукта [18, 19]. Однако в данной работе при разработке математической модели принято допущение, что фазовый переход происходит только в поверхностном слое, непосредственно контактирующем с технологическим газом. При этом в процессе нарастания слоя формируется равномерно плотный продукт. По мере нарастания слоя десублимата температура поверхностного слоя будет приближаться к температуре технологического газа, а следовательно, будет замедляться скорость десублимации. Процесс десублимации прекращается, когда вследствие увеличения термодинамического сопротивления слоя десублимата температура поверхностного слоя десублимата, контактирующего с газовой фазой, сравнивается с температурой, соответствующей значению наступления фазового равновесия при текущей концентрации ГФУ в составе газа.

Отпаривание характеризуется резкой сменой температуры на поверхности трубчатки за счёт смены хладагента на теплоноситель. Замеры длительности переходных процессов при смене режима работы аппарата на производстве показали, что они занимают несколько секунд. Это даёт основания принять допущение, что нагревание поверхности происходит мгновенно, равномерно и полностью. Следовательно, весь наросший слой десублимата осыпается в транспортные ёмкости в результате сублимации его на границе раздела с трубчаткой за установленный на заводе интервал сброса.

Проверка адекватности математической модели

Целевое назначение разработанной математической модели аппарата десублимации – определение длительности интервала захолаживания трубчатки, обеспечивающего накопление на её поверхности слоя десублимата заданной толщины. Проверка адекватности математической модели проводилась путем сравнения масс накапливаемого десублимата в транспортной ёмкости, полученных на действующем производстве и в результате вычислительных экспериментов. В качестве входных значений при проведении вычислительных экспериментов использовались производственные данные за сравниваемый период.

Сравнение производственных данных и результатов вычислительных экспериментов по накопле-

нию десублимата в транспортной емкости при одинаковых входных значениях технологических переменных представлены на рис. 5. Производственные данные соответствуют показаниям весоизмерительного устройства.

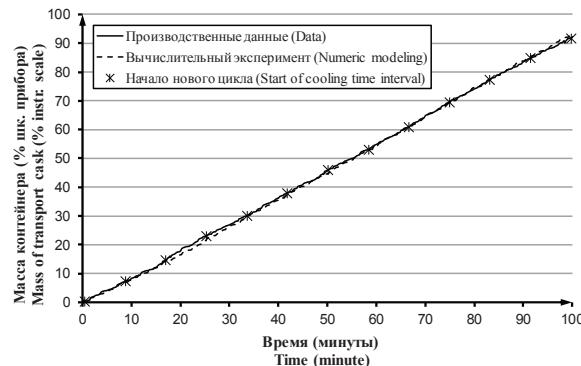


Рис. 5. График производственных данных и результатов вычислительных экспериментов по накоплению десублимата в транспортной емкости

Fig. 5. Graph of the production data and the numeric modeling results of the deposit accumulating in the transport cask

Таким образом, были промоделированы 19 интервалов захолаживания за разные даты работы производства. Среднеквадратичная погрешность результатов моделирования, приведённая к массе накопленного десублимата за один интервал захолаживания, составила 9,3 %. Расчёт погрешности проводился по формуле:

$$s = \frac{\sigma}{\Delta P} \cdot 100 \% = \sqrt{\frac{(P_{\text{data}} - P_{\text{model}})^2}{n-1}} \cdot \frac{100 \%}{\Delta P},$$

где ΔP – величина приращения массы десублимата на трубчатке за интервал захолаживания, % шк. прибора; P_{data} – масса накопленного десублимата по показаниям весоизмерительного устройства, % шк. прибора; P_{model} – масса накопленного десублимата по результатам вычислительных экспериментов, % шк. прибора.

Полученные результаты позволяют судить о возможности применения разработанной математической модели для моделирования работы аппарата десублимации при различных интервалах захолаживания.

Уравнение расчёта времени захолаживания

Для получения уравнения расчёта интервала захолаживания использовались методы статистического анализа [20, 21]. При составлении плана проведения полного факторного эксперимента в качестве факторов использовались следующие технологические переменные:

- задаваемая оператором толщина слоя десублимата Δp , мм;
- температура хладагента T_{fluid} , К;
- объёмный расход технологического газа на входе в аппарат Q_{vg} , м³/ч;

- объёмная доля ГФУ в составе поступающего технологического газа $C_{\text{v UF}_6}$, об. %.

В результате проведения вычислительных экспериментов на разработанной математической модели аппарата десублимации производства ГФУ получены регрессионные уравнения расчёта величины интервала захолаживания. Приведённая среднеквадратичная погрешность полученных уравнений регрессии 1-го и 2-го порядка составила 12 и 0,7 % соответственно. Уравнение 2-го порядка точнее описывает данные вычислительных экспериментов. Итоговое уравнение для расчёта величины интервала захолаживания t_{ct} , обеспечивающего накопление заданной толщины слоя десублимата, имеет вид:

$$\begin{aligned} t_{\text{ct}} = & 10^3 - 6,1Q_{\text{vg}} - 87,7C_{\text{v UF}_6} + 19,3T_{\text{fluid}} + \\ & + 5,4 \cdot 10^2 \Delta p + 6,23 \cdot 10^{-2} \cdot Q_{\text{vg}} C_{\text{v UF}_6} - \\ & - 8,7 \cdot 10^{-3} Q_{\text{vg}} T_{\text{fluid}} - 1,9Q_{\text{vg}} \Delta p - \\ & - 0,6 \cdot C_{\text{v UF}_6} T_{\text{cl}} - 33,9C_{\text{v UF}_6} \Delta p + 8,4T_{\text{fluid}} \Delta p + \\ & + 8,2 \cdot 10^{-3} Q_{\text{vg}}^2 + 1,1C_{\text{v UF}_6}^2 + 0,3T_{\text{fluid}}^2 - 1,2 \cdot 10^2 \Delta p^2. \end{aligned}$$

Заключение

Сложность задачи по управлению аппаратами десублимации производства ГФУ связана с переменными расходом, составом технологического газа и температурой охлаждающей жидкости. Каждая из этих технологических переменных оказывает влияние на процесс десублимации. Для реализации системы управления аппаратом десублимации длительность интервала захолаживания используется в качестве управляющего воздействия, что обеспечивает накопление заданного слоя десублимата на поверхности трубчатки.

Исследования процесса накопления твёрдого ГФУ на трубчатке проводились на разработанной математической модели аппарата десублимации, описывающей основные физико-химические процессы и закономерности, протекающие внутри аппарата.

Результаты вычислительных экспериментов на математической модели использованы для построения регрессионной модели процесса захолаживания, позволяющей вычислять длительность накопления десублимата как функцию регистрируемых на производстве технологических переменных и заданной оператором толщины слоя десублимата с погрешностью 9,3 %. В итоге предложен алгоритм расчёта интервала захолаживания аппарата десублимации производства ГФУ, который обеспечит равномерность заполнения транспортных ёмкостей в пределах установленного на заводе допуска в 1 %.

Работа поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации, базовая часть «Наука», проект 2.5760.2017/8.9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Thomas S. Russia's Nuclear Export Programme // Energy Policy. – 2018. – V. 121. – P. 236–247.
2. Вильнина А.В., Ливенцов С.Н. Адаптивный алгоритм управления узлом десублимации гексафторида урана // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 5. – С. 133–136.
3. Орлов А.А., Малюгин Р.В. Анализ способов получения гексафторида урана, очистки его от примесей и заполнения в транспортные емкости // Современные научно-емкие технологии. Региональное приложение. – 2014. – № 3. – С. 89–98.
4. Development of a desublimator design / I.Y. Rusakov, P.B. Mollokov, A.S. Buinovskii, V.L. Sofronov, V.N. Brendakov // Chemical and Petroleum Engineering. – 2017. – V. 53. – № 1–2. – P. 89–93.
5. Uniform deposition of uranium hexafluoride (UF6): Standardized mass deposits and controlled isotopic ratios using a thermal fluorination method / B.K. McNamara, M.J. O'Hara, A.M. Casella, J.C. Carter, R.S. Addleman, P.J. MacFarlan // Talanta. – 2016. – V. 154. – P. 219–227.
6. Байдали С.А., Дядик В.Ф., Юрков А.С. Математическая модель производства гексафторида урана // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315 – № 2. – С. 84–90.
7. Николаев А.В., Криницын Н.С., Дядик В.Ф. Математическая модель десублиматора производства гексафторида урана // Известие вузов. Физика. – 2015. – Т. 58. – № 12–3. – С. 97–103.
8. Беккер В.Ф. Моделирование химико-технологических объектов. – М.: ИНФРА-М, 2014. – 142 с.
9. Patnaik P. Handbook of inorganic chemicals. – USA: McGraw-Hill, 2002. – 1046 p.
10. Weinstock B., Crist, R.H. The vapor pressure of uranium hexafluoride // The Journal of Chemical Physics. – 1948. – V. 16. – № 5. – P. 436–441.
11. Физико-математическое моделирование десублимации фтористого водорода из газовой смеси на стенки конденсатора / И.М. Васенин, С.М. Губанов, М.И. Дурновцев, А.Ю. Крайнов, М.В. Чуканов // Вестник томского государственного университета.
12. Oliver G.D., Milton H.T., Grisard J.W. The Vapor Pressure and Critical Constants of Uranium Hexafluoride // Journal of the American Chemical Society. – 1953. – V. 75. – № 12. – P. 2827–2829.
13. Zhang J. Analysis on holdup during processing UF6 // Journal of radioanalytical and nuclear chemistry. – 2014. – V. 299. – № 1. – P. 517–522.
14. Определение коэффициента теплопроводности твердой фазы гексафторида урана / В.В. Раев, А.В. Сапрыйгин, А.П. Щедилкин, К.В. Новокшонов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2011. – Т. 8. – № 4. – С. 125–130.
15. Gubanov S.M., Krainov A.Y., Mazur R.L. Theoretical and experimental modeling of the cooling of uranium hexafluoride vapor desublimation tanks // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2016. – V. 50. – № 5. – P. 766–775.
16. Intensification of evaporation of uranium hexafluoride / A.M. Belyntsev, G.S. Sergeev, O.B. Gromov, V.G. Frolov, V.F. Kholin // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2013. – V. 47. – № 4. – P. 499–504.
17. Горелик А.Г., Амитин А.В. Десублимация в химической промышленности. – М.: Химия, 1986. – 272 с.
18. Study of frost properties correlating with frost formation types / Y. Hayashi, A. Aoki, S. Adachi, K. Hori // Journal of Heat Transfer. – 1977. – V. 99 (2). – P. 239–245.
19. Lee J., Lee K.-S. The behavior of frost layer growth under conditions favorable for desublimation // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2018. – V. 120. – P. 259–266.
20. George E.P., Hunter J.S., Hunter W.G. Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery. 2nd ed. – USA: John Wiley & Sons, 2005. – 664 p.
21. Дядик В.Ф., Байдали С.А., Байдали Т.А. Статистические методы контроля и управления. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 144 с.

Поступила 17.12.2018 г.

Информация об авторах

Николаев А.В., инженер научно-образовательной лаборатории электроники и автоматики физических установок Инженерной школы ядерных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Криницын Н.С., кандидат технических наук, заведующий лабораторией промышленной робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Дядик В.Ф., кандидат технических наук, доцент отделения ядерно-топливного цикла Инженерной школы ядерных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC: 661.879.1.04–52

ALGORITHM OF AUTOMATIC CONTROL OF URANIUM HEXAFLUORIDE PRODUCTION DEPOSITION

Alexander V. Nikolaev¹,

niav@tpu.ru

Nikolay S. Krinitsyn¹,

kns@tpu.ru

Valery F. Dyadik¹,

dyadik@tpu.ru

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

The relevance of the research is caused by the requirement for uniform filling of transport casks with uranium hexafluoride and for solution to stop filling it according to the degree of its fill up. This requirement can be achieved by the commissioning of an automated control system for deposition apparatus.

The main aim of the research is to develop the algorithm for calculating the cooling interval of the deposition apparatus tube bundle, which ensures the accumulation of the given deposit layer thickness in an automated mode.

Object of the research is uranium hexafluoride deposition apparatus.

Methods: mathematical modeling of technological processes; full-factor experiments on the mathematical model; regression analysis; statistical analysis; field experiments on the deposition apparatus for uranium hexafluoride production.

Results. Duration of cooling interval is used as a control action for implementation of stabilization system for a given deposit layer thickness on the cooled element (tube bundle). The mathematical model of the deposition apparatus is used to conduct numerical experiments and to find an analytical dependence for calculating the duration of the cooling interval. The mathematical model describes the heat exchange and mass transfer occurring in the apparatus. The adequacy of the model is confirmed by comparing the results of mathematical modeling and production data. The conclusion about the adequacy of the model is made by the magnitude of the reduced standard error of prediction by the model of production data. The equation for calculating the cooling interval was obtained using the developed mathematical model as a result of a full factorial experiment. The equation allows calculating the required duration of the cooling interval for the tube bundle, during which the operator-specified deposit layer will be accumulated.

Key words:

Deposition, uranium hexafluoride, heat transfer, mass transfer, numeric modeling.

The research was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, basic part «Science», project 2.5760.2017/8.9.

REFERENCES

1. Thomas S. Russia's Nuclear Export Programme. *Energy Policy*, 2018, vol. 121, pp. 236–247.
2. Vilnina A.V., Liventsov S.N. The adaptive algorithm of control over the unit of desublimation of uranium hexafluoride. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2008, vol. 312, no. 5, pp. 133–136. In Rus.
3. Orlov A.A., Malugin R.V. The analysis of uranium hexafluoride production, its cleaning from impurities and filling in transport capacities. *Modern highway technologies. Regional appendix*, 2014, no. 3, pp. 89–98. In Rus.
4. Rusakov I.Y., Molokov P.B., Buinovskii A.S., Sofronov V.L., Brendakov V.N. Development of a desublimator design. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2017, vol. 53, no. 1–2, pp. 89–93.
5. McNamara B.K., O'Hara M.J., Casella A.M., Carter J.C., Addleman R.S., MacFarlan P.J. Uniform deposition of uranium hexafluoride (UF6): Standardized mass deposits and controlled isotopic ratios using a thermal fluorination method. *Talanta*, 2016, vol. 154, pp. 219–227.
6. Bajdali S., Diadic V., Yurkov A. Mathematical Model of the Production of Uranium Hexafluoride. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 315, no. 2, pp. 84–90. In Rus.
7. Nikolaev A.V., Krinitsyn N.S., Dyadik V. F. Mathematical model desublimator uranium hexafluoride production. *Russian Physics Journal*, 2015, vol. 58, no. 12–3, pp. 97–103. In Rus.
8. Bekker V.F. *Modelirovaniye khimiko-tehnologicheskikh obektov* [Modeling of chemical-technological objects]. Moscow, INFRA-M Publ., 2014. 142 p.
9. Patnaik P. *Handbook of inorganic chemicals*. USA, McGraw-Hill Publ., 2002. 1046 p.
10. Weinstock B., Crist R.H. The vapor pressure of uranium hexafluoride. *The Journal of Chemical Physics*, 1948, vol. 16, no. 5, pp. 436–441.
11. Vasenin I.M., Gubanov S.M., Durnovtsev M.I., Kraynov A.Y., Chukanov M.V. Physico-mathematical modeling of fluoride hydrogen desublimation from gas mixtures onto walls of a condenser. *Tomsk state university journal of mathematics and mechanics*, 2014, vol. 31, no. 5, pp. 76–82. In Rus.
12. Oliver G.D., Milton H.T., Grisard J.W. The Vapor Pressure and Critical Constants of Uranium Hexafluoride. *Journal of the American Chemical Society*, 1953, vol. 75, no. 12, pp. 2827–2829.
13. Zhang J. Analysis on holdup during processing UF6. *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*, 2014, vol. 299, no. 1, pp. 517–522.
14. Raev V.V., Saprygin A.V., Tsedilkin A.P., Novokshonov K.V. Determination of thermal conductivity of the solid phase of uranium hexafluoride. *Basic Problems of Material Science*, 2011, vol. 8, no. 4, pp. 125–130. In Rus.
15. Gubanov S.M., Krajinov A.Y., Mazur R.L. Theoretical and experimental modeling of the cooling of uranium hexafluoride vapor

- desublimation tanks. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2016, vol. 50, no. 5, pp. 766–775.
16. Belyntsev A.M., Sergeev G.S., Gromov O.B., Frolov V.G., Kholin V.F. Intensification of evaporation of uranium hexafluoride. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2013, vol. 47, no. 4, pp. 499–504.
17. Gorelik A.G., Amitin A.V. *Desublimatsiya v khimicheskoy promyshlennosti* [Desublimation in the chemical industry]. Moscow, Khimiya Publ., 1986. 272 p.
18. Hayashi Y., Aoki A., Adachi S., Hori K. Study of frost properties correlating with frost formation types. *Journal of Heat Transfer*, 1977, vol. 99 (2), pp. 239–245.
19. Lee J., Lee K.-S. The behavior of frost layer growth under conditions favorable for desublimation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, vol. 120, pp. 259–266.
20. George E.P., Hunter J.S., Hunter W.G. *Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery*. 2nd ed. USA, John Wiley & Sons Publ., 2005. 664 p.
21. Diadik V.F., Baidali S.A., Baidali T.A. *Statisticheskie metody kontroly i upravleniya* [Statistical methods of control and management]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2011. 144 p.

Received: 17 December 2018.

Information about the authors

Alexander V. Nikolaev, engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Nikolay S. Krinitsyn, Cand. Sc., head of research laboratory for industrial robotics, National Research Tomsk Polytechnic University.

Valery F. Dyadik, Cand. Sc., assistant professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 553.041(571.620)

ПРОГНОЗНО-ПОИСКОВАЯ МОДЕЛЬ ЭПИТЕРМАЛЬНЫХ Au-Ag МЕСТОРОЖДЕНИЙ КИСЛОТНО-СУЛЬФАТНОГО ТИПА ПО ДАННЫМ ДЕШИФРИРОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ (НА ПРИМЕРЕ РУДНОГО ПОЛЯ СВЕТЛОЕ, ХАБАРОВСКИЙ КРАЙ)

Ананьев Юрий Сергеевич¹,

AnanyevYS@tpu.ru

Житков Владимир Георгиевич¹,

vlgitkov@yandex.ru

Поцелуев Анатолий Алексеевич²,

roselueva52@mail.ru

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

² ООО «КосмоГеоПро»,
Россия, 634012, г. Томск, ул. Елизаровых, 41, оф. 1.

Актуальность. Расширение минерально-сырьевой базы действующих горнодобывающих предприятий требует современных подходов в изучении сопредельных площадей. Одним из таких современных методов в изучении площадей является использование современных спектрозональных космических снимков в целях выделения потенциально рудоносных площадей на основе структурно-вещественного дешифрирования.

Основная цель исследования заключалась в разработке критериев эпимерального золото-серебряного оруденения в пределах Охотско-Чукотского вулканического пояса на основе материалов дистанционных съемок.

Объектами исследования послужили известные рудные таксоны юго-восточного фланга Ульинской минерагенической зоны Охотско-Чукотского вулканического пояса.

Методы: обработка, спектральный анализ и дешифрирование современных спектрозональных космических снимков *Landsat*, *Aster* и снимков высокого пространственного разрешения *Ikonos*, *WorldView*, *QuickBird*.

Результаты. Разработаны региональные, локальные и детальные критерии Au-Ag оруденения на примере одного из участков Ульинской минерагенической зоны. Структурными критериями регионального уровня являются участки пересечения разнонаправленных разрывных нарушений во вложенных соподчиненных колышевых структурах диаметром от 20 до 90 км. Структурно-вещественные критерии локального уровня – области сопряжения систем вложенных соподчиненных колышевых структур размером от 1 до 10 км с зонами развития Fe-окисных индексов. К структурно-вещественным критериям детального уровня отнесены малые колышевые структуры, выполненные телами вторичных кварцитов различных минеральных ассоциаций, сопряженные с зонами развития Fe-окисных индексов, внутри участков пропилитового типа изменений. На основе выявленных особенностей строения рудного поля Светлое, дан прогноз о перспективности южного и юго-восточного фланга на выявление золото-серебряного эпимерального оруденения. Предложена иерархическая дистанционная прогнозно-поисковая модель эпимеральных Au-Ag месторождений.

Ключевые слова:

Охотско-Чукотский вулканический пояс, космоматериалы, космоструктурные модели, вторичные кварциты, эпимеральные золото-серебряные месторождения.

Введение

Последнее десятилетие в практике геологического-разведочных работ стали широко применяться материалы мультиспектральных космических снимков. Их использование весьма актуально как на малоизученных площадях, так и в пределах известных горнорудных районов. Анализ мультиспектральных снимков *Aster* и *Landsat* позволяет не только выявлять структурные особенности территорий, но и картировать метасоматически измененные горные породы различного минерального состава [1–12].

В минерагеническом отношении рудное поле Светлое размещается в юго-западной части Ульинского прогиба Охотской части ОЧВП и приурочено к участку пересечения Дюльбакинского дизъюнктива с Алалиндским и Онемнинским. В структурном плане рудное поле приурочено к кальдере проседания размером около 30 км, которая выпол-

нена андезибазальтами, андезитами, туфами и лавами среднего состава, риолитами, дацитами, игнimbритами. Стратифицированный вулканогенный материал прорван штоками и дайками андезибазальтов и гранодиорит-порфиров. В составе рудного поля выделяется четыре рудных участка: Людмила, Тамара, Елена, Лариса. Au-Ag оруденение пространственно ассоциировано с телами вторичных кварцитов, в составе которых различают монокварцевые, кварц-алунитовые и кварц-гидрослюдисто-глинистые минеральные фации [13, 14]. В пострудную стадию в зоне гипергенеза под действием метеорных вод происходило интенсивное окисление первичных сульфидов и новообразование лимонита и ярозита [13, 14]. Такой тип месторождений в отечественной литературе называют «кислотно-сульфатным» [14–17], а в англоязычной – «high sulfidation» [18–20].

Методика

В основу исследований положены материалы мультиспектральных космических съемок низкого и среднего пространственного разрешения (Modis, Landsat, Aster), а также высокого пространственного разрешения (Ikonos, WorldView-1, WorldView-2, QuickBird). С целью создания цифровых моделей рельефа использованы материалы радарных съемок – SRTM и AsterGDEM.

Общая методика исследований космоматериалов включала в себя последовательно следующие этапы: подготовка, обработка, анализ и дешифрирование [21, 22]. При этом решались следующие задачи:

- подбор исходных космических данных различных систем;
- улучшение, классификация растровых изображений и их дешифрирование;
- создание спектрゾонального изображения из моноканальных растротов и его обработка;
- дешифрирование всего комплекса синтезированных изображений с выделением линейных и кольцевых (дуговых) структур и других особенностей геологического строения;
- расчет спектральных индексов по материалам Landsat и Aster;
- корреляционный анализ многоканальных изображений методом главных компонент;
- спектральный анализ многозонального изображения материалов Aster;
- интерпретация полученных материалов и составление схем дешифрирования.

Полученные результаты и их обсуждение

Получены разноуровневые иерархические структурно-вещественные модели регионального (фрагмент Ульинской минерагенической зоны ОЧВП), локального (Уенминский рудно-россыпной узел) и детального (рудное поле Светлое) плана.

Космоструктурная модель регионального уровня генерализации (рис. 1) построена на основе структурного дешифрирования материалов Landsat, Modis и определяется системами вложенных (телескопированного типа) кольцевых структур диаметром от 20 до 90 км, приуроченных к участкам пересечения разноориентированных региональных разрывных нарушений. Подобные системы вложенных концентрических структур отражают пульсационное развитие глубинных энергетических очагов, которые проявляются в земной коре в виде мантийных диапиров, внутрикоровых магматических камер, многоуровневых вулкано-плутонических комплексов, а также ареалы их развития и влияния [23–25].

Созданная модель регионального уровня генерализации юго-восточного фланга Ульинской минерагенической зоны показывает, что все известные в ее пределах рудно-россыпные районы и рудные узлы выделяются совокупностью кольцевых (дуговых) и линейных структур, что дает основа-

ние рассматривать их в качестве структурных критериев соответствующих рудных таксонов. Следует подчеркнуть, что в Уенминском рудно-россыпном узле, включающем рудное поле Светлое, данные структуры проявлены в наибольшей степени (рис. 1). В связи с этим данная система телескопированных кольцевых структур была изучена в более детальном масштабе на локальном уровне.

Для построения модели рудного поля Светлое локального уровня использовано структурно-вещественное дешифрирование материалов мультиспектральных космических съемок Landsat ETM+, Landsat 8 и созданной по материалам радарных съемок SRTM и AsterGDEM цифровой модели рельефа (рис. 2).

Основными элементами этой модели, имеющими важное прогнозно-поисковое значение, являются: кольцевые и дуговые структуры второго порядка диаметром от 1 до 10 км, отражающие в первую очередь особенности морфологии и внутреннее строение палеовулканических аппаратов; линеаменты, трассирующие отдельные тектонические нарушения; северо-западная зона, проявленная контрастными изменениями индексов оксидов железа, фиксирующихся в материалах Landsat. Низкими концентрациями индексов оксидов железа выделяются участки преобладающего распространения кислых вулканических пород уракской свиты, затронутых процессами аргиллизации. А повышенные показатели этих индексов связаны с зонами гипергенной лимонитизации. Представляется, что наиболее перспективными на выявление Au-Ag оруденения будут участки, находящиеся в пределах северо-западной зоны, внутри кольцевых структур 2-го порядка, сочетающихся с узлами пересечения разноориентированных линеаментов и зонами повышенных значений индексов оксидов железа.

Данным критериям соответствуют несколько уже известных рудоносных участков – Светлое (1), Ягодка (2), Колка (3), Колорадо (4). Среди них по масштабам и интенсивности развития оксидов железа выделяется Светлинская площадь, что и определило ее выбор в качестве объекта более детального исследования.

Установленные закономерности проявления определившихся рудных полей в материалах мультиспектральных и радарных космических исследований этого уровня генерализации следует использовать в качестве локальных структурно-вещественных критериев Au-Ag рудных полей.

В результате выполненных исследований мультиспектральных материалов космических систем Aster и детальных материалов систем Ikonos, WorldView, QuickBird получена детальная схема рудного поля Светлое (рис. 3). Главными ее элементами являются: кольцевые структуры второго и третьего порядков, разнонаправленные линеаменты, различные по составу метасоматиты, зоны развития лимонитизации.

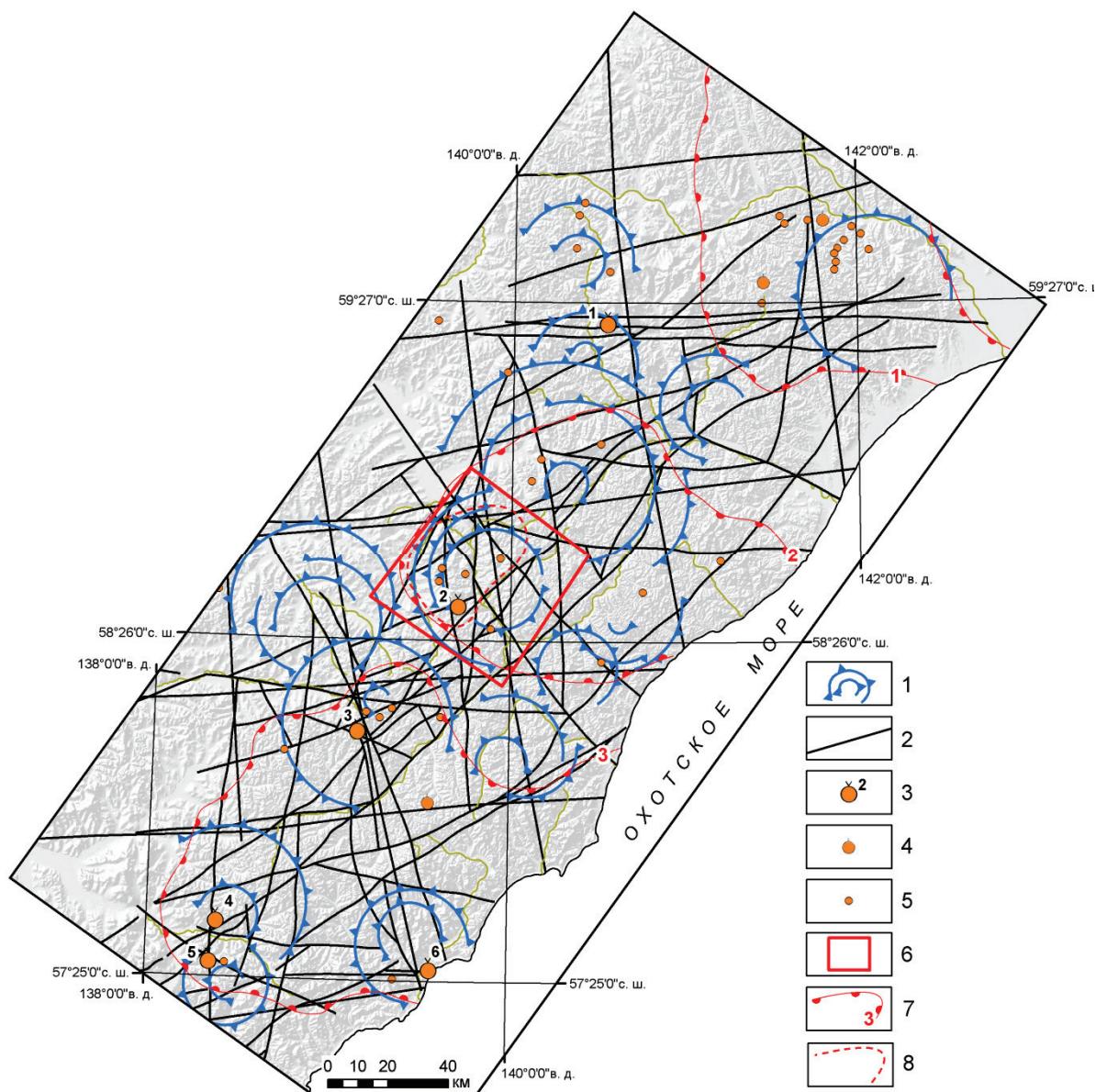


Рис. 1. Юго-восточный фланг Ульинской минерагенической зоны Охотско-Чукотского вулканического пояса (ОЧВП). Основные космогеологические структуры: 1 – кольцевые структуры первого порядка; 2 – разрывные нарушения; 3–8 – рудные таксоны (по «Карта минерагенического районирования Хабаровского края», А.Ф. Васькин и др., 2006): 3 – средние месторождения (1 – Красивое, 2 – Светлое, 3 – Антыкит, 4 – Дар, 5 – Одари, 6 – Прибрежное); 4 – малые месторождения; 5 – рудопроявления; 6 – участок локального дешифрирования космоматериалов; 7 – рудно-rossыпные районы (1 – Юрьевский, 2 – Среднеульинский, 3 – Верхнеульинский); 8 – Уенминский рудно-rossыпный узел

Fig. 1. Southeastern flank of the Ulinsk mineralogenic zone of Okhotsk-Chukotka volcanic belt (OCVB). The main cosmogeological structures: 1 are the first order ring structures; 2 are the faults; 3–8 are the ore taxa (according to the «Map of mineralogenic zoning of the Khabarovsk kray», A.F. Vaskin et al., 2006): 3 are the medium deposits (1 – Krasivoe, 2 – Svetloe, 3 – Antykit, 4 – Dar, 5 – Odari, 6 – Pribrezhnoe); 4 are the small deposits; 5 are the occurrences; 6 is the area of local work on the interpretation data of remote sensing; 7 is the ore-placer district (1 – Yurovsky, 2 – Sredneulinsky, 3 – Verkhneulinsky); 8 are the Uenminsk ore-placer clusters

Элементы геологического строения рудного поля явно выражены в материалах космических съемок. Так, положение палеовулканических построек и их отдельных элементов – кальдер проседания и жерловых каналов, проявляется дуговыми и кольцевыми элементами дешифрирования (рис. 3). Кольцевая структура второго порядка диаметром 9,5 км отражает пространственное разме-

щение палеовулканической постройки сложного строения, а структуры меньшего диаметра указывают на размещение пород жерловой фации.

Разноориентированные разрывные нарушения отчетливо проявляются в материалах космических съемок. Среди этих тектонических элементов преобладают северо-восточные (продольные к осевой части ОЧВП), северо-западные, субмеридио-

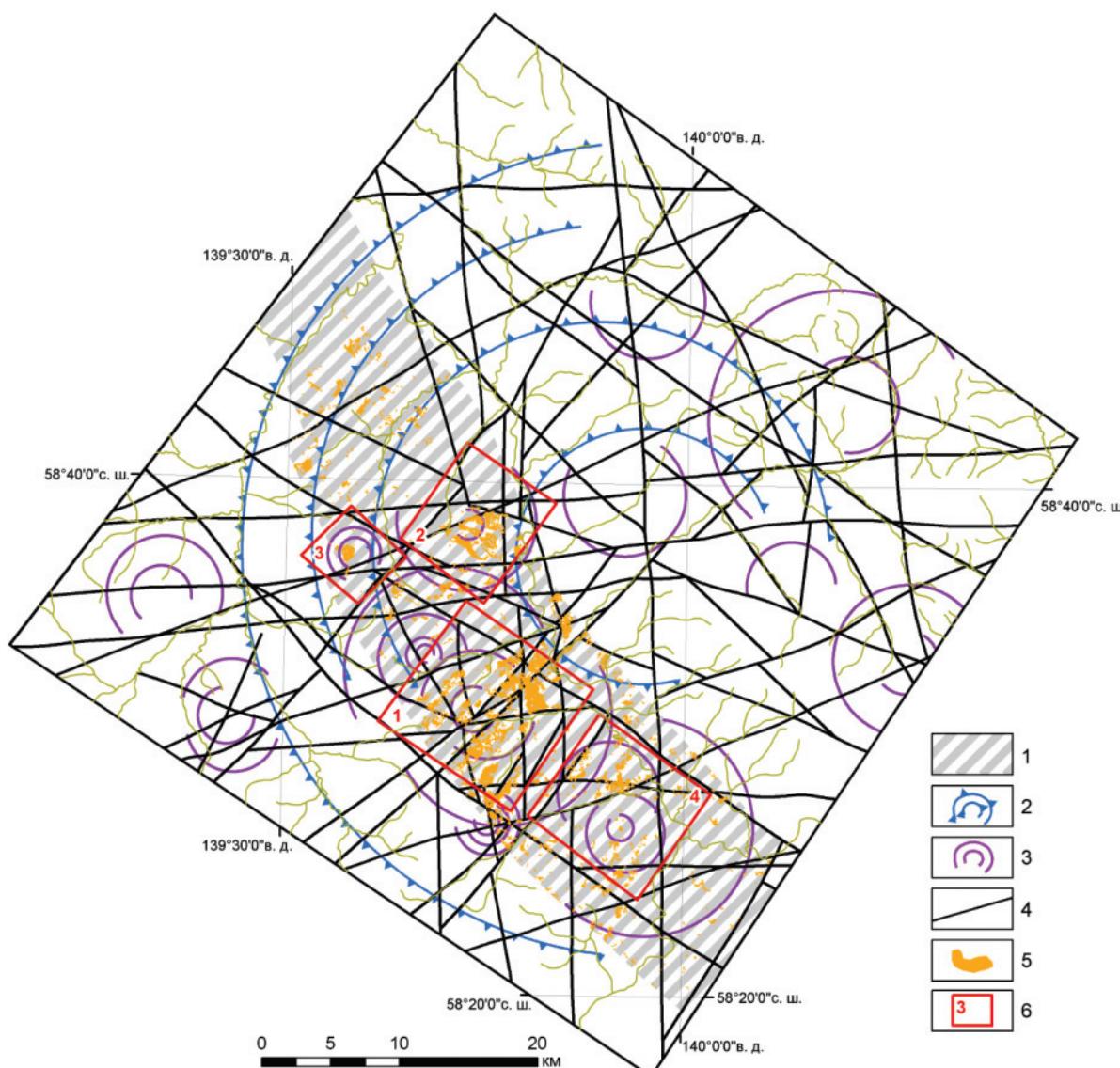


Рис. 2. Уенминский рудно-rossыпной узел. Схема основных космогеологических структур: 1 – северо-западная зона; 2 – кольцевые структуры первого порядка; 3 – кольцевые структуры второго порядка; 4 – разрывные нарушения; 5 – участки высоких значений минерального индекса «Оксиды железа»; 6 – перспективные площади и их номера

Fig. 2. The Uenminsk ore-placer cluster. Local scheme of main cosmogeological structures: 1 is the northwest zone; 2 are the first order ring structures; 3 are the second order ring structures; 4 are the private faults; 5 are the sections of high values of the «Iron oxide» index; 6 are the forecast areas and their numbers

нальные и субширотные. Спектральный анализ многозональных космических снимков ASTER позволил выделить и закартировать в пределах площади тела метасоматитов – вторичных кварцитов и пропилитов. Среди вторичных кварцитов различаются монокварцевые, преимущественно кварц-алунит-глинистые и существенно кварц-гидрослюдистые. В составе пропилитов преобладают хлоритовые разновидности (рис. 3). Форма тел монокварцевых метасоматитов значительно отличается в центральной и краевых частях рудного поля. Тела неправильной и слабо вытянутой формы характерны для центральной части (месторождения Лариса, Елена), в то время как для краевых частей

более характерны объекты линейной морфологии (месторождения Людмила, Тамара). Сопоставление полученных результатов дешифрирования метасоматитов с результатами наземных съемок [14], выполненных в центральной и северной частях палеовулканической постройки, показало весьма высокую сходимость. Однако следует отметить, что видимые размеры тел монокварцевых метасоматитов, выделенных по результатам дешифрирования, оказываются завышенными, что объясняется низким и средним пространственным разрешением материалов ASTER.

Зоны гипергенной лимонитизации фиксируются в материалах спектрального анализа космиче-

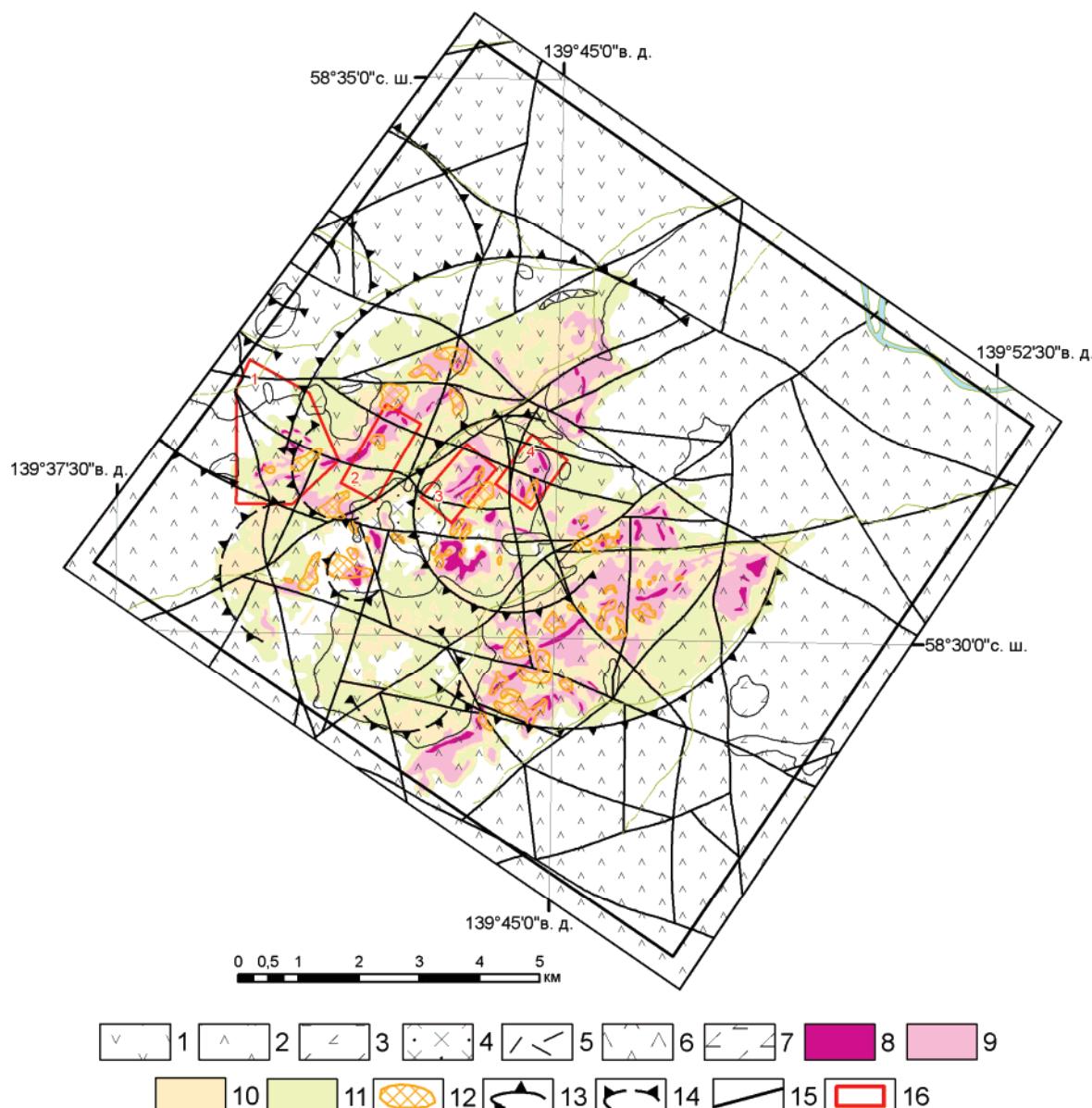


Рис. 3. Рудное поле Светлое. Детальная схема (по материалам дешифрирования Aster, Ikonos и др.): 1–2 – уракская свита; 1 – андезибазальты, андезиты; 2 – игнимбриты, дациты; 3 – андезибазальты хакаринской свиты; 4–6 – уракский дацит-риолитовый комплекс: 4 – гранодиорит-порфирь; 5 – риолиты; 6 – дациты; 7 – штоки андезибазальтов хакаринского комплекса; 8–10 – метасоматические кварциты: 8 – монокварцевые; 9 – преимущественно кварц-алунит-глинистые; 10 – кварц-гидрослюдистые; 11 – пропилиты; 12 – участки экзогенной лимонитизации; 13–14 – кольцевые структуры: 13 – второго и 14 – третьего порядков; 15 – разрывные нарушения; 16 – участки детальных работ (1 – Людмила, 2 – Тамара, 3 – Елена, 4 – Лариса)

Fig. 3. The Svetloe ore field. Detailed cosmogeological scheme (based on the interpretation of Aster, Ikonos and others data): 1–2 – Urakskaya suite: 1 – andesites, andesibasalts, their lavas and tuffs; 2 – ignimbrites, dacites, tuffs; 3 – andesibasalts of the khakarinisk suite; 4–6 – Uraksky dacite-rhyolite complex: 4 – granodiorite-porphyrus; 5 – rhyolites; 6 – dacites; 7 – stocks of andesibasalts of the khakarinisk complex; 8–10 – metasomatic silica: 8 – mono-quartz; 9 – quartz-alunite-clay; 10 – quartz-hydromica; 11 – propylites; 12 – areas of intensive limonization; 13–14 – ring structures of the second order; 14 – third-order ring structures; 15 – faults; 16 – areas of detailed work (1 – Lyudmila, 2 – Tamara, 3 – Elena, 4 – Larisa)

ских снимков Aster повышенными значениями параметров – «Железная шляпа» (Gossan) и «Трехвалентное железо» (Ferric Iron) и отражают участки возможного развития зоны окисления первичных сульфидсодержащих пород.

Известные участки Людмила, Тамара, Елена, Лариса приурочены к центральной и северной ча-

стям палеовулканической структуры. На участках отчетливо проявлены тела метасоматитов кварцевого и кварц-алунит-глинистого составов в пространственной ассоциации с зонами интенсивного развития оксидов железа (рис. 3). Таким образом, выявленные структурно-вещественные характеристики эпимеральных Au-Ag месторождений ки-

Таблица. Многоуровневая прогнозно-поисковая модель эпимеральных Au-Ag месторождений кислотно-сульфатного типа (на примере рудного поля Светлое, Хабаровский край)

Table. Multilevel forecast and prospecting model of epithermal high sulfidation Au-Ag deposits (on the example of the Svetloe ore field, Khabarovskiy Kray)

| Уровень генерализации/масштабы Generalization level/scale | Рудные таксоны Ore taxa | Признаки выделения Signs of exposure | Геологическая интерпретация Geological interpretation |
|---|--|--|--|
| Региональный/1:1000000 Regional/1:1000000 | Рудный район, рудный узел Ore-bearing district, ore cluster | Совокупность вложенных (телескопированных) колышевых и дуговых структур диаметром от 20 до 90 км в участках пересечения разноориентированных разрывных нарушений Systems of telescoped ring structures with a diameter of 20–90 km at the junction of longitudinal, transverse and diagonal faults | Проявление мантийных диапиров, внутриструктурных магматических камер, многоуровневых вулкано-плутонических комплексов Mantle diapirs, intracrustal magmatic chambers, multilevel volcano-plutonic complexes and areas of their development and influence |
| Локальный/1:200000–1:100000 Local/1:200000–1:100000 | Рудное поле Ore field | Совокупность вложенных (телескопированных) колышевых и дуговых структур диаметром от 1 до 10 км в участках пересечения разноориентированных разрывных нарушений и их сопряжение с высокоградиентными зонами индексов оксидов железа Systems of telescoped ring structures with a diameter of 1–10 km at the junctions of the longitudinal, transverse and diagonal faults. Zones of intensive redistribution of Fe-oxide indices. Conjugation of telescopic circle structures with areas of high values of Fe-oxide indices | Палеовулканические постройки и элементы их строения. Участки интенсивного кислотного выщелачивания. Участки гипергенной лимонитизации Paleovolcanoes and their elements. Intense acid leaching zones. Areas of hypergene limonitization |
| Детальный/1:50000–1:25000 Detailed/1:50000–1:25000 | Месторождение, продуктивная зона Deposit, productive zone | Дуговые и колышевые структуры размером до 3 км. Тела сложенные различными минеральными ассоциациями формации вторичных кварцитов, внутри участков пропилитового типа изменений, сопряженные с зонами развития Fe-окисных индексов Ring structures with a diameter of not more than 3 km. Bodies of silica of mono-quartz, quartz-alunite-clay and quartz-hydromica compositions among fields of propilized rocks associated with areas of high values of Fe-oxide indices | Вулканические структуры кальдерного и жерлового типа. Тела вторичных кварцитов различного состава. Зоны интенсивного развития лимонитизации и участки развития зоны окисления первичных сульфидсодержащих руд (пород) Calderas and ventral parts of the paleo-volcanoes. The bodies of silica of different composition. Areas of intense hypergenic limonitization and vuggy silica |

слотно-сульфатного типа можно использовать в качестве поисковых критериев при анализе материалов детальных космических съемок.

Результаты комплексного анализа материалов космических съемок различного пространственного разрешения по западной части Ульинского прогиба положены в основу предлагаемой многоуровневой прогнозно-поисковой модели эпимерального Au-Ag оруденения кислотно-сульфатного типа (таблица).

Учитывая полученные по материалам космических съемок новые данные о геологическом строении рудного поля Светлое и особенностях локализации в его пределах рудных месторождений и выработанный на этой основе комплекс поисковых критериев, можно прогнозировать высокие перспективы обнаружения золото-серебряного оруденения в пределах юго-восточного и южного флангов золоторудного поля.

Выводы

Проведенные исследования позволили получить региональную, локальную и детальную космоструктурные схемы эпимерального Au-Ag оруде-

нения в пределах Ульинской минерагенической зоны ОЧВП. Предложена иерархическая прогнозно-поисковая модель эпимеральных Au-Ag месторождений кислотно-сульфатного типа. Полученные закономерности локализации рудных таксонов позволяют рекомендовать их как дистанционные критерии Au-Ag оруденения. Дан прогноз перспективности южного и юго-восточного флангов рудного поля Светлое. Структурными критериями регионального уровня являются участки пересечения разнонаправленных разрывных нарушений во вложенных соподчиненных колышевых структурах диаметром от 20 до 90 км. Структурно-вещественные критерии локального уровня – области сопряжения систем вложенных соподчиненных колышевых структур размером от 1 до 10 км с зонами развития Fe-окисных минералов. К структурно-вещественным критериям детально-го уровня отнесены малые колышевые структуры, выполненные телами, сложенными различными минеральными ассоциациями формации вторичных кварцитов, внутри участков пропилитового типа изменений, сопряженные с зонами развития Fe-окисных индексов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mars J.C., Rowan L.C. Regional mapping of phyllitic- and argillic-altered rocks in the Zagros magmatic arc, Iran, using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data and logical operator algorithms // Geosphere. – 2006. – V. 2 (3). – P. 161–186.
2. Di Tommaso I., Rubinstein N. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina // Ore Geology Reviews. – 2007. – V. 32. – P. 275–290.
3. Zhang X., Pazner M., Duke N. Lithologic and mineral information extraction for gold exploration using ASTER data in the south Chocolate Mountains (California) // Photogrammetry and Remote Sensing. – 2007. – V. 62 (4). – P. 271–282.
4. Moghtaderi A., Moore F., Mohammadzadeh A. The application of advanced space-borne thermal emission and reflection (ASTER) radiometer data in the detection of alteration in the Chadormalu paleocrater, Bafq region, Central Iran // Journal of African Earth Sciences. – 2007. – V. 30. – P. 238–252.
5. Gabr S., Ghulam A., Kusky T. Detecting areas of high-potential gold mineralization using ASTER data // Ore Geology Reviews. – 2010. – V. 38 (1–2). – P. 59–69.
6. Azizi H., Tarverdi M.A., Akbarpour A. Extraction of hydrothermal alterations from ASTER SWIR data from east Zanjan, northern Iran // Advances in Space Research. – 2010. – V. 46. – P. 99–109.
7. Pour B.A., Hashim M. The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits // Ore Geology Reviews. – 2012. – V. 44. – P. 1–9.
8. Detection of hydrothermal mineralized zones associated with listwaenites in Central Oman using ASTER data / S. Rajendran, S. Nasir, T.M. Kusky, A. Ghulam, S. Gabr, M.A.K. El-Ghali // Ore Geology Reviews. – 2013. – V. 53. – P. 470–488.
9. Ayoobi I., Tangestani M. H. Evaluating the effect of spatial sub-setting on subpixel unmixing methodology applied to ASTER over a hydrothermally altered terrain // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2017. – V. 62. – P. 1–7.
10. Rajendran S., Nasir S. Characterization of ASTER spectral bands for mapping of alteration zones of volcanogenic massive sulphide deposits // Ore Geology Reviews. – 2017. – V. 88. – P. 317–335.
11. Fereydooni H., Mojedifar S. A directed matched filtering algorithm (DMF) for discriminating hydrothermal alteration zones using the ASTER remote sensing data // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2017. – V. 61. – P. 1–18.
12. Integrating geologic and Landsat-8 and ASTER remote sensing data for gold exploration: a case study from Zarshuran Carlin-type gold deposit, NW Iran / T. Yousefi, F. Aliyari, A. Abedini, A. Asghar Calagari // Arabian Journal of Geosciences. – 2018. – V. 11. – I. 17. – P. 1–19.
13. К условиям формирования редкометального рудопроявления ЭММИ (Ульинская структурно-металлогеническая зона) / А.Г. Колесников, И.А. Брызгалов, Т.Л. Рассказова, Н.Е. Савва // Чтения памяти К.В. Симакова: Всероссийская научная конференция. Сборник материалов. – Магадан: СВКНИИ, 2007. – С. 90–91.
14. Мишин Л.Ф. Вторичные кварциты и их связь с золоторудной минерализацией месторождения Светлое (Россия) (Ульинский прогиб, Охотско-Чукотский вулканогенный пояс) // Тихоокеанская геология. – 2011. – Т. 30. – № 4. – С. 32–48.
15. Наумова О.А., Алышева Э.И. Гидротермально измененные породы Озерновского золото-серебряного месторождения Камчатки // Отечественная геология. – 1995. – № 1. – С. 35–43.
16. Мишин Л.Ф., Бердников Н.В. Вторичные кварциты и ихрудоносность. – Владивосток: Дальнаука, 2003. – 160 с.
17. Глухов А.Н. Алунит-кварцевые эпимеральные месторождения золота России и стран СНГ: открытия последних лет и перспективы выявления на северо-востоке Азии // Вестник СВНЦ ДВО РАН. – 2011. – № 3. – С. 7–17.
18. Sillitoe R.H. Gold metallogeny of Chile – an Introduction // Economic Geology. – 1991. – V. 86 (6). – P. 1187–1205.
19. Hedenquist J.W., Arribas A.R., Gonzalez-Urien E. Exploration for epithermal gold deposits // Reviews in Economic Geology. – 2000. – V. 13. – P. 245–277.
20. Sillitoe R.H. Porphyry Copper Systems // Economic Geology. – 2010. – V. 105. – P. 3–41.
21. Аэрокосмические методы геологических исследований / под ред. А.В. Перцова. – СПб.: Изд-во СПб картфабрики ВСЕГИИ, 2000. – 316 с.
22. Дистанционные методы геологических исследований, прогноза и поиска полезных ископаемых (на примере Рудного Алтая) / А.А. Поцелуев, Ю.С. Ананьев, В.Г. Житков, В.Н. Назаров, А.С. Кузнецов. – Томск: СТТ, 2007. – 228 с.
23. Томсон И.Н., Кочнева Н.Т., Кравцов В.С. Системы концентрических структур, их типы и рудоносность // Геология рудных месторождений. – 1982. – № 4. – С. 21–33.
24. Серокуров Ю.Н., Калмыков В.Д., Громцев К.В. Дистанционная оценка золотоносного потенциала Северной Бурятии // Руды и металлы. – 2008. – № 1. – С. 45–51.
25. Серокуров Ю.Н., Калмыков В.Д., Зуев В.М. Дистанционный прогноз кимберлитового магматизма. – М.: Триумф, 2017. – 312 с.

Поступила 14.01.2019 г.

Информация об авторах

Ананьев Ю.С., доктор геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Житков В.Г., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Поцелуев А.А., доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный геолог ООО «КосмоГеоПро».

UDC 553.041(571.620)

FORECASTING AND PROSPECTING MODEL OF EPITHERMAL HIGH SULFIDATION Au-Ag DEPOSITS USING MODERN SATELLITE DATA (ON THE EXAMPLE OF ORE FIELD SVETLOE, KHABAROVSKIY KRAY)

Yury S. Ananyev¹,

AnanyevYS@tpu.ru

Vladimir G. Zhitkov¹,

vlgitkov@yandex.ru

Anatoliy A. Potseluev²,

pocelueva52@mail.ru

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

² «KosmoGeoPro» LLC,
41, Elizarovskykh street, Tomsk, 634012, Russia.

The relevance. The expansion of the mineral resource base of existing mining enterprises requires modern approaches to the study of adjacent areas. One of such modern methods in the study of areas is the use of modern spectral space imagery in order to isolate potentially ore-bearing areas based on structural and material interpretation.

The main aim of the work was to develop the criteria for epithermal gold-silver mineralization within the Okhotsk-Chukotka volcanic belt based on materials from remote surveys.

The objects of the research were the well-known ore taxa of the southeastern flank of the Ulinskaya mineragenic zone of the Okhotsk-Chukotka volcanic belt.

Methods: processing, spectral analysis and interpretation of modern remote sensing Landsat, Aster and high resolution images Ikonos, WorldView, QuickBird.

Results. The authors have developed regional, local and detailed criteria for epithermal Au-Ag mineralization using the example of one of the sections of the Ulinsk mineragenic zone. Structural criteria for the regional level are systems of telescoped ring structures with a diameter of 20–90 km at the junction points of multidirectional faults. Structural and material criteria of the local level are the areas of conjugation of systems of nested coordinated ring structures with sizes from 1 to 10 km with zones of development of Fe-oxide indices. The structural-material criteria of the detailed level include small ring structures made by the bodies of silica of various mineral composition, associated with zones of development of Fe-oxide indices, within the sections of the propilitic type of alteration. On the basis of the identified features of the structure of the Svetloe ore field, a forecast was made of the prospects for the southern and southeastern flank to identify Au-Ag epithermal mineralization. A hierarchical remote sensing forecast and prospecting model of epithermal Au-Ag deposits is proposed.

Key words:

Okhotsk-Chukotka volcanic belt, remote sensing materials, cosmostructural models, silica, epithermal gold-silver deposits.

REFERENCES

1. Mars J.C., Rowan L.C. Regional mapping of phyllitic- and argillic-altered rocks in the Zagros magmatic arc, Iran, using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data and logical operator algorithms. *Geosphere*, 2006, vol. 2 (3), pp. 161–186.
2. Di Tommaso I., Rubinstein N. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina. *Ore Geology Reviews*, 2007, vol. 32, pp. 275–290.
3. Zhang X., Pazner M., Duke N. Lithologic and mineral information extraction for gold exploration using ASTER data in the south Chocolate Mountains (California). *Photogrammetry and Remote Sensing*, 2007, vol. 62 (4), pp. 271–282.
4. Moghtaderi A., Moore F., Mohammadzadeh A. The application of advanced space-borne thermal emission and reflection (ASTER) radiometer data in the detection of alteration in the Chadormalu paleocrater, Bafq region, Central Iran. *Journal of African Earth Sciences*, 2007, vol. 30, pp. 238–252.
5. Gabr S., Ghulam A., Kusky T. Detecting areas of high-potential gold mineralization using ASTER data. *Ore Geology Reviews*, 2010, vol. 38 (1–2), pp. 59–69.
6. Azizi H., Tarverdi M.A., Akbarpour A. Extraction of hydrothermal alterations from ASTER SWIR data from east Zanjan, northern Iran. *Advances in Space Research*, 2010, vol. 46, pp. 99–109.
7. Pour B.A., Hashim M. The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits. *Ore Geology Reviews*, 2012, vol. 44, pp. 1–9.
8. Rajendran S., Nasir S., Kusky T.M., Ghulam A., Gabr S., El-Ghali M.A.K. Detection of hydrothermal mineralized zones associated with listwaenites in Central Oman using ASTER data. *Ore Geology Reviews*, 2013, vol. 53, pp. 470–488.
9. Ayooobi I., Tangestani M. H. Evaluating the effect of spatial sub-setting on subpixel unmixing methodology applied to ASTER over a hydrothermally altered terrain. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, vol. 62, pp. 1–7.
10. Rajendran S., Nasir S. Characterization of ASTER spectral bands for mapping of alteration zones of volcanogenic massive sulphide deposits. *Ore Geology Reviews*, 2017, vol. 88, pp. 317–335.
11. Fereydooni H., Mojeddifar S. A directed matched filtering algorithm (DMF) for discriminating hydrothermal alteration zones using the ASTER remote sensing data. *International Journal of*

- Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, vol. 61, pp. 1–13.
12. Yousefi T., Aliyari F., Abedini A., Asghar Calagari A. Integrating geologic and Landsat-8 and ASTER remote sensing data for gold exploration: a case study from Zarshuran Carlin-type gold deposit, NW Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 2018, vol. 11, Iss. 17, pp. 1–19.
13. Kolesnikov A.G. K usloviyam formirovaniya redkometalnogo rudoproyavleniya Emmi (Ulinskaya strukturno-metallogenicheskaya zona) [To the conditions of formation of the rare-metal ore occurrence Emmy (Ulinskaya structural metallogenic zone)]. *Chteniya pamyati K.V. Simakova. Sbornik materialov Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii* [Readings in memory of K.V. Simakov. Collection of materials of All-Russian Scientific Conference]. Magadan, NEIRI Publ., 2007. pp. 90–91.
14. Mishin L.F. Secondary quartzites and their relation to gold ore mineralization of the Svetloe deposit (Ulya trough, Okhotsk-Chukotka volcanogenic belt). *Tikhookeanskaya geologiya*, 2011, vol. 30 (4), pp. 32–48.
15. Naumova O.A. Alysheva E.I. Gidrotermalno izmenennye porody Ozernovskogo zoloto-serebryanogo mestorozhdeniya Kamchatki [Altered rocks of the Ozernovsky gold-silver deposit at Kamchatka]. *Otechestvennaya geologiya*, 1995, vol. 1, pp. 35–43.
16. Mishin L.F., Berdnikov N.V. *Vtorichnye kvartsity i ikh rudonosnost* [Secondary quartzites and their ore content]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2003. 160 p.
17. Glukhov A.N. Alunit-kvartsevy epitermalnye mestorozhdeniya zolota Rossii i stran SNG: otkrytiya poslednikh let i perspektivy vyyavleniya na severo-vostoke Azii [Alunite-quartz epithermal gold deposits in Russia and the CIS countries: discoveries of recent years and prospects for identification in northeast Asia]. *Vestnik SVNC DVO RAN*, 2011 (3), pp. 7–17.
18. Sillitoe R.H. Gold metallogeny of Chile – an Introduction. *Economic Geology*, 1991, vol. 86 (6), pp. 1187–1205.
19. Hedenquist J.W., Arribas A.R., Gonzalez-Urien E. Exploration for epithermal gold deposits. *Reviews in Economic Geology*, 2000, vol. 13, pp. 245–277.
20. Sillitoe R.H. Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*, 2010. vol. 105, pp. 3–41.
21. *Aerokosmicheskie metody geologicheskikh issledovanii* [Aerospace geological research methods]. Ed. by A.V. Pertsov. St-Petersburg, SPb kartfabriki VSEGII Publ., 2000. 316 p.
22. Potseluev A.A., Ananyev Yu.S., Zhirkov V.G., Nazarov V.N., Kuznetsov A.S. *Distantionnye metody geologicheskikh issledovanii, prognoza i poiska poleznykh iskopayemykh (na primere Rudnogo Altaya)* [Remote methods of geological studies, mineral deposit prognosis and prospecting (at the example of Rudny Altay)]. Tomsk, STT Publ., 2007. 228 p.
23. Tomson I.N., Kochneva N.T., Kravtsov V.S. Sistemy kontsentricheskikh struktur, ikh tipy i rudonosnost [Systems of ring structures, their types and ore content]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 1982, vol. 4, pp. 21–33.
24. Serokurov Yu.N., Kalmykov V.D., Gromtsev K.V. Remote assessment of the gold-bearing potential of Northern Buryatia. *Rudy i metally*, 2008, vol. 1, pp. 45–51. In Rus.
25. Serokurov Yu.N., Kalmykov V.D., Zuev V.M. *Distantionnyy prognоз kimberlitovogo magmatizma* [Remote forecast of kimberlite magmatism]. Moscow, Triumf Publ., 2017. 312 p.

Received 14 January 2019.

Information about the authors

Yury S. Ananyev, Dr. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Vladimir G. Gitkov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Anatoliy A. Potseluev, Dr. Sc., professor, chief geologist, «KosmoGeoPro» LLC.

УДК 622.276.346

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПРОДУКТИВНОСТИ СКВАЖИН С БОКОВЫМ СТВОЛОМ (НА ПРИМЕРЕ УНЬВИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ)

Щербаков Александр Анатольевич¹,

aleksandr.a.shcherbakov@gmail.com

Хижняк Григорий Петрович¹,

xgp@mail.ru

Галкин Владислав Игнатьевич¹,

vgalkin@pstu.ru

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29.

Актуальность. Многие месторождения Соликамской депрессии Пермского края характеризуются завершающей стадией разработки и имеют высокий коэффициент извлечения нефти, близкий к проектному, высокую обводненность добываемой продукции, ухудшение технико-экономических показателей добычи. Для выполнения проектных показателей на месторождениях применяются различные методы повышения нефтеотдачи. Анализ их применения показывает, что наибольший средний прирост начального дебита скважин по нефти достигается путем зарезки боковых стволов. При обосновании расположения бокового ствола в интервале продуктивного пласта одним из основных показателей дальнейшей эффективности работы скважины является начальный коэффициент продуктивности скважины по нефти.

Цель: разработать методику прогнозирования коэффициента продуктивности по нефти скважин с боковым стволом с учетом геолого-технологических характеристик объекта.

Объекты: бобриковские терригенные отложения Уньвинского месторождения Соликамской депрессии.

Методы: корреляционный и регрессионный анализ, основанный на данных геофизических и гидродинамических исследований скважин, значениях фильтрационно-емкостных свойств пласта, физико-химических свойств нефти, а также геолого-технологических показателях.

Результаты. Разработанная методика позволяет оценивать значения коэффициента продуктивности по нефти скважин с боковым стволом на основе результатов геофизических и гидродинамических исследований скважин, значений фильтрационно-емкостных свойств пласта, физико-химических свойств нефти, а также геолого-технологических показателей с помощью пошагового регрессионного анализа и разделения исходных данных значений коэффициента продуктивности по нефти на классы на основе его зависимости от коэффициента детерминации. Установлено, что при значениях $K_{\text{prod},n} \geq 10$ основное влияние на коэффициент продуктивности по нефти скважин с боковыми стволами оказывают технологические показатели – зенитный угол α бокового ствола в интервале продуктивного пласта и длина L_{ct} ствола скважины в пласте, что говорит о возможности регулирования процесса добычи запасов нефти изменением этих параметров.

Ключевые слова:

Боковые стволы, повышение нефтеотдачи пласта, коэффициент продуктивности по нефти, корреляционный анализ, регрессионный анализ.

Значительная часть месторождений на территории Соликамской депрессии находится или вступает в завершающую стадию разработки. Для выполнения проектных показателей на месторождениях применяются методы повышения нефтеотдачи (ПНП) – гидравлический разрыв пласта (ГРП), зарезка боковых стволов (ЗБС), радиальное бурение (РБ), соляно-кислотные обработки (СКО) призабойной зоны пласта [1–13]. Анализируя применение методов ПНП на этих месторождениях в 2010–2018 гг. (726 операций), можно отметить снижение со временем прироста начального дебита скважин по нефти после ПНП (рис. 1), что связано с существенной выработкой извлекаемых запасов нефти.

Наибольший средний прирост начального дебита скважин по нефти 13 т/сут достигается ЗБС при среднем по всем методам 9,5 т/сут. ЗБС позволяет охватить разработкой остаточные запасы углеводородов, избежать строительства новых скважин и, как следствие, обустройства новых выкидных линий и промысловых трубопроводов.

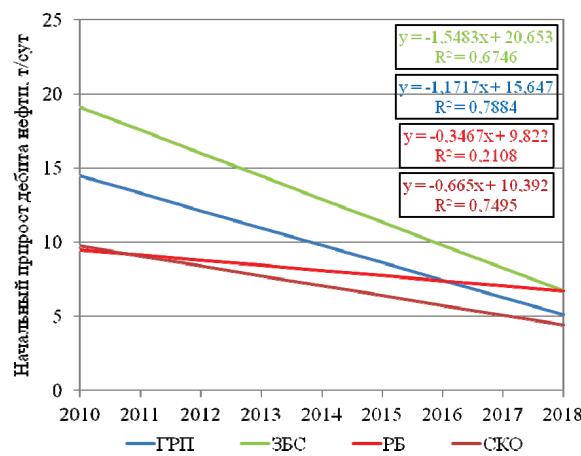


Рис. 1. Средний начальный прирост дебита по нефти в скважинах месторождений Соликамской депрессии

Fig. 1. Average initial increase in oil production rate in wells of the Solikamskaya depression fields

ЗБС активно применяется на месторождениях Соликамской депрессии. В 2010–2018 гг. в добывающих скважинах проведено 165 операций, из которых основная часть – 80 % – в терригенных тульских и бобриковских залежах (табл. 1), из них 30 % приходится на Уньвинское месторождение.

Таблица 1. Показатели ЗБС на месторождениях Соликамской депрессии

Table 1. Sidetracking in wells of the Solikamskaya depression fields

| Показатель Parameter | Тип колл. Coll.type | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
|---|----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Количество ЗБС, скв. Sidetracking number, wells | карб. терр. carb. terr. | 13 | 27 | 32 | 19 | 19 | 7 | 8 | 4 | 2 |
| | карб. carb. | 3 | 1 | 7 | 4 | 2 | 9 | 4 | 4 | 0 |
| Средний начальный дебит скважины по нефти после ЗБС, т/сут Average initial oil production rate after sidetracking, t/day | терр. terr. | 23,8 | 17,7 | 15,1 | 14,4 | 8,2 | 9,8 | 8,5 | 5,6 | 11,5 |
| | карб. carb. | 13,6 | 15,4 | 9,9 | 32,6 | 13,4 | 10,8 | 7,2 | 8,2 | 0 |

Все ЗБС проводились на фонде скважин, выведенных из эксплуатации.

Начальный дебит по нефти после ЗБС с каждым годом снижается. Так, в 2010 г. в терригенных коллекторах начальный дебит составлял в среднем 23,8 т/сут, к 2017 г. снизился до 5,6 т/сут.

Задача прогноза начального дебита скважины является актуальной, ей посвящен ряд работ [14–20]. Так, в [14] предложено уравнение для прогноза дебитов новых скважин на территории Предуральского краевого прогиба:

$$q_{\text{ж0}} = A + A_p P_{\text{пл}} / P_{\text{нас}} + A_\mu \mu_h + A_h h + A_{Kn} K_n + A_k k + A_j / \mu_n, \quad (1)$$

где $A, A_p, A_\mu, A_h, A_{Kn}, A_k, A_j$ – коэффициенты, определяемые для конкретных геолого-технологических условий разработки (табл. 2); $P_{\text{пл}}$ – пластовое давление, МПа; $P_{\text{нас}}$ – давление насыщения, МПа; μ_n – динамическая вязкость нефти, мПа·с; h – толщина пласта, м; K_n – пористость, %; k – проницаемость, мкм².

Таблица 2. Коэффициенты уравнения (1) по отложениям

Table 2. Coefficients of equation (1) by deposits

| Отложения/Deposits | A | A_p | A_μ | A_h | A_{Kn}/A_ϕ | A_k | A_j |
|---|------|-------|---------|-------|-----------------|-------|-------|
| Башкирские/Bashkir | 2,2 | 11,8 | -2,5 | 0,57 | 0,83 | 0 | 0 |
| Визейские/Visean | 25,6 | 0 | 0 | 0,8 | 0 | 0 | 0,016 |
| Турнейско-фаменские Tournaishian and Famennian | 16 | 0 | -2,4 | 1,79 | 0,83 | 0 | 0 |

Однако ввиду существенного роста выработки запасов нефти и увеличения доли трудноизвлекаемых запасов с 2011 г. значения начальных фактических дебитов значительно ниже рассчитываемых по уравнению (1).

При обосновании расположения бокового ствола в интервале продуктивного пласта одним из основных показателей дальнейшей эффективности работы скважины является начальный коэффициент продуктивности скважины по нефти ($K_{\text{прод.н}}$). В работе для прогнозной оценки $K_{\text{прод.н}}$ использованы данные по ЗБС в бобриковских терригенных отложениях 40 скважин Уньвинского месторождения. Исходной информацией послужили результаты геофизических и гидродинамических исследований, значения фильтрационно-емкостных свойств пласта, физико-химические свойства нефти, а также геолого-технологические показатели, по которым формируется исходная выборка.

При анализе исследовались следующие параметры: толщина пласта $h_{\text{пл}}$, м; эффективная нефтенасыщенная толщина $h_{\text{эфф.н}}$, м; количество пропластков $N_{\text{пропл}}$, шт; пористость K_n , %; проницаемость по ГИС $k_{\text{пр ГИС}}$, мкм²; проницаемость по ГДИ $k_{\text{пр ГДИ}}$, мкм²; плотность запасов $\rho_{\text{зап}}$, т/м³; текущая нефтенасыщенность K_n , %; динамическая вязкость μ , мПа·с; плотность ρ , т/м³; зенитный угол бокового ствола в интервале продуктивного пласта α , град; длина ствола скважины в пласте $L_{\text{ст}}$, м; расстояние до забоя ближайшей нагнетательной скважины L_n , м; расстояние до забоя ближайшей добывающей скважины L_d , м.

Для всех параметров исходной выборки построены корреляционные поля (табл. 3) [21–23]. Анализ данных полей в совокупности со значениями коэффициента корреляции (r) показал степень влияния параметров на коэффициент продуктивности скважин по нефти.

Таблица 3. Корреляционная матрица для выборки бобриковских терригенных отложений Уньвинского месторождения

Table 3. Correlation matrix for a sample of Bobrikovskiy terrigenous deposits of the Unvinsko field

| Параметр Parameter | $h_{\text{эфф.н}}$ $h_{\text{ef.thick}}$ | $k_{\text{пр ГДИ}}$ k_{WT} | $\rho_{\text{зап}}$ ρ_{res} | ... | K_n S_o | α | $L_{\text{ст}}$ L_b | $K_{\text{прод.н}}$ J_o |
|---|---|--|--|-----|----------------|---------------|--------------------------|------------------------------|
| $h_{\text{эфф.н}}$ $h_{\text{ef.thick}}$ | 1,00 | 0,19 0,247 | 0,54 0,000 | ... | 0,37 0,017 | 0,40 0,010 | 0,38 0,017 | 0,50 0,001 |
| $k_{\text{пр ГДИ}}$ k_{WT} | | 1,00 | 0,34 0,034 | ... | 0,39 0,014 | 0,63 0,000 | 0,61 0,000 | 0,72 0,000 |
| $\rho_{\text{зап}}$ ρ_{res} | | | 1,00 | ... | 0,56 0,000 | 0,40 0,010 | 0,47 0,002 | 0,54 0,000 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| K_n S_o | | | | ... | 1,00 | 0,66 0,000 | 0,60 0,000 | 0,71 0,000 |
| α | | | | ... | | 1,00 | 0,77 0,000 | 0,75 0,000 |
| $L_{\text{ст}}$ L_b | | | | ... | | | 1,00 | 0,73 0,000 |

Примечание: в числителе – значение коэффициента корреляции r , в знаменателе – уровень статистической значимости p . При $p < 0,05$ (выделены красным цветом) корреляционные связи статистически значимы.

Note: the correlation coefficient r value is in the numerator, the statistical significance level p is in the denominator. The correlation relationships are statistically significant at $p < 0,05$ (in red).

Из корреляционной матрицы видно наличие статистически значимых корреляционных связей

коэффициента продуктивности с параметрами α , L_{ct} , $k_{pr\text{ГДИ}}$, K_n , ρ_{san} , $h_{ef,n}$, K_{Φ} , $k_{pr\text{ГИС}}$, L_n , h_{pl} , L_d .

По всем значениям выборки с использованием пошагового регрессионного анализа строится многомерное уравнение регрессии, в котором в качестве зависимой переменной использовалось значение коэффициента продуктивности $K_{prod,n}$, а независимыми – остальные параметры выборки:

$$\begin{aligned} K_{prod,n}^M = & -24,17 + 0,04\alpha + 31,24k_{pr\text{ГДИ}} + \\ & + 0,25K_n + 0,38h_{ef,n} - 0,35N_{prop} + 0,11L_{ct}, \end{aligned} \quad (2)$$

при $R^2=0,84$, $F=27,83$, $F_k=6,33$, где R^2 – коэффициент детерминации, F – критерий Фишера, F_k – критическое значение критерия Фишера.

Формирование очередности включения показателей в уравнение регрессии происходило в последовательности, приведенной в (2). На первом шаге формирования уравнения был включен показатель α при $r=0,75$, $R^2=0,56$. С добавлением следующего показателя на каждом последующем шаге коэффициент детерминации R^2 увеличивался – 0,67; 0,75; 0,8; 0,82; 0,84.

Сопоставление фактических ($K_{prod,n}^{\Phi}$) и рассчитанных по уравнению (2) модельных значений коэффициента продуктивности ($K_{prod,n}^M$) свидетельствует о значительном разбросе данных (рис. 2). Абсолютная погрешность Δ_{abs}^{sp} составила 1,4 т/(сут·МПа), относительная Δ_{oth}^{sp} – 23,6 %.

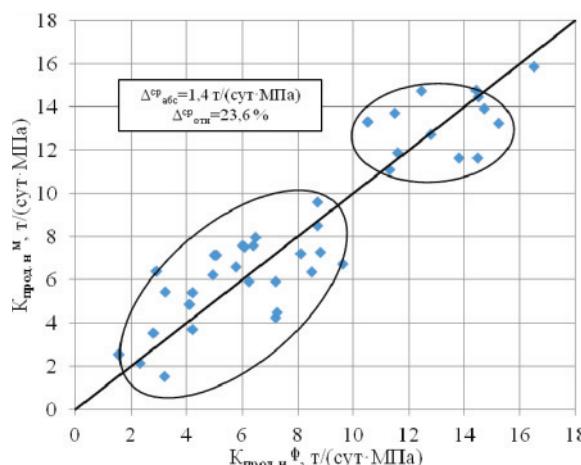


Рис. 2. Сопоставление модельных и фактических значений $K_{prod,n}$

Fig. 2. Comparison of oil productivity ratio model and actual values

Анализ корреляционного поля показал, что оно состоит из двух подчастей (классов). При значениях $K_{prod,n} < 10$ модельные и фактические значения коэффициента продуктивности достаточно хорошо контролируют друг друга, при $K_{prod,n} \geq 10$ наблюдается существенный разброс данных: значения $K_{prod,n}^{\Phi}$ находятся в диапазоне 10–17 т/(сут·МПа), тогда как модельные – только в интервале 11–15. Исходя из этого сделано предположение о том, что на значения $K_{prod,n}$ в пределах этих классов действуют различные показатели. Для подтверждения этого предположения выполнен пошаговый регрессионный анализ выборки следующим образом:

- данные выборки были ранжированы по значению $K_{prod,n}$ от минимального к максимальному;
- построено многомерное уравнение регрессии по первым трем ($N=3$) значениям выборки (табл. 4). Затем уравнение строится по первым четырем ($N=4$) значениям, по первым пяти ($N=5$) значениям и так далее до $N=40$.

Использование данного подхода позволило проследить в динамике влияние показателей на $K_{prod,n}$ во всем диапазоне его изменения.

Таблица 4. Коэффициенты в многомерных уравнениях при пошаговом регрессионном анализе данных бобриковских терригенных отложений Уньвинского месторождения

Table 4. Coefficients in multidimensional equations with step-by-step regression analysis of data from Bobrikovskie terrigenous deposits of the Unvinskoye field

| N | Свободный член Absolute term | $h_{ef,n}$ | $k_{pr\text{ГДИ}}$ | ρ_{san} | \dots | K_n | α | L_{ct} | R^2 |
|-----|---------------------------------|------------|--------------------|--------------|---------|-------|----------|----------|-------------|
| 3 | -8,873 | | | | ... | | | | 0,456 0,994 |
| 4 | 0,121 | 0,008 | | | ... | | | | 1 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 37 | -168,47 | 0,318 | 30,99 | 1,375 | ... | 0,238 | 0,14 | 0,821 | |
| 38 | -169,031 | 0,308 | 30,63 | 1,382 | ... | 0,233 | 0,148 | 0,835 | |
| 39 | -23,8 | 0,384 | 30,32 | | ... | 0,248 | 0,045 | 0,099 | 0,818 |
| 40 | -24,17 | 0,38 | 31,24 | | ... | 0,25 | 0,04 | 0,11 | 0,835 |

Изменение коэффициента детерминации R^2 полученных уравнений представлено на рис. 3. До $N=27$ значения R^2 имеют тенденцию к уменьшению и при этом характеризуются значительным разбросом. Для $N>28$ наблюдается последовательное, без резких скачков, увеличение значений R^2 (рис. 3, а), при этом анализ построенных многомерных уравнений регрессии показывает, что формирование моделей начинается с технологических показателей α , L_{ct} , тогда как до $N=27$ на первых местах преобладали геологические показатели. Таким образом, предположение о необходимости разделения исходной выборки на два класса по значению $K_{prod,n}=10$ подтвердилось (рис. 2, 3, б).

Для каждого класса в отдельности получены следующие регрессионные уравнения:

- 1 класс ($K_{prod,n} < 10$)
$$\begin{aligned} K_{prod,n}^M = & -18,777 + 0,233K_n + 0,136N_{prop} + \\ & + 18,149k_{pr\text{ГДИ}} + 0,994\rho_{san}, \\ R^2 = & 0,53, F = 6,27, F_k = 4,22; \end{aligned} \quad (3)$$

- 2 класс ($K_{prod,n} \geq 10$)
$$\begin{aligned} K_{prod,n}^M = & 18,057 - 0,013L_d + 0,057K_{1n} + 0,186L_{ct} - \\ & - 0,177h_{pl} - 2,868\rho_{san} + 3,579\mu - 0,127\alpha, \\ R^2 = & 0,88, F = 8,01, F_k = 7,51. \end{aligned} \quad (4)$$

Сопоставление модельных значений коэффициента продуктивности, рассчитанных по уравнениям (3) и (4) для выделенных классов, с фактическими значениями, свидетельствует об увеличении точности прогноза коэффициента продуктивности (рис. 4).

Абсолютная погрешность составила 0,9 т/(сут·МПа), относительная – 17,3 %. Полу-

ченное по сравнению с уравнением (2) (рис. 2) снижение абсолютной (на 0,5 т/(сут·МПа)) и относительной (на 6,3 %) погрешностей говорит о возможности выделения классов в исходной выборке данных при применении пошагового регрессионного анализа для прогноза коэффициента продуктивности по нефти скважин с боковыми стволами.

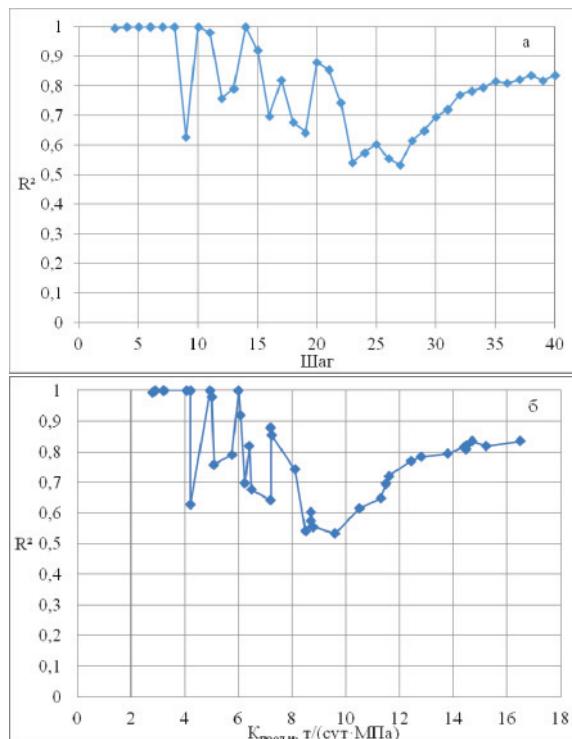


Рис. 3. Изменение коэффициента детерминации: а) по шагам, б) по коэффициенту продуктивности

Fig. 3. Change in determination coefficient: a) step-by-step, б) by the productivity index

Таким образом, разработанная методика позволяет оценивать значения коэффициента продуктивности по нефти скважин с боковым стволом на основе результатов геофизических и гидродинамических исследований скважин, значений фильтрационно-емкостных свойств пласта, физико-химических свойств нефти, а также геолого-технологических показателей с помощью пошагового регрессионного анализа и разделения исходных данных значений коэффициента продуктивности по нефти на классы на основе его зависимости от коэффициента детерминации.

значений коэффициента продуктивности по нефти на классы на основе его зависимости от коэффициента детерминации.

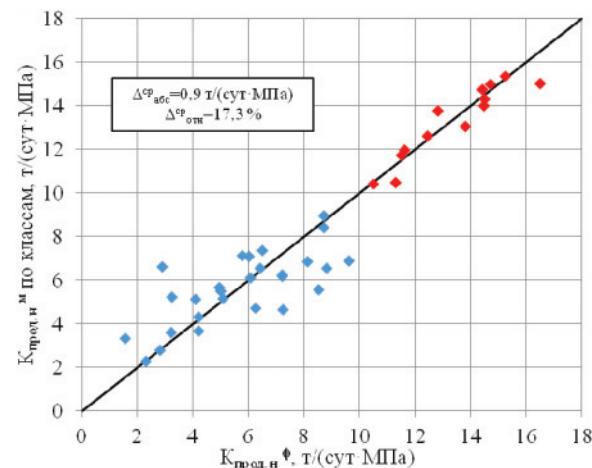


Рис. 4. Сопоставление фактических и модельных значений коэффициента продуктивности по нефти, рассчитанных по уравнениям (3) и (4) для выделенных классов (синий – 1 класс, красный – 2 класс)

Fig. 4. Comparison of the oil productivity index actual and model values, calculated according to equations (3) and (4) for the selected classes (blue – 1st class, red – 2nd class)

Таким образом, разработанная методика позволяет оценивать значения коэффициента продуктивности по нефти скважин с боковым стволом на основе результатов геофизических и гидродинамических исследований скважин, значений фильтрационно-емкостных свойств пласта, физико-химических свойств нефти, а также геолого-технологических показателей с помощью пошагового регрессионного анализа и разделения исходных данных значений коэффициента продуктивности по нефти на классы на основе его зависимости от коэффициента детерминации.

Установлено, что при значениях $K_{\text{прод.н}} \geq 10$ основное влияние на коэффициент продуктивности по нефти скважин с боковыми стволами оказывают технологические показатели – зенитный угол α бокового ствола в интервале продуктивного пласта и длина $L_{\text{ст}}$ ствола скважины в пласте, что говорит о возможности регулирования процесса добычи запасов нефти изменением этих параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анализ проведения геолого-технических мероприятий по увеличению продуктивности добывающих скважин на нефтяных месторождениях Пермского края / П.Ю. Илюшин, Р.М. Рахимзянов, Д.Ю. Соловьев, И.Ю. Кольчев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2015. – № 15. – С. 81–89. DOI: 10.15593/2224-9923/2015.15.9.
- Щербаков А.А., Турбаков М.С., Дворецкая Р.В. Анализ эффективности применения методов увеличения нефтеотдачи месторождений Пермского Прикамья с трудноизвлекаемыми запасами // Нефтяное хозяйство. – 2012. – № 12. – С. 97–99.
- Turbakov M., Shcherbakov A. Determination of enhanced oil recovery candidate fields in the Volga-Ural oil and gas region territory // Energies. – 2015. – № 8. – P. 20–23.
- Кузьмина Т.А., Миронов А.Д. Опыт разработки низкопродуктивных объектов с применением технологии многозабойного бурения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2012. – № 3. – С. 89–93.
- Стрижов И.Н., Кочкин С.Е., Ибатуллин Т.Р. Влияние методов интенсификации притока на динамику добычи нефти // Нефтяное хозяйство. – 2003. – № 9. – С. 65–67.
- Дмитриев А.Ю., Чубик П.С., Абакумов Л.Б. Методика оценки возможности и целесообразности восстановления бездействующих скважин // Нефтяное хозяйство. – 2012. – № 12. – С. 97–99.

- ющих скважин бурением из них дополнительных стволов // Нефтегазопромысловое дело. – 1997. – № 10–11. – С. 13–17.
7. Котенев Ю.А., Андреев В.Е., Ягафаров Ю.Н. Геология и разработка нефтяных месторождений Ишимбайского Приуралья с применением методов увеличения нефтеотдачи. – Уфа: УГНТУ, 2004. – 252 с.
8. Крянев Д.Ю., Жданов С.А. Применение методов увеличения нефтеотдачи пластов в России и за рубежом. Опыт и перспективы // Бурение и нефть. – 2011. – № 2. – С. 22–26.
9. Хисамутдинов Н.И., Тахаутдинов Ш.Ф., Телин А.Г. Проблемы извлечения остаточной нефти физико-химическими методами: монография. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2001. – 181 с.
10. Economides M.J., Nolte K.G. Reservoir Stimulation. – Eglewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1989. – 430 p.
11. Smith C.R. Mechanics of secondary oil recovery. – Reinhold Publ. Corp., 1966. – 504 p.
12. Исследование воздействия кислотогенерирующего состава на керны продуктивных отложений Куюмбинского лицензионного участка / Г.П. Хижняк, А.М. Амиров, Е.А. Гладких, В.А. Колесов, А.Г. Захарян, А.Е. Чикин, Р. Харрис // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 3. – С. 31–35.
13. Bahadori A. Fundamentals of Enhanced Oil and Gas Recovery from Conventional and Unconventional Reservoirs. – US: Gulf Professional Publishing, 2018. – 536 p.
14. Поплыгин В.В., Галкин С.В. Прогнозная экспресс-оценка показателей разработки нефтяных залежей // Нефтяное хозяйство. – 2011. – № 3. – С. 112–115.
15. Кривошеков С.Н., Рябоконь Е.П. Статистическое моделирование дебита скважины с боковым стволом на месторождениях Верхнего Прикамья // Нефтепромысловое дело. – 2017. – № 11. – С. 39–44.
16. Галкин В.И., Репина В.А. Разработка статистической модели прогнозирования дебита нефти на примере пласта Тл2а одного из месторождений башкирского свода // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 11. – С. 111–113.
17. Репина В.А. Прогнозирование значения дебита нефти по данным трехмерной фильтрационной модели // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. – 2014. – № 1. – С. 63–66.
18. Azadeh A., Pourebrahim Ahvazi M., Motevali Haghighi S. An intelligent algorithm for determination and optimization of productivity factors in upstream oil projects // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – № 167. – С. 375–395. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.03.099.
19. Productivity evaluation and influential factor analysis for Sarvak reservoir in South Azadegan oil field, Iran / H. Liu, R. Guo, J. Dong, L. Liu, Y. Liu, Y. Yi // Petroleum Exploration and Development. – 2013. – V. 40. – № 5. – P. 627–634. DOI: 10.1016/S1876-3804(13)60082-8.
20. New methodology to quantify productivity of vertical wells in naturally fractured solution gas drive reservoirs with dual porosity and dual permeability / Z. Tariq, S. Al-Nuaim, A. Abdulraheem, M.R. Khan // Society of Petroleum Engineers – PAPG/SPE Pakistan Section Annual Technical Conference and Exhibition. – 2016. – С. 139–155.
21. Ott R.L., Longnecker M. An Introduction to Statistical Methods and Data Analysis. 7 ed. – Boston: Cengage Learning, 2016. – 1296 p.
22. Montgomery D.C., Peck E.A. Introduction to linear regression analysis. – New York: John Wiley & Sons, 1982. – 504 p.
23. Afifi A., May S., Clark V.A. Practical multivariate analysis. 5 ed. – UK: Chapman and Hall/CRC, 2011. – 537 p.

Поступила 26.02.2019 г.

Информация об авторах

Щербаков А.А., старший преподаватель кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Хижняк Г.П., доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Галкин В.И., доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой геологии нефти и газа Пермского национального исследовательского политехнического университета.

UDC 622.276.346

PREDICTION OF SIDETRACK WELLS PRODUCTIVITY INDEX (ON EXAMPLE OF THE UNVINSKOE FIELD)

Aleksandr A. Shcherbakov¹,
aleksandr.a.shcherbakov@gmail.com

Grigory P. Khizhnyak¹,
xgp@mail.ru

Vladislav I. Galkin¹,
vgalkin@pstu.ru

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

Relevance. Many fields of the Solikamskaya depression of the Perm Krai are characterized by the final stage of development and have a high oil recovery rate, close to the project, high water cut, declining technical and economic production indicators. To achieve the project indicators at the fields, various methods of enhanced oil recovery are used. The analysis of their application shows that the greatest average increase in the initial oil production is achieved by sidetracking. When justifying the location of the sidetrack wellbore in the interval of the productive layer, one of the main indicators of further well performance is the initial oil productivity index of the well.

The main aim of the research is to develop a methodology for predicting the oil productivity index for sidetracks, taking into account geological and technological characteristics of the object.

Objects: Bobrikovskie terrigenous deposits of the Unvinskoye field of the Solikamskaya depression.

Methods: correlation and regression analysis based on the data of geophysical and hydrodynamic well studies, reservoir properties, physical and chemical oil properties, as well as geological and technological indicators.

Results. The developed method allows estimating the values of oil productivity index for sidetracks based on the results of geophysical and hydrodynamic well studies, reservoir properties, physical and chemical oil properties, as well as geological and technological indicators using step-by-step regression analysis and oil productivity data values division into classes based on its dependence on the coefficient of determination. It was established that for $J \geq 10$ values the technological indicators – zenith angle α of the sidetrack in the reservoir interval and the length L_b of the borehole in the reservoir – affect most of all the oil productivity, which indicates the possibility of controlling oil recovery by changing these parameters.

Key words:

Sidetracks, enhanced oil recovery, oil productivity factor, correlation analysis, regression analysis.

REFERENCES

1. Ilyushin P.Yu., Rakhimzyanov R.M., Solovev D.Yu., Kolychev Y.Iu. Analysis of well intervention aimed at oil production enhancement in the Perm krai's fields. *Bulletin of PNRPU. Geology, Oil & Gas Engineering & Mining*, 2015, no. 15, pp. 81–89. In Rus. DOI: 10.15593/2224-9923/2015.15.9
2. Shcherbakov A.A., Turbakov M.S., Dvoretskas R.V. Effectiveness analysis of enhanced oil recovery methods implementation for hard-to-recover oil reserves of Pern Kama region. *Oil industry*, 2012, no. 12, pp. 97–99. In Rus.
3. Turbakov M., Shcherbakov A. Determination of enhanced oil recovery candidate fields in the Volga-Ural oil and gas region territory. *Energies*, 2015, no. 8, pp. 20–23.
4. Kuzmina T.A., Mironov A.D. Experience in the development of objects unproductive using technology multi-hole drilling. *Bulletin of PNRPU. Geology. Oil and Gas Engineering and Mining*, 2012, no. 3, pp. 89–93. In Rus.
5. Strizhov I.N., Kochkin S.E., Ibatullin T.R. Inflow intensification methods effect on performance of an oil recovery. *Oil industry*, 2003, no. 9, pp. 65–67. In Rus.
6. Dmitriev A.Yu., Chubik P.S., Abakumov L.B. Methods for assessing the feasibility of restoring inactive wells by drilling additional boreholes from them. *Oilfield engineering*, 1997, no. 10–11, pp. 13–17. In Rus.
7. Kotenev Yu.A., Andreev V.E., Yagafarov Yu.N. *Geologiya i razrabotka neftyanykh mestorozhdeniy Ishimbayskogo Priuralya s primenением metodov uvelicheniya nefteotdachi* [Geology and development of oil fields of the Ishimbay Priuralie using enhanced oil recovery methods]. Ufa, UGNTU Publ., 2004. 252 p.
8. Kryanev D., Zhdanov S. Use of advanced reservoir recovery methods in Russia and abroad. *Drilling and Oil*, 2011, no. 2, pp. 22–26. In Rus.
9. Khisamutdinov N.I., Takhautdinov Sh.F., Telin A.G. *Problemy izvlecheniya ostatochnoy nefti fiziko-khimicheskimi metodami: monografiya* [Problems of residual oil recovery by physicochemical methods: monograph]. Moscow, LLC VNIOENG Publ., 2001. 181 p.
10. Economides M.J., Nolte K.G. *Reservoir Stimulation*. Eglewood Cliffs, Prentice Hall, 1989. 430 p.
11. Smith C.R. *Mechanics of secondary oil recovery*. Reinhold Publ. Corp., 1966. 504 p.
12. Khizhnyak G.P., Amirov A.M., Gladkikh E.A., Kolesov V.A., Zakharyan A.G., Chikin A.E., Kharris R. Study of the acid-generating composition effect on the cores of the productive deposits of the Kuyumbinskiy license area. *Oil industry*, 2015, no. 3, pp. 31–35. In Rus.
13. Bahadori A. *Fundamentals of Enhanced Oil and Gas Recovery from Conventional and Unconventional Reservoirs*. US, Gulf Professional Publ., 2018. 536 p.
14. Poplygin V.V., Galkin S.V. Forecast quick evaluation of the indices of the development of the oil deposits. *Oil industry*, 2011, no. 3, pp. 112–115. In Rus.
15. Krivoshchekov S.N., Ryabokon E.P. Statistical modeling of the flow-rate of a sidetracked well at the fields of the Upper Kama region. *Oilfield engineering*, 2017, no. 11, pp. 39–44. In Rus.
16. Galkin V.I., Repina V.A. Development of the statistical forecasting model of oil production rate (case study of oil reservoir formation Tl2a one of the oil field of the Bashkir arch). *Oil industry*, 2015, no. 11, pp. 111–113. In Rus.

17. Repina V.A. Prognozirovanie znacheniya debita nefti po dannym trekhmernoy filtratsionnoy modeli [Forecasting the value of oil flow rate according to the three-dimensional filtration model]. *Problems of development of hydrocarbon and ore mineral deposits*, 2014, no. 1, pp. 63–66. In Rus.
18. Azadeh A., Pourebrahim Ahvazi M., Motevali Haghghi S. An intelligent algorithm for determination and optimization of productivity factors in upstream oil projects. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, no. 167, pp. 375–395. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.03.099
19. Liu H., Guo R., Dong J., Liu L., Liu Y., Yi Y. Productivity evaluation and influential factor analysis for Sarvak reservoir in South Azadegan oil field, Iran. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, vol. 40, no. 5, pp. 627–634. DOI: 10.1016/S1876-3804(13)60082-8.
20. Tariq Z., Al-Nuaim S., Abdulraheem A., Khan M.R. New methodology to quantify productivity of vertical wells in naturally fractured solution gas drive reservoirs with dual porosity and dual permeability. *Society of Petroleum Engineers – PAPG/SPE Pakistan Section Annual Technical Conference and Exhibition*, 2016. pp. 139–155.
21. Ott R.L., Longnecker M. *An Introduction to Statistical Methods and Data Analysis*. 7 ed. Boston, Cengage Learning, 2016. 1296 p.
22. Montgomery D.C., Peck E.A. *Introduction to linear regression analysis*. New York, John Wiley & Sons Publ., 1982. 504 p.
23. Afifi A., May S., Clark V.A. *Practical multivariate analysis*. 5 ed. UK, Chapman and Hall/CRC Publ., 2011. 537 p.

Received: 26 February 2019.

Information about the authors

Aleksandr A. Shcherbakov, senior lecturer, Perm National Research Polytechnic University.

Grigory P. Khizhnyak, Dr. Sc., associate professor, head of the department of oil and gas technologies, Perm National Research Polytechnic University.

Vladislav I. Galkin, Dr. Sc., professor, head of the department of oil and gas geology, Perm National Research Polytechnic University.

УДК 629.78:630.52:587/588:528.88

ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДИЙ ПО ПЛОЩАДЯМ НА ПРИМЕРЕ ТОМСКОГО РАЙОНА

Пасько Ольга Анатольевна¹,

oap@tpu.ru

Захарченко Александр Викторович²,

zakh.al.vic@yandex.ru

Поспелова Екатерина Викторовна¹,

kate_frol@mail.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² Институт проблем освоения Севера Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Тюменского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук,

625026, г. Тюмень, ул. Малыгина, 86.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью оптимизации размеров земельных участков для совершенствования организации использования земель сельскохозяйственного назначения в зоне рискованного земледелия.

Цель: анализ сложившегося пространственного распределения площадей хозяйств и земельных участков сельскохозяйственно-го назначения для выбора путей оптимизации их использования.

Объекты: 3309 земельных участков 25 хозяйств, расположенных в Томском районе на юго-востоке Томской области.

Методы: аналитический, картографический, корреляционный, регрессионный и кластерный виды анализа.

Результаты. Проведен анализ выборки, имеющей 3309 значений площадей земельных участков из 25 хозяйств Томского района, и определены ее основные статистические показатели. Полимодальность выборки и ее несоответствие нормальному распределению определили непараметрические методы анализа. На основе иерархического кластерного анализа предложена таксономия (общие размеры участка, масштаб, стандартизация по близости к региональному стандарту, относительные отклонения от стандарта, относительные размеры и принадлежность к хозяйству) и классификация площадей земельных участков сельскохозяйственного назначения. Установлено, что площади, непригодные и малопригодные (закустаренные) для ведения сельского хозяйства, составляют 44 % от общего количества. Кормовыми культурами занята почти половина земель, садовыми и овощными 7 и 2 % соответственно. Доминируют серые лесные почвы (45 % участков), 14 % участков покрывают светло-серые лесные почвы, а 11 % – все остальные типы. Дерновые глубоко-подзолистые, дерново-глеевые и дерново-глеевые почвы на землях сельскохозяйственного назначения встречаются редко. Положение земельных участков в ландшафте в основном элювиальное (72 % участков) и трансэлювиальное (21 % участков). Менее сотни участков характеризуются супераквальными почвами. Показано, что в Томском районе такие факторы, как тип почв, бонитет почв, положение в ландшафте и хозяйственное назначение не оказывают влияния на размеры площади сельскохозяйственного участка. Установлена линейная зависимость между средней площадью земельного участка и числом участков в хозяйстве, что указывает на их стандартизацию внутри хозяйства. Проведена классификация земельных участков по их площадным размерам и принадлежности к регламенту.

Ключевые слова:

Земельный участок, сельскохозяйственное назначение, площадь, тип почв, балл бонитета, положение в ландшафте, кластерный анализ, корреляционный анализ, классификация, недостатки землепользования.

Введение

Эффективность агропромышленного комплекса во многом определяется соответствием его потенциала особенностям природных условий [1] и применяемым технологиям [2]. Игнорирование этого положения привело в России к недоиспользованию геополитического преимущества и обострению «земельного вопроса» [3]. Необходима программа, содержащая инновационные подходы, и финансовые возможности для ее реализации и реагирования на экономические, социальные, экологические, климатические и технологические вызовы [4]. Приоритетами становятся минимизация живого и овеществленного труда, снижение ущерба природно-территориальному комплексу и достижение максимума производства высококачественной продукции [5]. Особое внимание отводится сбору объек-

тивной информации об индивидуальных особенностях земельных участков, включающих бонитет почв, специализацию хозяйств и др. [6], что позволяет формировать базу для оценки земли и проводить рациональную земельную политику [7].

На эффективность использования земельных участков влияют их размеры, форма, внутренняя структура, засоренность [8] и т. д. В мировой практике неправильная форма расценивается как недостаток территориального местоположения, затрудняющий эффективное использование рабочей силы, земельных, технических и других средств производства [9]. Для ее оптимизации необходимы: устранение недостатков землевладений и землепользований путем внесения изменений в их форму для приближения к эталону, в качестве которого выбран квадрат.

В последние десятилетия в странах бывшего СССР происходит отчетливое разукрупнение сельскохозяйственных (далее – с.-х.) организаций путем создания мелких фермерских хозяйств, с.-х. предприятий, организации садоводческих товариществ. Небольшие хозяйства менее инерционны, чем крупные, однако на мелкоземелье возможны трудности с новыми технологиями, техническими средствами, посевным и посадочным материалом. Оптимум площади земельных участков имеет региональную специфику. К примеру, в США 157 тысяч крупных ферм (8 %) дают 76 % продукции и 78 % прибыли [10]. В Латвии около 80 % участков (более 30 % общей площади) имеют площади менее 2 га. Аналогичная ситуация в странах Азии и Европы [11, 12]. В Центрально-Черноземной зоне России оптимум размера земельного участка составляет 10–14 тысяч гектаров [13].

Интегральной характеристикой плодородия почв является балл их бонитета [14]. В Томской области основная информация о нем содержится в материалах IV-го тура оценки земель, проведенного в 80-е гг. и актуализированная в ходе последующих тур. Балл бонитета был учтен в шкале среднерайонной нормы бесплатной передачи земли в собственность граждан [15]. В Томском районе размер доли составлял 7,9 га всех сельхозугодий (пашни сенокосы, пастбища), т. ч. 5,6 га пашни. В дальнейшем собственниками доли были сданы в аренду либо проданы, что привело к стихийному изменению площадей обрабатываемых земельных участков. Ситуация обострилась тем, что район, как и вся Томская область, относится к зоне рискованного земледелия [16] и площади земель, пригодных для производства продукции растениеводства, ограничены. Это диктует необходимость расценивать сельхозугодья «в качестве неприкоснутого жизненно наиболее важного земельного фонда» [17] и иметь о них полную объективную информацию, которая на данный момент отсутствует.

Цель исследования – анализ сложившегося распределения площадей земельных участков сельскохозяйственного назначения для выбора путей оптимизации их использования.

Объекты и методы исследований

Томский район занимает площадь 10,024 км². Расположен на юге Томской области в подтаежной зоне и частично в северной лесостепи (сосново-мелколиственная подзона) (рис. 1) [18, 19]. Площадь земель с.-х. назначения – 21 % от территории района, население – 75154 человека (занятых преимущественно в сельскохозяйственном производстве).

Климат континентально-циклонический с продолжительной сухой снежной зимой и теплым коротким летом и с непродолжительными переходными и безморозными периодами. Характерны чередования циклонических и антициклонических типов погоды в течение всего года; значительные суточные и годовые амплитуды температуры воздуха; возвратные весенние и раннеосенние заморозки, ведущие к значительному сокращению вегетационного периода сельскохозяйственных культур ярового сева.

Зональными почвами являются дерново-подзолистые супесчаные, серые лесные, в поймах рек – аллювиальные и аллювиально-болотные [19]. Они представлены по гранулометрическому составу преимущественно глинисто-пылеватым материалом, переходящим в более легкий суглинок. Почвам Томского района свойственны проблемы: переувлажнение, заплывание, низкая аэрируемость и позднее физическое созревание почв; низкое содержание гумуса и малая мощность гумусового горизонта, повышенная кислотность почв; биогенное загрязнение агроценозов.

Основными природными рисками с.-х. производства являются: неустойчивость погодных условий, дефицит тепла, короткий вегетационный пе-

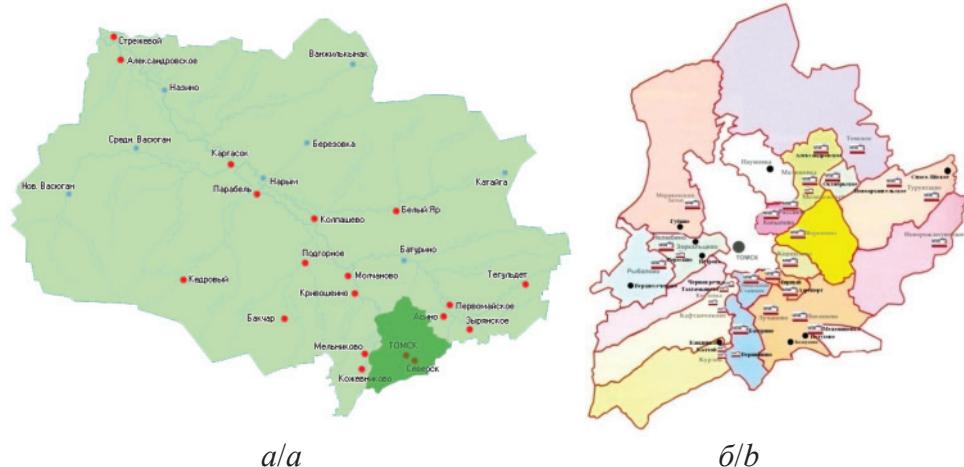


Рис. 1. Расположение Томского района на карте Томской области (а) [20] и его основные населенные пункты (б) [21]

Fig. 1. Location of the Tomsk district on the map of the Tomsk region (a) [20] and its main settlements (b) [21]

риод, высокий уровень заболоченности, закустаренности и залесённости территорий; основные социальные риски: слабое развитие коммуникаций, инфраструктуры и дефицит специалистов.

Среди сельхозугодий Томского района площадью 174,375 тыс. га преобладают пашни (107,782 тыс. га), сенокосы (37,47 тыс. га) и пастбища (24,203 тыс. га). Имеются многолетние насаждения (4,855 тыс. га) и залежь (0,065 тыс. га) [17]. Общее число земельных участков – 3931. Для изучения взяты 3309 участков 25 хозяйств, имеющие непосредственное отношение к с.-х. производству.

Землеустроительные данные взяты с портала Росреестра [22] и с Публичной кадастровой карты [23]. Ландшафтные данные определены по материалам сервиса Google Earth [24]. Часть информации о состоянии и использовании земель получена от Федерального государственного бюджетного учреждения «Станция агрохимической службы «Томская», за что авторы выражают благодарность ее директору д.с.-х.н. И.Б. Сорокину. Для анализа выбраны наиболее стабильные показатели почв, которые не подвержены сильной сезонной и территориальной динамике, но существенно влияют на плодородие и урожайность с.-х. культур (использование земель, балл бонитета почвы и положение в ландшафте).

Исходная информация потребовала унификации данных и увязки производственных названий с классификацией почв (1977 г.). Во-первых, из общей базы данных были исключены земельные участки под зданиями и сооружениями. Во-вторых, данные о типах почв были переклассифицированы с учетом «Шкалы оценки почв Томской области» [25]. Каждому земельному участку присвоен балл бонитета почв в зависимости от почвенной разновидности: максимальный – наиболее ценным темно-серым лесным (78 баллов) и серым лесным почвам (62 баллов); промежуточный – светло-серым лесным глееватым, дерново-глеевым и дерново-глееватым, а также дерновым мелкоподзолистым (43–48 баллов); минимальный – дерновым глубоко- и неглубокоподзолистым (40 баллов) и дерновым глубоко-подзолистым (24 балла) почвам (табл. 1).

Положение земельных участков в ландшафтной системе координат охарактеризовано согласно ГОСТ 17.8.1.02–88 [26] и классификации М.А. Глазовской [27]. Положение земельных участков на выровненных водораздельных поверхностях оценено как элювиальное (автономное), на склонах – супераквальное, а также субаквальное – в поймах рек.

С точки зрения целевого использования земель произведена перегруппировка полученных данных с помощью шкалы с.-х. ценности почв [19]. Все почвы сведены в три агропроизводственные группы:

- 1) всестороннего хозяйственного использования, пригодные для развития полеводства и овоще-

водства (при необходимости – для кормопроизводства);

- 2) кормовых угодий (в полеводстве и овощеводстве – после специальных мероприятий);
- 3) мелиоративного фонда, пригодные для с.-х. производства только после проведения мелиорации.

Таблица 1. Тип почв Томского района в сравнении с полученными данными и утвержденной шкалой оценки почв Томской области

Table 1. Soil type of Tomsk district in comparison with the obtained data and the approved scale of soil assessment of Tomsk region

| Данные агрохимической службы Agrochemical service data | Наименование/Name | Шкала оценки почв Томской области [25] Rating scale of soils in Tomsk region [25] | Балл бонитета Bonus score |
|---|--|--|---------------------------------|
| | | | |
| Дерново-сильные подзолистые Sod-strongly podzolic | Дерновая глубоко-подзолистая Deep sod-podzolic | 24 | |
| Глубоко-дерновые неглубоко оподзоленные Deep-shallow podzolized sod | Дерновая глубоко- и неглубокоподзолистая Sod deep and shallow podzolic | 40 | |
| Дерново-оподзоленные Sod-podzolic | | | |
| Подзолисто-окультуренные Podzolic-cultivated | | | |
| Глубоко-дерновые Deep sod | Дерновая мелкоподзолистая Sod finely podzolic | 43 | |
| Глеево-дерновые Gley-turf | Дерново-глеевая Sod-gley | 46 | |
| Светло-серые лесные Light-grey forest | Светло-серая лесная глееватая Light-grey forest gley | 48 | |
| Дерново-средне окультуренные Sod-medium cultivated | Дерново-глееватые Sod-gleyish | 56 | |
| Комплексные почвы луговые Complex meadow soils | | | |
| Серые лесные Grey forest | Серая лесная Grey forest | 62 | |
| Болотно-аллювиальные Marsh-alluvial | | | |
| Пойменно-дерновые Floodplain-turf | Аллювиальная дерновая Alluvial sod | 65 | |
| Пойменно-луговые Floodplain-meadow | | | |
| Темно-серая лесные Dark gray forest | Темно-серая лесная Dark gray forest | 78 | |

Исходная агрохимическая база данных использования земель содержала разнородные характеристики: состояние поля – засорено, закустарено; вид использования – пашня, сенокосы, пастбища; культуры – кукуруза, рожь, пшеница т. д.; неиспользуемые для выращивания с.-х. продукции – лес, болото, строения. Встречались группы земельных участков с видом использования «картофель», «свекла», «морковь», «капуста», в то время как имелась группа – «овощи», тематически объединяющая их. Соответственно, в новой классификации

кации все имеющиеся виды овощных культур и картофеля объединены в группу «овощи»; виды использования земельных участков «малина», «кусты», «сад» – в группу «садовые».

После устранения указанных несоответствий комплекс показателей был скорректирован следующим образом. Земельные участки исходной базы данных были объединены в 6 групп:

- 1) занятые строениями, сооружениями;
- 2) непригодные для ведения сельского хозяйства (лес, болото);
- 3) малопригодные для ведения сельского хозяйства (закустаренные и засоренные);
- 4) используемые для выращивания продукции кормового значения (злаковые – пшеница, кукуруза, рожь, ячмень; бобовые – горох, соя; овес, многолетние травы, зябь, пар, рапс);
- 5) используемые для выращивания садовых культур (малина, кусты);
- 6) занятые овощными культурами (капуста, морковь, свекла) и картофелем.

Группа 1 из статистического анализа была удалена ввиду ее исключительно технического назначения. С учетом корректировки предложен новый подход группирования земель с.-х. назначения по видам использования (табл. 2). Исходная база данных преобразована в таблицу, включающую 3309 земельных участков и 25 хозяйств Томского района со следующими показателями: наименование хозяйства, к которому он относится; площадь; тип почвы; балл бонитета и вид использования, и подготовлена для проведения статистического анализа.

Для оценки формы земельных участков произведен расчет коэффициентов их компактности как частного от деления периметров участков на периметры квадратов той же площади [28]. Определено максимальное и минимальное расстояния от земельных участков до населенных пунктов и производственных центров, поскольку от них зависят транспортные расходы и потери времени на холостые переезды. Взяты расстояния между двумя наиболее и наименее удаленными пунктами (по дорогам с учетом естественных препятствий). Аналогично рассчитаны максимальные расстояния от границ земельных участков до центральных усадеб в административных центрах района и до города Томска. Использован картографический материал ресурсов Google Earth и Публичной кадастровой карты Томской области.

Статистическая обработка данных проведена в пакете «Statistica» и программе «Excel» (корреляционный, регрессионный, детерминантный и кластерный виды анализов). Построена эмпирическая кривая распределения площадей земельных участков. Проверена гипотеза о нормальном распределении генеральной совокупности значений при уровне значимости $p < 0,05$. Проведен анализ характера распределения значений площадей [29]. Установлены максимальные и минимальные значения.

Таблица 2. Виды использования земельных участков Томского района, распределенные по группам

Table 2. Types of land use in the Tomsk district divided into groups

| Виды использования земельных участков/Types of land use | | | | |
|--|--|-----------------|-------------------------------------|---|
| По с.-х. ценности According to agricultural value [19] | | | Предлагаемые Proposed | |
| База данных обследования земель Land survey database | Агропроизводст- венное значение почв Soil production value | Группа Group | Использование Use | |
| Кусты/Shrubs | BXH*/CEP* | I | Садовые Garden | 5 |
| Болото Swamp | Болотные и торфяные Marsh and peat | III | Непригодные Unfit | 2 |
| Горох/Pea | BXH*/CEP* | I | Кормовые Fodder | 4 |
| Закустарено Bushed | H/d** | H/d No data | Малопригод- ные of little use | 3 |
| Засорено Littered | No data | | | |
| Зерносмесь Grain mixture | Кормового значения Feed value | II | Кормовые Fodder | 4 |
| Зябь/Chaff | | | | |
| Капуста Cabbage | BXH*/CEP* | I | Овощные Vegetable | 6 |
| Картофель Potatoes | | | | |
| Кукуруза Corn | Кормового значения Feed value | II | Кормовые Fodder | 4 |
| Лес/Forest | H/d No data | | Непригодные Unfit | 2 |
| Малина Raspberries | BXH*/CEP* | I | Садовые Garden | 5 |
| Многолетние травы Perennial herbs | Кормового значения Feed value | II | Кормовые Fodder | 4 |
| Морковь Carrot | BXH*/CEP* | | Овощные Vegetable | 6 |
| Овес Oats | Кормового значения Feed value | II | Кормовые Fodder | 4 |
| Овощи Vegetables | BXH*/CEP* | I | Овощные Vegetable | 6 |
| Пар/Steam | | | Кормовые Fodder | 4 |
| Пашня Arable land | | | | |
| Поле засорено Field littered | H/d No data | | Малопригодные of little use | 3 |
| Пшеница Wheat | BXH*/CEP* | I | Кормовые Fodder | 4 |
| Рапс/Rape | Кормового значения Feed value | II | | |
| Рожь/Rye | BXH*/CEP* | I | Садовые Garden | 5 |
| Сад/Garden | | | | |
| Свекла/Beet | | | Овощные Vegetable | 6 |
| Соя/Soy | | | Кормовые Fodder | 4 |
| Строения Buildings | H/d No data | | Строения Buildings | 1 |
| Ячмень Barley | BXH*/CEP* | I | Кормовые Fodder | 4 |

*Примечание: * – всестороннего хозяйственного назначения; ** – нет данных.

* Note: * – uniform economic purpose; ** – no data available.

Таблица 3. Территориальные характеристики 25 хозяйств Томского района: площадь (га), число участков (ед.), число участков на га (ед./га), средняя площадь участка (га)
Table 3. Territorial characteristics of 25 farms of Tomsk region: area (ha), number of plots (units), number of plots per hectare (units/ha), average area of the plot (ha)

| Хозяйство Farm | Площадь, га Area, ha | Число участков на одно хозяйство (ед.) Number of plots per farm (unit) | Число участков на 1 га, ед. Number of plots per 1 ha, units | Средняя площадь участка, га* Average plot size, ha* |
|---|-------------------------|---|--|--|
| Батуриńskое Baturinskoe | 1506,4 | 81 | 0,054 | 18,60±0,57 |
| Вершининское Vershininskoe | 4247,7 | 212 | 0,050 | 20,04±0,33 |
| Калтай/Caltay | 2958,7 | 148 | 0,050 | 19,99±0,36 |
| Кандинская птицефабрика Kandinskaya poultry farm | 734,6 | 38 | 0,052 | 19,33±0,60 |
| Каftанчиково Kaftanchikovo | 2958,0 | 157 | 0,053 | 18,84±0,41 |
| Межениновское Mezheninovskoe | 2536,5 | 138 | 0,054 | 18,38±0,50 |
| ОПХ/OPKh | 9885,5 | 502 | 0,051 | 19,69±0,20 |
| ГСК/GSK | 240,4 | 19 | 0,079 | 12,65±0,20 |
| Кисловское Kislovskoe | 1793,1 | 91 | 0,051 | 19,70±0,60 |
| Петрово/Petrovo | 1801,1 | 92 | 0,051 | 19,58±0,60 |
| Степановский Stepanovsky | 1233,9 | 64 | 0,052 | 19,28±0,70 |
| Томская птицефабрика Tomsk poultry farm | 1669,7 | 95 | 0,057 | 17,58±0,70 |
| Томь/Tom | 1709,2 | 90 | 0,053 | 18,99±0,70 |
| Туганская птицефабрика Tugansk poultry farm | 620,3 | 32 | 0,052 | 19,38±1,06 |
| Кузовлевский Kuzovlevsky | 969,6 | 192 | 0,198 | 5,05±0,60 |
| Октябрь/Oktyabr | 6185,0 | 321 | 0,052 | 19,27±0,25 |
| Родина/Rodina | 4167,1 | 214 | 0,051 | 19,47±0,29 |
| Рыболовское Rybalovskoe | 8388,8 | 419 | 0,050 | 20,02±0,22 |
| Пойменный Roumenny | 1521,2 | 81 | 0,053 | 18,78±0,43 |
| Томский/Tomsk | 7436,3 | 401 | 0,054 | 18,54±0,30 |
| Сибиряк Sibirjak | 3538,4 | 190 | 0,054 | 18,62±0,46 |
| Победа/Pobeda | 8307,2 | 102 | 0,0123 | 81,44±2,3 |
| Новоархангельское Novoarkhangelskoe | 2849,0 | 36 | 0,0126 | 79,14±2,5 |
| Заря/Zarya | 9162,6 | 134 | 0,0146 | 68,38±2,4 |
| Мазаловский Mazalovsky | 6218,9 | 82 | 0,0132 | 75,84±2,2 |
| Среднее значение Average value | 3705±2959 | 157±127 | 0,053±0,034 | 20,4±6,2 |
| Доверительный интервал Confidence interval | 1233,89 | 53,29 | 0,014 | 9,18 |
| Максимум Maximum | 9885,5 | 502 | 0,198 | 81,4 |
| Минимум Minimum | 240,4 | 19 | 0,0123 | 5,05 |

*Примечание: при $p < 0,001$.

* Note: at $p < 0,001$.

С помощью иерархического кластерного анализа пакета Orange выявлены границы сложившихся групп земельных участков («Малые», «Средние» и «Крупные»). Выделено пять категорий – части, разделы, подразделы, группы, подгруппы. Части выборки разделены по масштабу («Гигантские», «Очень крупные», «Крупные», «Средние», «Малые», «Очень малые» и «Сверхмалые»). С помощью критерия стандартизации земельные участки охарактеризованы как «Нестандартизованные», «Средне стандартизованные», «Стандартизованные», «Стандартные». Подразделы разделены по степени отклонения от стандарта («Меньше», «Стандарт», «Больше»); группы внутри них – по размерам («Большой», «Средний», «Мелкий»); подгруппы – по принадлежности к хозяйствам.

Результаты и обсуждение

Земельные участки хозяйствующих субъектов Томского района разнообразны по площади и составу и назначению (табл. 3). Площади хозяйств различаются в разы и даже в десятки раз. К примеру, площадь ОПХ равна 9885,5 га, ГСК – 240,4 га (в 41 раз меньше) (табл. 4). Минимальные площади хозяйств ГСК (12,65 га) и «Кузовлевский» (5,05 га) объяснимы их использованием для научно-исследовательских целей и выращивания растений мелкоделячным способом. Максимальные площади занимает фирма «ОПХ» (9885,5 га), а также с.-х. производственные кооперативы «Рыболовский» (8388,8 га) и «Томский» (7436,3 га).

В одном хозяйстве в среднем находятся 157,24 участка; максимум – 502, минимум – 19 (в 26 раз меньше). На 1 га земель приходится 0,053 ед./га; максимум – 0,198 ед./га, минимум – 0,012 ед./га (в 16 раз меньше). Средняя площадь земельного участка в Томском районе составляет 20,4±6,2 при $p < 0,001$ га; максимум – 81,4 га, минимум – 19 га (в 4 раза меньше). В некоторых хозяйствах (Победа, Новоархангельское, Заря, Мазаловский) участки относительно велики (выше среднего значения в 3–4 раза). Выборка по размерам хозяйств, числу участков, площадных размеров участков крайне неоднородна. Максимальные относительные различия отмечены для площади отдельных хозяйств, минимальные – для площади участков.

Статистический анализ площадей земельных участков выявил бимодальный вид их распределения. Максимальное накопление частот отмечено в интервале 18–22 га (52 % общего количества частот), среднее – в интервале 4–6 га (5 % частот) при фоновом значении 1–2 % (рис. 2).

Среди земельных участков с.-х. назначения в Томском районе преобладают участки площадью 15–20 га (43 %, т. е. 1420 участков). Примерно треть участков имеет площадь в 20–25 га (около 30 %, 980 участков), около 14 % – 10–15 га (460 участков). На гистограмме распределения площадей участков выделены три выборки:

1) «Малые», от 0 до <10;



Рис. 2. Гистограмма распределения площадей участков земель с.-х. назначения в Томском районе разделена по размерам на три выборки: 1) «Малые»; 2) «Средние»; 3) «Крупные» земельные участки

Fig. 2. Histogram of area distribution of agricultural land in the Tomsk district is divided by size into three samples: 1) «Small»; 2) «Medium»; 3) «Large» lands

- 2) «Средние», от 10 до <30;
- 3) «Крупные», от 30 до 38,5.

Они существенно (в 5–6 раз) отличаются по числу случаев. Для более детального анализа каждая выборка рассмотрена отдельно (рис. 3). В выборках 1 и 2 наблюдаются интервалы со значительным накоплением частот. В выборке 3 они отсутствуют. Выборка 1 (314 участка) существенно отличается от нормального распределения – коэффициент Колмогорова–Смирнова незначителен и не достоверен $p>0,1$, коэффициент вариации – 22,4 %. Выборка 2 содержит 3136 участков. Среднее значение их площади составляет $19,65\pm 0,29$ га, стандартное отклонение – 4,07 га, коэффициент вариации – 20,7 %. Выборка 3 (40 участков) бимодальна. Среднее значение площади участка равно $32,6\pm 1,6$ га, медиана – 32 га, стандартное отклонение – 2,4 га, коэффициент вариации – 7,53 %.

Коэффициент асимметрии (третий, центральный момент отклонения от средней нормального распределения случайной величины) отражает форму сдвига выборки право/лево относительно среднего значения, эксцесс (четвертый центральный момент) характеризует сжатие относительно

формы нормального распределения (верх/низ). У выборки 1 (рис. 3, а) имеется сдвиг влево и положительный коэффициент асимметрии (0,16); у выборки 2 (рис. 3, б) – незначительный отрицательный (-0,07); у выборки 3 – очень высокий коэффициент сдвига влево (0,78). Эксцесс для всех выборок очень высок, для третьей выборки он отрицателен и не достоверен, так как ошибка больше абсолютного значения ($-0,43<0,73$). Исходя из анализа значений асимметрии и эксцесса, можно сделать выводы, что выборки существенно отклоняются по форме от нормального распределения случайной величины; имеют малый по величине и недостоверный коэффициент Колмогорова–Смирнова; их распределение нельзя считать нормальным. Выборка 3 (рис. 3, в) бимодальна. Следовательно, выборки площадей земельных участков хозяйств Томского района носят неслучайный характер и сопровождаются накоплением в отдельных интервалах, поэтому для оценки влияния факторов использованы непараметрические критерии.

Проведен иерархический анализ земельных участков Томского района по площади хозяйства путем их разбиения на кластеры и получения в каждом кластере расчетных площадей (рис. 4). По площадным размерам выделяются две части выборки – «Крупные» и «Средние и малые». В часть «Крупные» входят подчасти: «Гигантские» (голубой цвет), «Очень крупные» (красный) и «Крупные (желтый)». Первая часть полностью не стандартизована. Граница между частями проходит по величине площади больше 24,8 га. Вторая часть выборки содержит площади меньше или равные этому значению и разделяется на две подчасти: «Средние», «Малые» (бурый цвет). Подчасть «Средние» дробится на три раздела: «Мало стандартизованные» (голубой) – 10,1–13,8 га, «Средне стандартизованные» (фиолетовый) 13,9–17,8 га и «Стандартные» (желтый) – 19,5–24,8 га. Подчасть «Малые» делится на две группы: «Стандартизованные» – 2,3–5,6 га и «Нестандартизованные больше стандарта» – 5,7–7,8 га, а также «Нестандартизованные меньше стандарта» – 2,3–0,99 га. Подразделы делятся

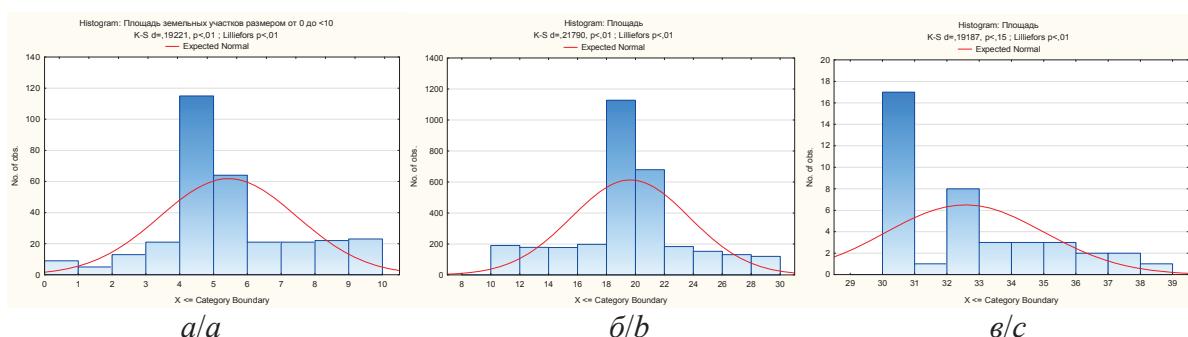


Рис. 3. Гистограммы распределения размеров площади (га) участков земель с.-х. назначения выборок: а) от 0 до <10 («Малые»); б) от 10 до <30 («Средние»); в) более 30 га («Крупные»)

Fig. 3. Histograms of size distribution of the area (ha) of agricultural land plots samples: a) from 0 to <10 («Small»); b) from 10 to <30 («Medium»); c) more than 30 hectares («Large»)

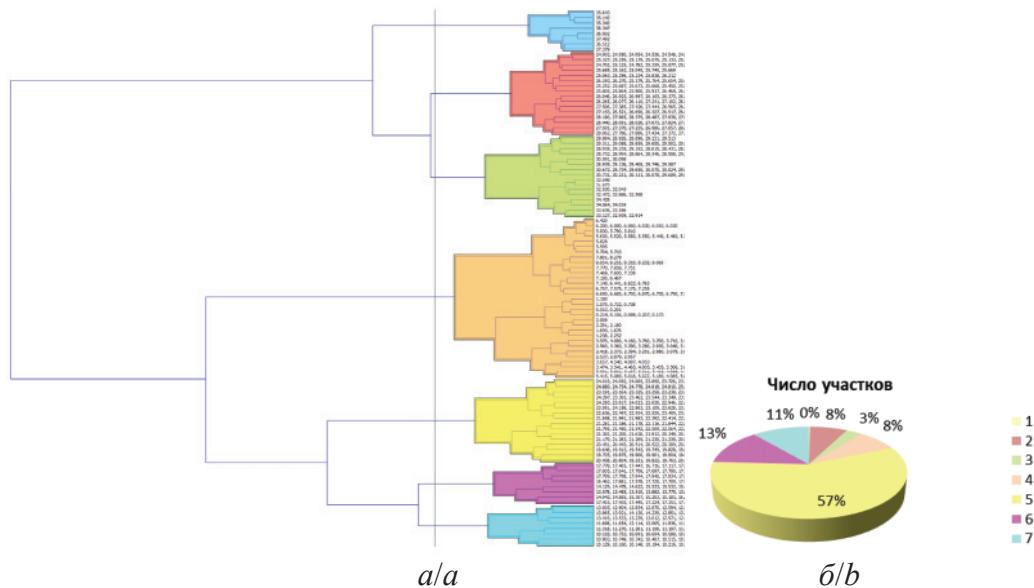


Рис. 4. Применение иерархического кластерного анализа для классификации основных размерных групп земельных участков Томского района (а) и распределение числа земельных участков в хозяйствах Томского района по группам (га): 1) 35,643–37,378; 2) 24,90–27,32; 3) 29,98–32,91; 4) 1,10–8,07; 5) 19,90–24,90; 6) 13,46–17,78; 7) 13,01–10,20 (б)

Fig. 4. Application of hierarchical cluster analysis for classification of the main size groups of land plots of the Tomsk district (a) and distribution of the number of land plots in the farms of Tomsk district in groups (ha): 1) 35,643–37,378; 2) 24,90–27,32; 3) 29,98–32,91; 4) 1,10–8,07; 5) 19,90–24,90; 6) 13,46–17,78; 7) 13,01–10,20 (b)

на группы. Внутри подраздела «Стандартные» выделяются 3 группы – «MS-S» (19,82–20,51 га), «М» – 19,82–22,6 га, «Л» – 22,6–24,9 га. Подгруппы делятся по принадлежности к хозяйству. Например, к стандартным «М» относятся ОПХ, Кафтанчиково, Сибиряк, Кандинская.

Согласно предложенной классификации, выделены семь неравнозначных групп по площадям земельных участков. Группа 1 содержит 8 участков, группа 2 – 257, группа 3 – 106, группа 4 – 275, группа 5 – 2002, группа 6 – 451, группа 7 – 391 участок. Явно выделяется наименьшая группа 1 с размерами участков 35,14–38,34 га и наибольшая группа 5 с размерами участков 18,45–24,56 га. Диапазон изменчивости площади земельного участка составляет в группе 1 – 35,643–37,378 га; в группе 2 – 24,90–27,32 га; в группе 3 – 29,98–32,91 га; в группе 4 – 1,10–8,07 га; в группе 5 19,90–24,90 га; в группе 6 – 13,46–17,78 га в группе 7 – 13,01–10,20 га. Около 60 % земельных участков имеют площади от 19,90–24,90 га. Близкое представительство имеют группы 6 и 7 (11 и 13 % соответственно). Доля остальных групп не превышает 10 % (рис. 4).

Выявление факторов, влияющих на площадь земельных участков в Томском районе. В качестве факторов, потенциально оказывающих влияние на площади земельных участков, рассмотрены:

- хозяйственное назначение;
- бонитет почв;
- тип почв (серые лесные, аллювиальные, светро-серые, аллювиальные луговые, темно-серые, дерново-глубокоподзолистые, дерново-глеевые, дерново-глеевые);

• положение земельных участков в ландшафте (элювиальное, трансэлювиальное, субаквальное (пойма)).

Для оценки влияния факторов на площади земельных участков использован критерий Краскела–Уоллиса для независимых выборок (выборки независимы, т. к. оценка бонитета почв проводится независимо от определения границ земельного участка на основе карты почвенных типов, агрохимических анализов и продуктивности полей).

Установлено, что распределение числа наблюдений по факторам неравномерно и не относится к нормальному распределению случайных величин.

Хозяйственное назначение. Анализ средних значений площадей земельных участков, различных по хозяйственному назначению, выявил их достаточно близкие значения от 18,12 га (группа 2) до 20,44 га (группа 6). Отмечена тенденция роста площади с ростом балла хозяйственного назначения. Выявлены достаточно близкие показатели площадей земельных участков, различных по хозяйственному назначению от 18,12 га (группа 2) до 20,44 га (группа 6). Отмечена тенденция роста площади участка с ростом балла хозяйственного назначения, однако различия между группами недостоверны ввиду больших величин среднеквадратичных отклонений от 12 до 17.

К группе 2 отнесены 1211 участков (35 %), к группе 3 – 235 участков (9 %), к группе 4 – 1723 участка (49 %), к группе 5 – 240 участков (7 %), к группе 6 – 81 участок (2 %). Таким образом, в Томском районе площади непригодные и мало пригодные (закустаренные) для ведения сельского хозяйства составляют 44 %, кормовыми

культурами занята почти половина земель, садовыми и овощными – 7 и 2 % соответственно.

Бонитет почв. Практически не встречаются объекты в интервале бонитета почв 32–40 и 56–64 баллов. Максимально распространены почвы с баллом бонитета, равным 64–72 (1640 участков). Среднее положение в рейтинге занимают почвы с баллом 48–56 (600 участков). В 2,0–2,5 раза меньше участков с почвами, имеющими баллы 24–32 и 40–48 (по 280 участков) и 72–80 (320 участков). Средние значения площади с различными баллами бонитета укладываются в диапазон 15–20 га, но среднеквадратичные отклонения существенно различаются. В целом для выборки они составляют до двух единиц, за исключением участков с баллами бонитета 43 (± 15), 44 (± 12) и 65 (± 10) единицы.

Тип почв. Среди почв земельных участков с.-х. назначения Томского района доминируют серые лесные. Ими характеризуются 1600 участков (45 %). Светло-серые лесные глееватые почвы обнаружены на примерно 500 участках (14 %). Аллювиальные дерновые, темно-серые лесные, дерновые глубоко- и неглубокоподзолистые, дерновые мелкоподзолистые свойственны менее чем 400 участкам (11 %). Дерновые глубоко-подзолистые, дерново-глеевые и дерново-глееватые почвы практически отсутствуют.

Положение земельных участков с.-х. назначения в ландшафте в основном элювиальное (2500 участков, 72 %) и трансэлювиальное (750 участков, 21 %). Менее сотни участков находятся в супераквальном положении. Очень редко встречаются участки в субаквальном типе ландшафта. Выше отмечено ненормальное распределение земельных участков по площади, поэтому далее использованы непараметрические виды анализа. Для оценки влияния на площадь земельных участков типа и бонитета почв, их положения в ландшафте, а также хозяйственного назначения участков использован критерий Краскела–Уоллиса для независимых выборок. Ранее путем анализа иерархической структуры площади нарушенных участков показано, что размеры неоднородностей почвенного покрова обусловлены внешними и внутренними факторами, а размеры земельных участков являются инструментом для выявления природных и антропогенных факторов [30].

Площади участков земель с.-х. назначения независимы от природных факторов, поэтому объяснить выявленные различия можно лишь осознанным либо спонтанным регулированием со стороны землепользователей. В Томском районе даже при отсутствии нормативов 73 % земельных участков имеют площади 15–25 га, при том, что 20 га оптимальны с точки зрения эффективного применения технических средств [6, 28]. Следовательно, есть основания говорить об обусловленности размеров земельных участков технико-экономическими причинами.

Удаленность хозяйства. Проведен анализ зависимости площади хозяйства от числа земельных участков, минимального и максимального расстояния до границ земельного участка (по дорогам) от центральной усадьбы в административном центре района и от г. Томска. Результаты измерений по публичной кадастровой карте приведены в табл. 4.

Таблица 4. Удаленность хозяйств Томского района от административных центров и города Томска

Table 4. Remoteness of the farms of the Tomsk district from the administrative centers and the city of Tomsk

| Наименование хозяйства Farm name | Расстояние от, км/Distance from, km | | | | |
|---|---|--------------|-----------------|--------------|--|
| | административного центра administrative center | | Томска Tomsk | | |
| | Мин. min | Макс. max | Мин. min | Макс. max | |
| Батуриńskое Baturinskoe | 0,1 | 6,4 | 16,3 | 25,2 | Батурино Baturino |
| Вершининское Vershininskoe | 2,4 | 10,9 | 27,6 | 36,1 | |
| ГСК/GSK | 2,3 | 3,6 | 4,8 | 6,1 | Зональная Станция Zonalnaya village |
| Калтай/Caltai | 1,6 | 16,7 | 15,7 | 30,8 | Калтай/Kaltay |
| Кандинская птицефабрика Kandinskaya poultry farm | 3,8 | 9,5 | 5,8 | 11,8 | Копылово Kopylovo |
| Каftанчиково Kaftanchikovo | 0,6 | 13,0 | 16,1 | 27,4 | Каftанчиково Kaftanchikovo |
| Кисловское Kislovskoe | 9,6 | 24,8 | 7,8 | 23,7 | |
| Межениновское Mezheninovskoe | 0,8 | 13,4 | 21,5 | 34,1 | Межениновка Mezheninovka |
| Октябрь Oktyabr | 1,5 | 16,2 | 15,6 | 30,5 | Зоркальцево Zorkaltsevo |
| ОПХ/ОРН | 3,1 | 21,8 | 17,1 | 35,8 | Богашево Bogashevo |
| Петрово Petrovo | 6,9 | 13,3 | 6,8 | 18,8 | Северск Seversk |
| Пойменный Roumenny | 12,2 | 15,7 | 34,8 | 38,3 | Зоркальцево Zorkaltsevo |
| Родина/Rodina | 3,1 | 16,6 | 20,5 | 34,1 | |
| Рыболовское Rybalovskoe | 2,0 | 18,1 | 26,1 | 53,7 | Рыболово Rybalovo |
| Сибиряк Sibiryak | 0,3 | 11,1 | 24,9 | 40,1 | Наумовка Naumovka |
| Степановский Stepanovsky | 1,6 | 7,1 | 4,3 | 9,8 | Зональная Станция Zonalnaya village |
| Томская птицефабрика Tomsk poultry farm | 5,6 | 15,2 | 18,8 | 24,6 | Воронино Voronino |
| Томский/Tomsk | 1,5 | 16,2 | 33,2 | 47,3 | Октябрьское Oktyabrskoe |
| Томь/Tom | 5,6 | 9,6 | 3,2 | 12 | Каftанчиково Kaftanchikovo |
| Туганская птицефабрика Tugansk poultry farm | 4,4 | 7,6 | 12,3 | 14,6 | Копылово Kopylovo |
| Кузовлевский Kuzovlevsky | 4,1 | 7,0 | 17,8 | 20,6 | |

Расстояния от административного центра до границы земельного участка очень разнородны. Они составляют: минимальное 0,1–12,2 км; максимальное 3,6–24,8 км. Расстояние от г. Томска изменяется в пределах: минимальное 3,2–33,2 км; максимальное 6,1–53,7 км. Выявлена достоверная корреляционная зависимость средней силы: положительная между площадью земельного участка и ее периметром ($r=0,7$ при $p<0,05$) и отрицательная между площадью земельного участка и коэффициентом компактности ($r=-0,7$ при $p<0,05$).

Площадь хозяйства практически прямо пропорциональна числу участков, входящих в ее состав ($r=0,903$ при $p<0,05$). Регрессионная модель, описывающая эту зависимость, представлена уравнением (1):

$$y=0,0488x+16,746, \text{ при } R^2=0,949. \quad (1)$$

Высокое значение коэффициента детерминации указывает на близость математической модели к эмпирическим наблюдениям; линейная взаимосвязь – на стандартизацию площадей участков в хозяйстве, после выдела которых остаются нестандартные участки.

Анализ данных статистики показывает, что на максимальном расстоянии от населенного пункта и административного центра находятся более крупные земельные участки ($r=0,797$ и $0,741150$ соответственно), на минимальном – более мелкие ($r=0,521$). Максимальная удаленность земельного участка от усадьбы влияет на его площадь согласно уравнению (2)

$$y=0,003x+16,26, \text{ при } R^2=0,572. \quad (2)$$

Минимальное расстояние до административного центра на площадь участков не влияет. Максимальное и минимальное расстояние до границы участка коррелируют с высокой степенью ($0,894$). При близких в среднем площадях участков «шаг» между ними у разных участков близок по величине.

Тенденция зависимости между площадью земельного участка и его удаленностью от усадьбы описывается уравнением (3):

$$y=0,001x+11,48, \text{ при } R^2=0,234. \quad (3)$$

Низкое значение коэффициента детерминации свидетельствует о слабой связи анализируемых процессов.

Таким образом, показано, что в Томском районе природные факторы не оказывают достоверно значимого влияния на размеры земельных участков с.-х. назначения, хотя при выделении долей бонитет почв был учтен. Несмотря на стихийный характер перераспределения земельных участков в ходе проведения аграрной реформы, в целом сохраняется оптимальный размер подавляющего большинства земельных участков в Томском районе. Это позволяет обеспечивать территориальную равномерность выхода с.-х. продукции отдельных культур, планирование близких объемов полевых работ по годам смены севооборота, контроль и учет хода их выполнения. Обращает на себя внимание недооценка плодородия и ландшафтных особенностей почв в вопросах планирования размеров поля.

Возможность уменьшения размеров земельных участков на более плодородных почвах и увеличение на менее плодородных в Томском районе не практикуется.

Выводы

- Выборка из значений 3309 земельных участков и 25 хозяйств Томского района имеет ненормальное бимодальное распределение случайной величины.
- Использование иерархического кластерного анализа позволило создать классификацию размеров площадей земельных участков с.-х. назначения с таксонами: «Общие размеры участка», «Масштаб», «Стандартизация по близости к региональному стандарту», «Относительные отклонения от стандарта», «Относительные размеры» и «Принадлежность к хозяйству». Классификация позволяет идентифицировать группы участков с наименьшими различиями в размерах площади.
- Выявлена сложившаяся структура распределения земельных участков по площади: «Малые» (0–10 га), «Средние» (10–30 га), «Крупные» (30–38,5 га). В каждой части выделяются интервалы с очень высоким относительным накоплением частот: малые – 4–6 га, средние – 19–22 га, крупные (бимодальны с интервалом 30–31 и 32–33 га).
- В Томском районе такие природные факторы, как тип почв, бонитет почв, положение в ландшафте, хозяйственное назначение и использование, не оказывают влияние на площадь с.-х. участка.
- Между средней площадью земельного участка и числом участков в хозяйстве существует линейная взаимосвязь.
- Диапазон изменчивости площадей хозяйств составляет 240,4–9885,5 га. На одно хозяйство в среднем приходится 157,24 участка; максимум – 502, минимум – 19 (в 26 раз меньше). На 1 га земель приходится 0,053 ед./га; максимум – 0,198 ед./га, минимум – 0,012 ед./га (в 16 раз меньше). Средняя площадь земельного участка в Томском районе равна 20,4 га. Преобладают участки площадью 15–20 га (43 %), около 30 % имеет площадь в 20–25 га, около 14 % – 10–15 га. Около 60 % земельных участков имеют площади от 19,90–24,90 га.
- Площади непригодные и мало пригодные (закустаренные) для ведения сельского хозяйства составляют 44 %. Кормовыми культурами занята почти половина земель, садовыми и овошными – 7 и 2 % соответственно. Доминируют серые лесные почвы (45 % участков), 14 % участков покрыты светло-серыми лесными глееватыми почвами, по 11 % – аллювиальные дерновые, темно-серые лесные, дерновые глубоко- и неглубокоподзолистые, дерновые мелкоподзолистые. Дерновые глубоко-подзолистые, дерново-глеевые и дерново-глееватые

- почвы практически отсутствуют. Положение земельных участков с.-х. назначения в ландшафте в основном элювиальное (72 % участков) и трансэлювиальное (21 % участков). Менее сотни участков находятся в супераквальном положении. Участки в субаквальных типах элементарного ландшафта практически не встречаются.
8. Расстояния от административного центра до границы земельного участка изменяются в пределах: минимальное 0,1–12,2 км; максимальное 3,6–24,8 км. Расстояние от г. Томска изме-

няется в пределах: минимальное 3,2–33,2 км; максимальное 6,1–53,7 км. Выявлена достоверная корреляционная зависимость средней силы: положительная между площадью земельного участка и ее периметром и отрицательная между площадью земельного участка и коэффициентом компактности. Площадь хозяйства практически прямо пропорциональная числу участков, входящих в ее состав.

Работа выполнена в Томском политехническом университете в рамках программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Pomelov A.S., Pasko O.A., Baranova A.V. Comparative analysis of land management in the world // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – V. 27: Problems of Geology and Subsurface Development. – 4 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/283847949_Comparative_analysis_of_land_management_in_the_world (дата обращения 10.12.2018).
- Александрова Э.А., Гергаулова Р.М., Шрамко Г.А., Князева Т.В. Способ обработки озимой пшеницы: пат. № 2349071 РФ; опубл. 20.03.2009. Бюл. № 8.
- Комов Н.В., Чешев А.С. Комплексный подход к планированию и рациональному использованию земельных ресурсов // Экономика и экология территориальных образований. – 2018. – Т. 2. – № 1. – С. 6–21.
- European Commission. Structure and Dynamics of EU Farms: Changes, Trends and Policy Relevance // EU Agricultural Economics Briefs. – Brussels, 2013. – № 9. – 120 p.
- Sikk K., Maasikamäe S. Impact of agricultural and holding size on the land fragmentation // Research for rural development. – 2015. – V. 2. – P. 301–305.
- Бочаров М. О минимальных размерах земель с.-х. назначения // Земельный вопрос. – 2005. – № 6 (45). – С. 77–82.
- Land resource planning for sustainable land management food and agriculture organization of the united nations Rome / F. Nachtergaele, P. Groppe, R. Biancalani, S. Zelaya, S.Z. Bonilla, T. Fettsi, R. Rosalud, T. Hammond, S. Schlingloff. – Rome: Food and agriculture organization of the United nations, 2017. – 68 p.
- The issues of weed infestation with environmentally hazardous plants and methods of their control / V.L. Bogdanov, T.S. Posternak, O.A. Pasko, V.F. Kovayzin // IOP Conference series. Earth and Environmental Science. – Tomsk, 11 October 2016. – V. 43. – Iss. 1. – P. 2–7.
- Pokk M., Maasikamäe S., Sikk K. Aspects of arable land plots fragmentation in Tartu county Rural Development and Challenges Establishing Sustainable Land Use in Eastern European Countries // Land Use Policy. – 2012. – V. 30. – P. 703–710.
- Bigelow D., Borchers A., Hubbs T. US Farmland Ownership, Tenure, and Transfer 2016. URL: https://www.ers.usda.gov/webdocs/publications/74672/60297_eib161_summary.pdf?v=0 (дата обращения 10.12.2018).
- Horjan O. Iuridiceskie problem consolidatii zemeli v Respublike Moldova // Proc. of International Scientific Methodical Conference Baltic Surveying 2010. – Vilnius: Lithuanian University of Agriculture, 2010. – P. 145–150.
- Szabo L., Grznár M. Agriculture in the EU and position of the Slovak Republic // Agricultural Economics. – 2015. – V. 61. – P. 493–501.
- Павлова Т.И. Оптимизация почвенного плодородия в агрокосистемах. – Саратов: ФГБОУ ВПО «СГАУ», 2014. – 35 с.
- О земельных отношениях в Томской области (с изменениями на 10 сентября 2018 года) Закон Томской области от 9 июля 2015 года № 100–03. URL: <http://docs.cntd.ru/document/467921799> (дата обращения 10.12.2018).
- Оценка почв / В.И. Савич, Х.А. Амергужин, И.И. Карманов, Д.С. Булгаков, Ю.В. Федорин, Л.А. Карманова. – Астана: Изд-во Каз. агротехн. ун-та, 2003. – 544 с.
- О среднерайонной норме бесплатной передачи земли в собственность граждан. URL: <http://docs.cntd.ru/document/9017422> (дата обращения 10.12.2018).
- Каличкин В.К. Ресурсный потенциал сельского хозяйства Томской области / Сб. мат. и докладов Первого Агрономического собрания Томской области. – Томск, 2016. – С. 12–26.
- Дюкарев А.Г. О зонировании Томской области по агроклиматическим условиям и почвенному плодородию / Сб. мат. и докладов Первого Агрономического собрания Томской области. – Томск, 2016. – С. 87–92.
- Тюменцев Н.Ф., Иоганзен Б.Г. Природные биологические ресурсы Томской области и перспективы их использования. – Томск: Изд-во Томского университета, 1966. – 126 с.
- Томский округ. URL: <http://www.mediately.com/Cards/view/115019> (дата обращения 10.12.2018).
- Карта районов Томской области. URL: <https://www.google.ru/maps> (дата обращения 10.12.2018).
- Портал Росреестра. URL: <http://rosreestr.ru/site/> (дата обращения 10.12.2018).
- Публичная кадастровая карта Томской области. URL: <https://egrp365.ru> (дата обращения 10.12.2018).
- Google Earth. URL: <https://www.google.ru/intl/ru/earth/> (дата обращения 10.12.2018).
- «Постановление главы Администрации Томской области о нормативной цене земли на 2004 год от 14.04.2004 г. № 60». URL: <http://docs.cntd.ru/document/951808515> (дата обращения 10.12.2018).
- Стандарт межгосударственный. ГОСТ 17.8.1.02–88 (СТ СЭВ 6005–87). Охрана природы. Ландшафты. Классификация: утв. Постановлением Государственного комитета СССР от 13.05.1988 г. № 1329. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1988. – 6 с.
- Глазовская М.А. Геохимические основы типологии и классификации природных ландшафтов. – Смоленск: Ойкумена, 2002. – 288 с.
- Волков С.Н. Землеустройство. Т. 3. Землестроительное проектирование. Межхозяйственное (территориальное) землеустройство. – М.: Колос, 2002. – 384 с.
- Reiff M., Ivanicova Z., Surmanova K. Cluster analysis of selected world development indicators in the fields of agriculture and the food industry in European Union countries // Agricultural Economics. – 2018. – № 5. – P. 197–205.
- Захарченко А.В., Алексеев В.И., Ипатова Д.В. Иерархическая концепция неоднородности почв и планирование масштабов исследований // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 4. – С. 149–163.

Поступила 08.02.2019 г.

Информация об авторах

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

Захарченко А.В., доктор биологических наук, главный научный сотрудник Института проблем освоения Севера Федерального государственного бюджетного учреждения науки Тюменского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук.

Поспелова Е.В., аспирант Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 629.78:630.52:587/588:528.88

AREA DIFFERENTIATION OF AGRICULTURAL LAND ON THE EXAMPLE OF TOMSK DISTRICT

Olga A. Pasko¹,

oap@tpu.ru

Alexandr V. Zakharchenko²,

zakh.al.vic@yandex.ru

Ekaterina V. Pospelova¹,

kate_frol@mail.ru

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

² Institute of the problems of Northern development of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
86, Malygin Avenue, Tyumen, 625026, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to optimize the size of land plots to improve the organization of using agricultural land in the area of risky farming.

The aim of the study is to analyze the existing spatial distribution of land plots for agricultural purposes to choose the ways to optimize their use.

The objects of the research are the 3309 agricultural land plots of 25 farms located in the South-East of Tomsk region.

Methods: analytical, cartographic, correlation, regression and cluster types of analysis.

Results. The authors have analyzed the sample of 3309 land plots from 25 farms of the Tomsk district, and determined its main statistical indicators. Polymodality of the sample and its nonconformity to the normal distribution were established by nonparametric methods of analysis. Based on the hierarchical cluster analysis, the authors proposed the taxonomy (total plot size, scale, standardization by proximity to the regional standard, relative deviations from the standard, relative sizes and affiliation to the farm) and classification of areas for agricultural land plots. Agriculture accounts for 44 % of the total. Almost half of the land is used for fodder crops, and 7 and 2 %, respectively, for garden and vegetable crops. Gray forest soils dominate (45 % of plots), 14 % of plots are covered with light gray forest soils, and 11 % are covered with all other types. Sod deep-podzolic, sod-gley and sod-gley soils are rarely found on agricultural lands. The position of land in the landscape is mainly eluvial (72 % of the plots) and transeluvial (21 % of the plots). Less than a hundred of plots are characterized by superaqueous soils. It is shown that in the Tomsk district such factors as soil type, soil bonitet, position in the landscape and economic purpose do not affect the area of the agricultural plot. A linear relationship was established between the average land area and the number of land plots in the farm, which indicates the standardization of the land plots, after selection.

Key words:

Land, agricultural purpose, area, type of soil, credit score, position in the landscape, cluster analysis, correlation analysis, classification, land use deficiencies.

The work was carried out at the Tomsk Polytechnic University as a part of the program to improve the competitiveness of the Tomsk Polytechnic University.

REFERENCES

1. Pomelov A.S., Pasko O.A., Baranova A.V. Comparative analysis of land management in the world. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 27, 4 p. Available https://www.researchgate.net/publication/283847949_Comparative_analysis_of_land_management_in_the_world (accessed 10 December 2018).
2. Aleksandrova E.A., Gergaulova R.M., Shramko G.M., Knyazeva T.V. *Sposob obrabotki ozimoy pshenitsy* [Method of processing winter wheat]. Patent RF, no. 2349071, 2009.
3. Komov N.V., Cheshev A.S. An integrated approach to planning and rational use of land resources. *Ekonomika i ekologiya territorialnykh obrazovaniy*, 2018, vol. 2, no. 1, pp. 6–21. In Rus.
4. European Commission: Structure and Dynamics of EU Farms: Changes, Trends and Policy Relevance. *EU Agricultural Economics Briefs*. Brussels, 2013. No. 9, 120 p.
5. Sikk K., Maasikamäe S. Impact of agricultural land holding size on the land fragmentation. *Research for rural development*, 2015, vol. 2, pp. 301–305.
6. Bocharov M. On the minimum size of agricultural land. *In terra proventus*, 2005, no. 6 (45), pp. 77–82. In Rus.
7. Nachtergael F., Groppo P., Biancalani R., Zelaya S., Bonilla S.Z., Fetsi T., Rosalud R., Hammond T., Schlingloff S., Mantel S. *Land resource planning for sustainable land management food and agriculture organization of the united nations Rome*. Rome, Food and agriculture organization of the United nations, 2017. 68 p.
8. Bogdanov V.L., Posternak T.S., Pasko O.A., Kovyazin V.F. The issues of weed infestation with environmentally hazardous plants and methods of their control. *IOP Conference series. Earth and Environmental Science*. Tomsk, 11 October 2016, vol. 43, no. 1, pp. 2–7.
9. Pokk M., Maasikamäe S., Sikk K., Pašakarnis G. Aspects of arable land plots fragmentation in Tartu county. *Rural Development and Challenges Establishing Sustainable Land Use in Eastern European Countries*. Land Use Policy, 2012, pp. 703–710.
10. Bigelow D., Borchers A., Hubbs T. *US Farmland Ownership, Tenure, and Transfer 2016*. Available at: https://www.ers.usda.gov/webdocs/publications/74672/60297_eib161_summary.pdf?v=0 (accessed 10 December 2018).
11. Horjan O. Iuridiceskie problem consolidatii zemeli v Respublike Moldova [Legal problems of land consolidation in the Republic of

- Moldova]. *Proceedings of International Scientific Methodical Conference Baltic Surveying. Lithuanian University of Agriculture*. Vilnius, 2010. pp. 145–150.
12. Szabo L., Grznár M. Agriculture in the EU and position of the Slovak Republic. *Agricultural Economics*, 2015, no. 61, pp. 493–501.
 13. Pavlova T.I. *Optimizatsiya pochvennogo plodorodiya v agroekosistemakh* [Optimization of soil fertility in agro-ecosystems]. Saratov, FGBOU VPO «SGAU» Publ., 2014. 35 p.
 14. *O zemelnykh otnosheniyakh v Tomskoy oblasti (s izmeneniyami na 10 sentyabrya 2018 goda) Zakon Tomskoy oblasti ot 9 iyulya 2015 g. no. 100, Zakonodatel'naya duma Tomskoy oblasti* [On Land Relations in the Tomsk Region (as amended on September 10, 2018) Law of the Tomsk Region dated July 9, 2015 No. 100]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/467921799> (accessed 10 December 2018).
 15. Savich V.I., Amerguzhin Kh.A., Karmanov I.I., Bulgakov D.S., Fedorin Yu.V., Karmanova L.A. *Otsenka pochu* [Assessment of soils]. Astana, Kazakh Agrotechnical University Publ. house, 2003. 544 p.
 16. *O srednerayonnoy norme besplatnoy peredachi zemli v sobstvennost grazhdan* [On average norm of free transfer of land to the ownership of citizens]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/9017422> (accessed 10 December 2018).
 17. Kalichkin V.K. Resursny potentsial selskogo khozyaystva Tomskoy oblasti [Resource potential of agriculture in Tomsk region]. *Sbornik materialov i dokladov pervogo agronomicheskogo sobraniya Tomskoy oblasti* [Collection of materials and reports of the First Agronomic Assembly of the Tomsk Region]. Tomsk, 2016. pp. 12–26.
 18. Dyukarev A.G. *O zonirovani Tomskoy oblasti po agroklimaticheskim usloviyam i pochvennomu plodorodiyu* [On the zoning of the Tomsk region on agro-climatic conditions and soil fertility]. *Sbornik materialov i dokladov pervogo agronomicheskogo sobraniya Tomskoy oblasti* [Materials and reports of the First Agronomic Assembly of the Tomsk Region]. Tomsk, 2016. pp. 87–92.
 19. Tyumentsev N.F., Logansen B.G. *Prirodnye biologicheskie resursy tomskoy oblasti i perspektivy ikh ispolzovaniya* [Natural biological resources of the Tomsk region and the prospects for their use]. Tomsk, TGU Publ., 1966. 126 p.
 20. *Tomskiy okrug* [Tomsk district]. Available at: <http://www.meditly.com/Cards/view/115019> (accessed 10 December 2018).
 21. *Karta rayonov Tomskoy oblasti* [Map of districts of the Tomsk region]. Available at: https://www.google.ru/maps_ (accessed 10 December 2018).
 22. *Portal Rosreestra* [Rosreestr portal]. Available at: rosreestr.ru/site/ (accessed 10 December 2018).
 23. *Publichnaya kadastrovaya karta Tomskoy oblasti* [Public cadastral map of the Tomsk region]. Available at: <https://egrp365.ru> (accessed 10 December 2018).
 24. *Google Earth*. Available at: <https://www.google.ru/intl/ru/earth/> (accessed 10 December 2018).
 25. *Postanovlenie glavy Administratsii Tomskoy oblasti o normativnoy tsene zemli na 2004 god ot 14.04.2004 g. № 60* [Resolution of the Head of the Tomsk Region Administration on the normative price of land for 2004 of April 14, 2004 No. 60]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/951808515> (accessed 10 December 2018).
 26. *Standart mezhgosudarstvenny. GOST 17.8.1.02-88 (ST SEV 6005-87). Okhrana prirody. Landshafty. Klassifikatsiya: utv. Postanovleniyem Gosudarstvennogo komiteta SSSR ot 13.05.1988 g. № 1329* [Interstate standard. SS 17.8.1.02-88 (ST SEV 6005-87). Protection of Nature. Landscapes. Classification: approved. Resolution of the State Committee of the USSR of 13/05/1988 No. 1329]. Moscow, Izdatelstvo standartov, 1988. 6 p.
 27. Glazovskaya M.A. *Geokhimicheskiye osnovy tipologii i klassifikatsii prirodnykh landshaftov* [Geochemical basis of typology and classification of natural landscapes]. Smolensk, Oikumena, 2002. 288 p.
 28. Volkov S.N. *Zemleustroystvo. T. 3. Zemleustroitel'noe proektirovaniye. Mezhxozyaystvennoe (territorialnoe) zemleustroystvo* [Land Management. Vol. 3. Land management design. Inter-farm (territorial) land management]. Moscow, Kolos Publ., 2002. 384 p.
 29. Reiff M., Ivanicova Z., Surmanova K. Cluster analysis of selected world development indicators in the fields of agriculture and the food industry in European Union countries. *Agricultural Economics*, 2018, no. 5, pp. 197–205.
 30. Zakharchenko A.V., Alekeev V.I., Ipatova D.V. Hierarchical concept of soil heterogeneity and planning the scale of investigations. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 4, pp. 149–163. In Rus.

Received: 8 February 2018.

Information about the authors

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

Alexandr V. Zakharchenko, general research fellow, Institute of the problems of Northern development.

Ekaterina V. Pospelova, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 620.9:621.355.2:621:355.5:621.354.324.1:621.311.2

ИНТЕГРАЦИЯ ПРОЦЕССА КАТЕГОРИЗАЦИИ ЭЛЕКРОХИМИЧЕСКИХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ В ЗАДАЧУ ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВА ОБОРУДОВАНИЯ АВТОНОМНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Карамов Дмитрий Николаевич^{1,2},

dmitriy.karamov@mail.ru

¹ Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

² Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения точности решения задачи оптимизации состава оборудования автономных энергетических комплексов, использующих возобновляемые источники и накопители энергии

Цель: продемонстрировать возможность интеграции процесса категоризации электрохимических накопителей энергии в задачу оптимизации состава оборудования автономных энергетических комплексов, использующих возобновляемые источники и накопители энергии; выявить ряд закономерностей, влияющих на процесс категоризации электрохимических накопителей энергии, с последующим обобщением и детальным анализом полученной информации.

Методы. Представленная методика последовательно выстроена на положениях теории систем с использованием общизвестных математических моделей, позволяющих моделировать основные режимные параметры автономных систем электроснабжения с возобновляемыми источниками и электрохимическими накопителями энергии. Используются актинометрические, ветроэнергетические и многие другие природно-климатические показатели, полученные в результате обработки многолетних метеорологических рядов, зафиксированных на метеостанциях Ном, Кодиак, Адак (штат Аляска, США).

Результаты. Предложена методика интеграции процесса категоризации электрохимических накопителей энергии в задачу оптимизации состава оборудования автономных систем электроснабжения, использующих возобновляемые источники и накопители энергии. Представлены результаты исследования трех автономных энергетических комплексов, использующих возобновляемые источники и накопители энергии. По итогам исследования были получены результаты, характеризующие зависимость между составом генерирующего оборудования и суммарной установленной емкостью аккумулирующего звена. Проведен детальный анализ полученных результатов с соответствующими выводами, визуализацией и заключениями о степени их достоверности и возможности использования в оптимизационных исследованиях автономных энергетических комплексов, использующих возобновляемые источники и накопители энергии.

Ключевые слова:

Возобновляемые источники энергии, категоризация аккумуляторных батарей, деградация аккумуляторных батарей, системные исследования, оптимизация состава оборудования.

Введение

На протяжении последнего десятилетия мировой опыт показывает, что комбинированное использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) совместно с традиционными энергетическими установками и электрохимическими накопителями электрической энергии является экономически эффективным способом энергообеспечения потребителей в автономных системах электроснабжения (АСЭС) [1–5]. При этом особую значимость и большое распространение ВИЭ получили при электрификации труднодоступных регионов мира, не имеющих связи с традиционными централизованными энергетическими системами.

Стоит отметить, что одной из главных задач при использовании ВИЭ и электрохимических накопителей энергии в АСЭС являются задачи, отвечающие за нахождение оптимальных технологий производства, передачи, трансформации и аккумулирования энергии с последующим определением необходимых значений установленных мощностей основного генерирующего оборудования, элементов электрической, распределительной сети и суммарной емкости накопителей энергии [6–12]. Таким образом, задачи оптимизации позволяют

определить такой состав оборудования, при котором достигаются минимальные значения целевой функции, которая, как правило, представлена нормированной стоимостью электроэнергии (*levelized cost of electricity – LCOE*) [12–15]. *LCOE* – хорошо зарекомендовала себя при решении задачи оптимизации состава оборудования и реализована во многих программно-вычислительных комплексах (ПВК), имеющих большое распространение как с научной, так и практической точки зрения.

К таким ПВК относятся HOGA – Hybrid optimization by genesis algorithm (Испания), HOMER – Hybrid optimization modeling software (США), HY-PORA – Hybrid power optimized for rural/remote areas (США), TRNSYS – Transient system simulation tool (США) и т. д. [12, 16]. В данных ПВК используются различные подходы к анализу природно-климатических показателей, разные по уровню детализации модели элементов генерации, силовой электроники, аккумулирующих устройств и других элементов энергетической системы, объединенных единым процессом производства, передачи, аккумулирования энергии. Стоит отметить, что в данных ПВК нашли применение разнообразные методы оптимизации [16, С. 20].

При этом важно отметить, что конечный результат оптимизации напрямую зависит от того, какие технологии производства, передачи, трансформации и аккумулирования электрической энергии рассматривались в рамках исследования [17, 18]. Другими словами, оптимизация состава оборудования зависит от первоначальной матрицы рассматриваемого оборудования, в рамках которой находятся потенциально возможные технологии с подробным техническим и экономическим описанием линейки типоразмеров. Следовательно, рассмотрение различных комбинаций состава оборудования в рамках решения задачи оптимизации позволяет определить как наиболее эффективные технологии производства, трансформации, передачи и аккумулирования электрической энергии, так и оптимальную установленную мощность оборудования из рассматриваемой линейки типоразмеров [19, 20].

Стоит упомянуть, что элементы аккумулирования, электрической энергии, которые, как правило, представлены разного рода аккумуляторными батареями (АБ) в отличие от элементов генерации и трансформации электрической энергии имеют определенный ряд специфических особенностей, которые существенно влияют на конечный результат оптимизации [21].

Кенным особенностям относятся внутренние процессы старения активной массы АБ, включая расслоение электролита, разрушение положительного электрода, тяжелую/необратимую сульфацию, кристаллизацию и т. д., исходя из условий их эксплуатации [21–23]. При этом важно отметить, что данные положения в большей степени относятся к химическому направлению, что существенно усложняет процесс моделирования работы АБ с учетом вышеупомянутых факторов. Данные факторы имеют совершенно разную частоту возникновения в зависимости от рассматриваемого типа, установленной ёмкости АБ и условий её эксплуатации [23]. В добавок следует отметить, что в рамках задачи оптимизации, где процесс поиска минимума (или максимума) целевой функции зачастую является циклическим много итерационным, что существенно усложняет использование ресурсоемких моделей АБ. Кроме того, данные процессы еще не до конца изучены и требуют более детальной проработки химической составляющей, отвечающей за деградацию активной массы АБ с последующей разработкой агрегированных моделей учета данных процессов.

Учет вышеупомянутых положений позволяет выработать ряд мероприятий по выбору наиболее оптимальной технологии аккумулирования энергии в зависимости от условий эксплуатации АБ и ряда других режимных параметров, а также сократить количество вариантов потенциально возможных составов оборудования.

Роль аккумуляторных батарей в АСЭС

В целом структура АСЭС может быть описана с помощью ориентированного графа, в котором все эле-

менты и связи между ними обозначены цифрами. В таком случае определяется суммарное количество электрических связей n , а также число узлов схемы m , которые представлены элементами генерации и аккумулирования энергии с последующим обозначением линейно независимых контуров [24]. На рис. 1 показан ориентированный граф АСЭС с ВИЭ и АБ.

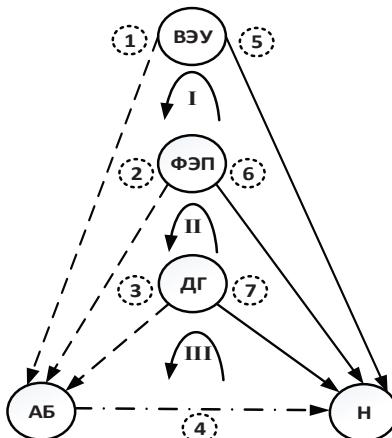


Рис. 1. Ориентированный граф АСЭС с ВИЭ и АБ: ВЭУ – ветроэнергетическая установка; ФЭП – фотovoltaics; ДГ – дизель генератор; АБ – аккумуляторные батареи; Н – нагрузка

Fig. 1. Oriented graph of autonomous power supply system, using renewable energy sources and storage batteries: ВЭУ – wind turbine; ФЭП – photovoltaics; ДГ – diesel generator; АБ – storage batteries; Н – electrical load

Представленный на рис. 1 ориентированный граф АСЭС имеет пять основных узлов, которые представлены элементами генерации (ВЭУ, ФЭП, ДГ), электрической нагрузкой (Н), аккумуляторными батареями (АБ), а также семью электрическими связями и 3 линейно независимыми контурами. При этом четыре из пяти узлов являются линейно независимыми. Дальнейший анализ представленного ориентированного графа позволяет составить две матрицы: A – матрица соединений линейно независимых узлов и участков ориентированного графа размерностью $(m-1) \times n$ и B – матрица линейно независимых контуров и участков цепи, размерностью $c \times n$, где $c = n - (m-1)$. Из ориентированного графа следует, что известными параметрами системы являются значения генерируемой мощности в узлах системы, т. е. вектор-функции скалярного аргумента t .

Матрица A формируется исходя из следующего правила: если j -му узлу принадлежит i -й участок и направление его из узла, то элемент матрицы равен -1 , если j -му узлу принадлежит i -й участок и направление его в узел, то элемент матрицы равен $+1$, иначе элемент матрицы равен 0 , тогда:

$$A = \begin{array}{c|ccccccl} & \Rightarrow & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \end{matrix} \\ \text{ВЭУ} & & \begin{matrix} -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{matrix} \\ \text{ФЭП} & & \begin{matrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{matrix} \\ \text{ДГ} & & \begin{matrix} 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{matrix} \\ \text{АБ} & & \begin{matrix} 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 1 \end{matrix} \end{array}$$

Элементы матрицы постоянные численные величины и элементы для узла H могут быть получены в результате суммирования по столбцам, умноженным на множитель -1 . Таким образом, можно записать матрицу A в виде блочных матриц $A = [A_d; A_c]$,

$$A_d = \begin{array}{c} \Leftrightarrow \\ \text{ВЭУ} \\ \Phi\text{ЭП} \\ \text{ДГ} \\ \text{АБ} \end{array} \left[\begin{array}{ccccc} 1 & 2 & 3 & 4 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{array} \right], \quad A_c = \begin{array}{c} \Leftrightarrow \\ \text{ВЭУ} \\ \Phi\text{ЭП} \\ \text{ДГ} \\ \text{АБ} \end{array} \left[\begin{array}{ccccc} 5 & 6 & 7 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \end{array} \right].$$

Матрица B образуется согласно следующему правилу: если c -му контуру принадлежит i -й участок и направление его совпадает с направлением контура, то элемент матрицы равен $+1$, если c -му узлу принадлежит i -й участок и направление его противоположное направлению контура, то элемент матрицы равен -1 , иначе элемент матрицы равен 0 , следовательно:

$$B = \begin{array}{c} \Leftrightarrow \\ I \\ II \\ III \end{array} \left[\begin{array}{ccccccc} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right].$$

Матрицу линейно независимых контуров и участков системы также можно представить в блочном виде $B = [B_d; B_c]$.

$$B_d = \begin{array}{c} \Leftrightarrow \\ I \\ II \\ III \end{array} \left[\begin{array}{cccc} 1 & 2 & 3 & 4 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{array} \right], \quad B_c = \begin{array}{c} \Leftrightarrow \\ I \\ II \\ III \end{array} \left[\begin{array}{ccc} 5 & 6 & 7 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{array} \right].$$

Анализ матриц A_d , A_c , B_d , B_c позволяет сделать вывод, что узел AB имеет максимальную степень среди остальных узлов ориентированного графа. При этом узел AB имеет непосредственную связь с узлом нагрузки H в моменты, когда

$$P_s(t) < 0,$$

где

$$P_s(t) = P_{\text{ВЭУ}}(t) + P_{\Phi\text{ЭП}}(t) + P_{\text{ДГ}}(t) - P_H(t) - \Delta P_\Sigma(t),$$

$$\Delta P_\Sigma(t) = \Delta P_{\text{КЛ-вл}}(t) + \Delta P_{\text{СИН}}(t) + \Delta P_{\text{БИН}}(t) + \Delta P_{\text{АБ}}(t),$$

где $P_{\text{ДГ}}(t)$ – генерация ДГ в момент, когда состояние заряда имеет минимально-допустимое значение. При этом ДГ включается на полную мощность, осуществляя прямое снабжение потребителя и заряд АБ. В таких условиях ДГ имеет минимальный удельный расход дизельного топлива.

Следовательно, исходя из анализа матриц A и B , а также основных уравнений, описывающих знакопеременную функцию мощности $P_s(t)$, можно сделать вывод, что узел AB в АСЭС с ВИЭ является стабилизирующим элементом системы, работающим в буферном режиме, который позволяет уменьшить влияние разного рода и уровня возмущений в энергетической системе [25–28].

Аккумуляторные батареи в АСЭС с ВИЭ

Работа АБ в АСЭС с ВИЭ имеет ряд особенностей, влияющих как на техническую, так и на экономическую эффективность использования тех или иных типов электрохимических накопителей энергии [16].

В первую очередь данные особенности в большей степени отражены в неравномерности выработки электрической энергии генераторами, использующими в качестве первичных двигателей энергию ветра и Солнца [20, 21]. Стохастическая составляющая при генерировании электрической энергии существенно сказывается на основных эксплуатационных показателях АБ. К примеру, в системах электроснабжения, где в качестве основного генерирующего оборудования используются ФЭП, эксплуатация АБ сопровождается процессами с ярко выраженным циклическим характером в течение суток. На рис. 2 показано А – изменение состояния заряда АБ и В – поведение знакопеременной функции мощности системы на протяжении четырех летних дней в АСЭС с ФЭП и АБ.

Как видно из рис. 2, состояние заряда АБ можно разделить на три условных режима.

- Заряд АБ в момент, когда знакопеременная функция имеет положительный знак:

$$P_s(t)^+ = \begin{cases} P_s(t); (P_s(t) > 0) \wedge (\bar{a}_{AB}) \geq \bar{b}_{AB} \cdot P_s(t) \cdot \Delta t \\ \frac{(\bar{a}_{AB})}{\Delta t}; (P_s(t) > 0) \wedge (\bar{a}_{AB}) < \bar{b}_{AB} \cdot P_s(t) \cdot \Delta t \\ 0; P_s(t) < 0 \end{cases}.$$

- Разряд АБ в момент, когда знакопеременная функция имеет отрицательный знак:

$$P_s(t)^- = \begin{cases} P_s(t); (P_s(t) < 0) \wedge (\bar{a}_{AB}) \geq \frac{P_s(t)}{\bar{b}_{AB}} \cdot \Delta t \\ \frac{(\bar{a}_{AB})}{\bar{b}_{AB}} \cdot \Delta t; (P_s(t) < 0) \wedge (\bar{a}_{AB}) < \frac{P_s(t)}{\bar{b}_{AB}} \cdot \Delta t \\ 0; P_s(t) > 0 \end{cases},$$

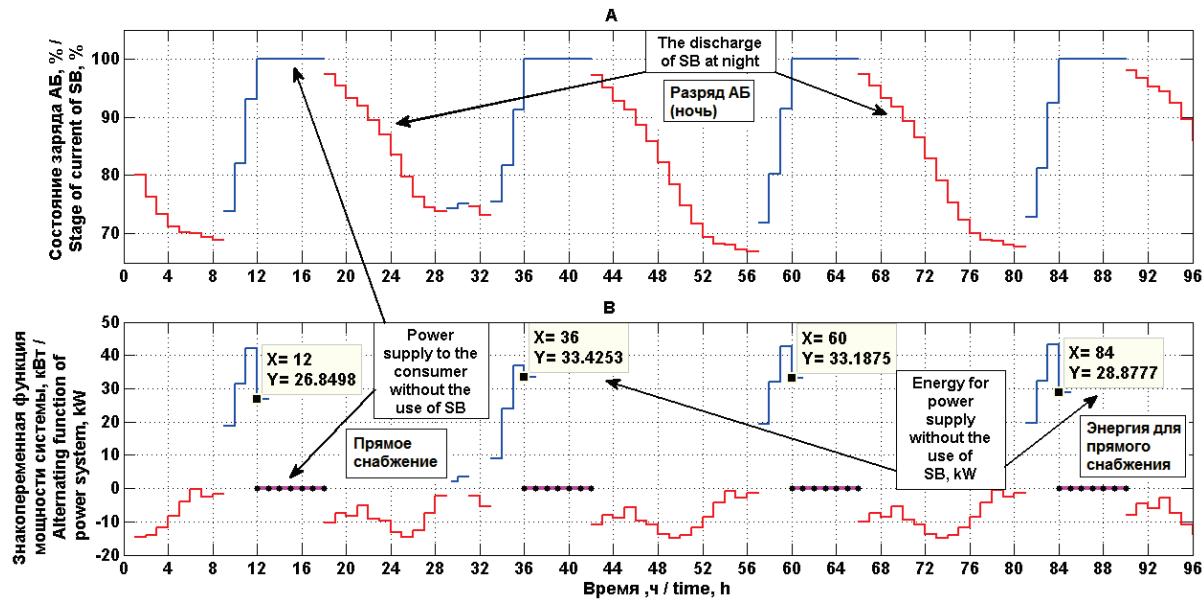
- Прямое снабжение потребителя от ВИЭ в момент, когда АБ заряжены на 100 %:

$$P_s(t)^0 = \begin{cases} P_H(t); (P_s(t) > P_H(t)) \wedge (Q_{AB}(t)) = 100 \\ 0; (Q_{AB}(t)) < 100 \end{cases},$$

где \bar{a}_{AB} – система ограничений по величинам заряда и разряда АБ, основанная на технических характеристиках, которая определяется следующим образом:

$$\bar{a}_{AB} = \left(Q_{AB}^{\max} - Q_{AB}^{min} \right) \cdot \bar{k}_{AB},$$

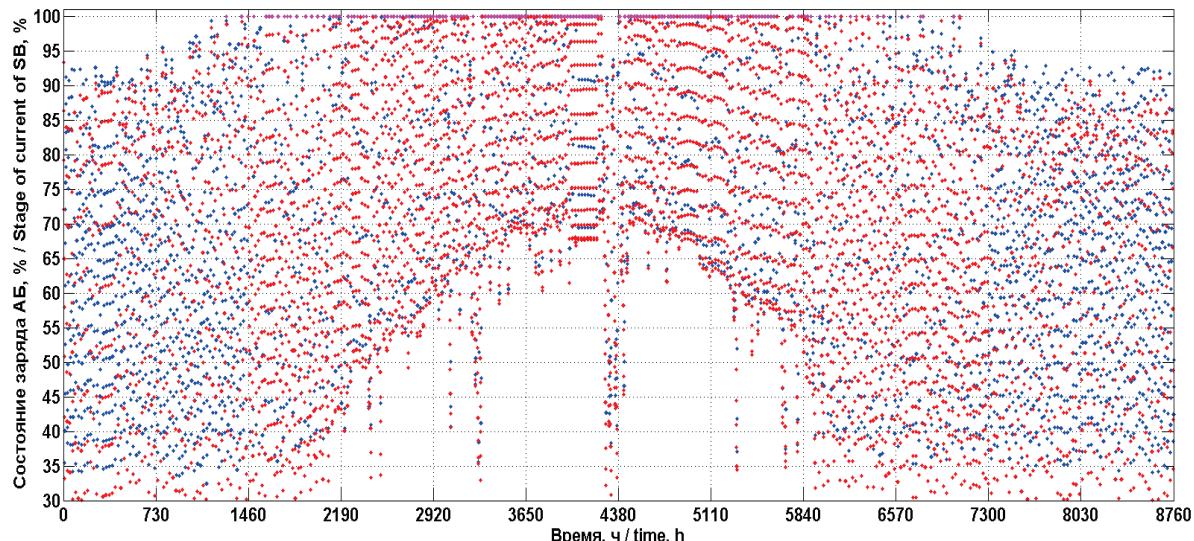
где Q_{AB}^{\max} – установленная емкость АБ, кВт·ч; Q_{AB}^{min} – минимально допустимое состояние заряда АБ, при котором включается резервный источник (как правило, составляет от 20 до 30 % от Q_{AB}^{\max}), кВт·ч;



* SB – storage batteries

Рис. 2. А) изменение состояния заряда АБ; В) поведение знакопеременной функции мощности системы на протяжении четырех летних дней в АСЭС с ФЭП и АБ

Fig. 2. A) stage of current of storage batteries; B) alternating function of power system during four summer days in the autonomous power supply system with photovoltaic panels and storage batteries



* Цвета/colors: красный/red – разряд/discharge; синий/blue – заряд/charge;

розовый/pink – снабжение от ВИЭ без использования АБ/energy for power supply without the use of SB

Рис. 3. Изменение состояния заряда АБ в течение года в АСЭС с ФЭП

Fig. 3. Stage of current of SB during a year in autonomous power supply using photovoltaic panels

\bar{k}_{AB} – заряд/разрядный коэффициент АБ (для разных типов АБ составляет от 10 до 40 % от Q_{AB}^{\max}), кВт·ч.

Также составляется система логических условий преобразовательно-аккумулирующего звена \bar{b}_{AB} , которая выглядит следующим образом:

$$\bar{b}_{\text{AB}} = \begin{cases} \eta_{\text{AB}} \cdot \eta_{\text{бин}}; (P_s(t) \geq 0) \\ \eta_{\text{бин}}; (P_s(t) < 0) \end{cases}$$

$\eta_{\text{AB}}, \eta_{\text{бин}}$ – КПД АБ и батарейного инвертера, %.

На рис. 2 показано изменение состояния заряда АБ в АСЭС с ФЭП в течение года с учетом вышеописанных логических условий.

Исходя из рис. 2, 3 значения знакопеременной функции мощности $P_s(t)$ относительно временного интервала (t) описываются достаточно сложной системой логических условий. В рамках данных условий учитываются не только ряд эксплуата-

ционно-технических ограничений, но и изменчивость природно-климатических показателей, влияющих на генерацию ФЭП и ВЭУ, что, несомненно, влияет на суммарное значение $P_s(t)$. С более подробным математическим описанием заряд/разрядных процессов различных видов АБ с увязкой системы управления резервных источников питания можно ознакомиться в [16. С. 44–51].

Негативные воздействия на аккумуляторные батареи

Работа АБ в АСЭС с ВИЭ зачастую сопровождается сложными эксплуатационными процессами, связанными с частыми циклическими разрядами на большую глубину АБ с последующим зарядом большими токами [29]. Частый неполный заряд с последующим разрядом до минимально допустимого состояния заряда Q_{AB}^{\min} АБ приводит к процессу коррозии и разрушению положительных пластин, что ведет к выпадению активной массы. Таким образом, коррозия в АБ характеризуется нарастанием слоя оксида свинца на положительных пластинах с последующим их разрушением. Данный процесс приводит к снижению проводимости пластины, уменьшению её диаметра и увеличению сопротивления, что, несомненно, сказывается на суммарной располагаемой емкости АБ.

Также одним из процессов, ведущих к деградации активной массы АБ, является кислотная стратификация, которая характеризуется расслоением электролита на две составляющие. В таком случае кислота концентрируется в нижней части АБ и не в полном объёме взаимодействует с пластинами. Сама по себе кислотная стратификация не является процессом старения АБ. Однако она существенно влияет на газообразование, которое в активной массе ведет к смешению электролита и неравномерному распределению тока по пластинам, тем самым существенно ускоряя необратимый процесс сульфации и кристаллизации в нижней части АБ [30]. К техническим решениям, уменьшающим воздействие кислотной стратификации, относятся системы взвалтывания электролита. Также возможным решением является использование АБ технологии *VRLA* (*valve-regulated lead-acid*), в которой процесс кислотной стратификации практически исключен [30]. Особенность технологии *VRLA* заключается в использовании не жидкого электролита, а *абсорбированного* (*AGM – Absorbent Glass Mat*) или *гелевого* (*GB – gel battery*).

Еще одним из важных процессов, существенно снижающих эксплуатационные показатели АБ, является сульфация, которая характеризуется уменьшением располагаемой емкости АБ, увеличением внутренней температуры АБ за счет увеличенного сопротивления пластин, существенным уменьшением плотности электролита, а также ранним газовыделением при заряде, что приводит к ошибочному прекращению заряда АБ и, как следствие, к частым недозарядам [31]. В конечном итоге процесс сульфации, несомненно, ведет к разрушению положительных пластин АБ. Основной

причиной, ускоряющей процесс сульфации с последующей кристаллизацией, являются частые глубокие разряды с длительным простоем в области пониженного заряда, близкого к минимально допустимому состоянию Q_{AB}^{\min} . Следовательно, нахождение состояния заряда АБ в области минимально допустимых значений приводит к тому, что небольшие кристаллы сульфата свинца становятся *опорными* центрами кристаллизации, что приводит к образованию крупнокристаллической формы сульфата и необратимой реакции [31, 32]. Также одной из причин повышенной сульфации является как существенно повышенная, так и пониженная температура окружающей среды. При этом в случае отрицательной температуры и замерзания электролита негативные воздействия в целом на АБ существенно возрастают и запускается *необратимый* процесс разрушения пластин и деградации всей активной массы АБ.

Таким образом, имеется целый ряд разного рода негативных воздействий на активную массу АБ, которые существенно снижают не только основные эксплуатационные параметры АБ, а в целом существенно сокращают располагаемый ресурс аккумулирующего звена. Естественно, важную роль в снижении негативных последствий для АБ играет правильно выстроенная система управления заряда АБ в моменты, когда $Q_{AB}(t) \approx Q_{AB}^{\min}$. Например, использование резервного источника питания для необходимого своевременного заряда АБ. Также немаловажную роль играют внешние условия эксплуатации, такие как автоматическое поддержание температурного режима в помещении (аккумуляторной) и т. д.

Категоризация электрохимических накопителей энергии

Первоначально процесс *категоризации* подразумевает детальный анализ химических, механических, электрических и пр. процессов, протекающих при эксплуатации АБ в системах электроснабжения, использующих ВИЭ, с последующим составлением категорий. Данные категории формируются вследствие анализа статистических данных об эксплуатационных режимах АБ в реальных АСЭС с ВИЭ. Кроме того, отдельные категории были получены в результате продолжительных по времени исследований ведущих европейских коллективов [32]. К примеру, в работах [29–32] приведен подробный анализ применения свинцово-кислотных АБ (*AGM* и *GB*) в системах электроснабжения, использующих ФЭП. Представлены теоретические выкладки процессов старения и деградации активной массы АБ с последующей проверкой полученных результатов на реальных АСЭС. При этом даны основные рекомендации по процессам заряда и разряда АБ, потери части располагаемой емкости и возможные пути решения проблем деградации АБ.

Стоит отметить, что работы [29–32] не включали полный диапазон использования ВИЭ, в первую

очередь ВЭУ, а также небольших энергетических систем. В связи с этим в 2007 г. был начат объединенный проект «*Development of test procedures for benchmarking components in renewable energy systems applications, in particular energy storage systems*», поддержанный Европейским Союзом, Правительством Австралии, Соединенных Штатов Америки и частными организациями. Данный проект позволил объединить ведущих мировых ученых в области аккумулирования энергии и других смежных направлений, связанных с решением ряда задач, возникающих в АСЭС с ВИЭ и АБ.

В рамках данного проекта была разработана достаточно интересная с практической и научной точки зрения методика *категоризации АБ* исходя из условий их эксплуатации. Было предложено шесть основных показателей, численный анализ которых позволяет с достаточной точностью описать процессы деградации активной массы АБ при имеющихся условиях эксплуатации. К данным факторам относятся:

Среднегодовой коэффициент заряда – выражается средним коэффициентом заряда в рассматриваемый период времени. Данный показатель косвенно указывает, в каком режиме (плавающем заряде или циклическими разрядами) эксплуатируется АБ. В [23] отмечается, что в реальных системах с ВИЭ, как правило, имеют место оба из представленных режимов в зависимости уровня генерации ФЭП и ВЭУ и уровня нагрузки потребителя. Таким образом, коэффициент заряда может существенно варьироваться. Поэтому важно использовать данный показатель с остальными

$$K_{AB}^3 = \frac{\int_1^{\hat{T}} I_{AB}(t) H(I_{AB}^+(t)) dt}{\int_1^{\hat{T}} I_{AB}(t) H(I_{AB}^-(t)) dt} = \frac{\sum_{i=1}^{\hat{T}} I_{AB}^+(t)}{\sum_{i=1}^{\hat{T}} I_{AB}^-(t)},$$

где \hat{T} – количество часов расчетного периода, с; $I_{AB}(t)$ – зарядно-разрядная функция АБ; $I_{AB}^+(t)$ – функция заряда АБ; $I_{AB}^-(t)$ – функция разряда АБ. Функция $I_{AB}(t)$ и её составляющие $I_{AB}^+(t)$, $I_{AB}^-(t)$ определяются относительно каждого временного интервала (t). H – функция Хэвисайда, где дискретная форма записи для процессов заряда и разряда АБ имеет следующий вид:

$$H[I_{AB}^-(t)] = \begin{cases} 0; & P_s(t) \geq 0 \\ 1; & P_s(t) < 0 \end{cases},$$

$$H[I_{AB}^+(t)] = \begin{cases} 0; & P_s(t) \leq 0 \\ 1; & P_s(t) > 0 \end{cases}.$$

Как отмечается в [23], большинство исследуемых АСЭС с ВИЭ имеют численное значение данного показателя от 1,02–1,30 о. е.

Коэффициент пропускной способности – выражается в виде суммарного годового разряда и приводится к установленной емкости АБ. Данный показатель необходимо использовать совместно с анализом количества часов при низком заряде

$$K_{AB}^{\Pi} = \frac{\int_1^{\hat{T}} I_{AB}(t) H(I_{AB}^-(t)) dt}{Q_{AB}^{\max}} = \frac{\sum_{i=1}^{\hat{T}} I_{AB}^-(t)}{Q_{AB}^{\max}}.$$

Данный показатель для АСЭС с ВИЭ, как правило, имеет значение от 10 до 100 о. е.

Коэффициент максимальной скорости разряда – демонстрирует максимальный ток разряда равным или превышающим 1 % от K_{AB}^{Π}

$$K_{AB}^{P-\max} = \frac{0,01 \cdot K_{AB}^{\Pi} \cdot Q_{AB}^{\max}}{\bar{a}_{AB} \cdot \sum_{i=1}^{\hat{T}} t_i}.$$

Данный показатель в первую очередь позволяет сделать вывод, насколько правильно выбрана суммарная установленная емкость АБ Q_{AB}^{\max} с учетом эксплуатационно-технических ограничений \bar{a}_{AB} . Также стоит отметить, что высокие значения разрядных токов существенно влияют на выбор суммарной установленной емкости АБ, где неспособность поддерживать высокие разрядные токи приводит к преждевременному старению и замене АБ.

Временной коэффициент полного заряда – характеризует среднее время между разрядом до минимально допустимого состояния заряда Q_{AB}^{\min} с последующим зарядом АБ до значений выше 90 %

$$K_{AB}^{B-\max} = \frac{\int_1^{\hat{T}} Q_{AB}(t) H(Q_{AB}^{\uparrow 90\%}(t)) dt}{t_{AB}^{\uparrow 90\%}} = \frac{\sum_{i=1}^{\hat{T}} Q_{AB}^{\uparrow 90\%}(t)}{t_{AB}^{\uparrow 90\%}}.$$

Как правило, данный показатель составляет от 0,7 до 10 дней.

Коэффициент частичного заряда – представляет собой суммарную пропускную способность относительно состояния заряда АБ в моменты времени (t)

$$K_{AB}^{ЦЗ} = \frac{\left(\begin{array}{l} (k_{AB}^{85\%-100\%} \times 1) + (k_{AB}^{70\%-85\%} \times 2) + \\ + (k_{AB}^{55\%-70\%} \times 3) + (k_{AB}^{40\%-55\%} \times 4) + \\ + (k_{AB}^{0\%-40\%} \times 5) \end{array} \right)}{5},$$

где $k_{AB}^{85\%-100\%}$, $k_{AB}^{70\%-85\%}$, $k_{AB}^{55\%-70\%}$, $k_{AB}^{40\%-55\%}$, $k_{AB}^{0\%-40\%}$ являются коэффициентами, описывающими количество высвобождаемой энергии с соблюдением системы технических ограничений (\bar{a}_{AB}) относительно рассматриваемого численного интервала состояния заряда в процентном соотношении. При этом универсальная форма записи данных коэффициентов имеет следующий вид:

$$k_{AB}^{x-y} = \frac{\int_1^{\hat{T}} I_{AB}(t) H(Q_{AB}^{x-y}(t)) H(I_{AB}^-(t)) dt}{\int_1^{\hat{T}} I_{AB}(t) H(I_{AB}^-(t)) dt} \cdot 100,$$

где x , y – численное значение нижнего и верхнего порога соответственно, %.

Обычно данный коэффициент находится в диапазоне от 20 до 70 %

Временной коэффициент низкого заряда – оценивает среднегодовое количество часов, при которых состояние заряда АБ ниже 35 %

$$K_{AB}^{B-\min} \frac{\int_1^{\hat{T}} Q_{AB}(t) H(Q_{AB}^{\downarrow 35\%}(t)) dt}{\int_1^{\hat{T}} dt} = \frac{\sum_{i=1}^{\hat{T}} Q_{AB}^{\downarrow 35\%}(t)}{\hat{T}}.$$

Данный показатель характеризует количество времени в году, при котором состояние заряда АБ $Q_{AB}(t)$ меньше 35 %, что приводит к сильной необратимой сульфации и кристаллизации.

В [23] отмечается, что не всегда имеется возможность фиксировать все из представленных показателей, что, несомненно, влияет на результат *категоризации АБ*.

После определения численных результатов коэффициентов происходит автоматический вывод оценок данного показателя по *пятибалльной шкале*. При этом оценки несут следующую смысловую нагрузку: 1 – очень низкая; 2 – низкая; 3 – средняя; 4 – высокая; 5 – очень высокая.

$$\begin{aligned} \widehat{M}_{K_{AB}^3} &= \begin{cases} 1; (K_{AB}^3 \leq 102) \\ 2; (K_{AB}^3 > 102) \wedge (K_{AB}^3 \leq 108) \\ 3; (K_{AB}^3 > 108) \wedge (K_{AB}^3 \leq 115) \\ 4; (K_{AB}^3 > 115) \wedge (K_{AB}^3 \leq 130) \\ 5; (K_{AB}^3 > 130) \end{cases} \\ \widehat{M}_{K_{AB}^{\Pi}} &= \begin{cases} 1; (K_{AB}^{\Pi} \leq 10) \\ 2; (K_{AB}^{\Pi} > 10) \wedge (K_{AB}^{\Pi} \leq 40) \\ 3; (K_{AB}^{\Pi} > 40) \wedge (K_{AB}^{\Pi} \leq 70) \\ 4; (K_{AB}^{\Pi} > 70) \wedge (K_{AB}^{\Pi} \leq 100) \\ 5; (K_{AB}^{\Pi} > 100) \end{cases} \\ \widehat{M}_{K_{AB}^{P-\max}} &= \begin{cases} 1; (K_{AB}^{P-\max} \leq 0,1) \\ 2; (K_{AB}^{P-\max} > 0,1) \wedge (K_{AB}^{P-\max} \leq 0,5) \\ 3; (K_{AB}^{P-\max} > 0,5) \wedge (K_{AB}^{P-\max} \leq 1,4) \\ 4; (K_{AB}^{P-\max} > 1,4) \wedge (K_{AB}^{P-\max} \leq 1,7) \\ 5; (K_{AB}^{P-\max} > 1,7) \end{cases} \\ \widehat{M}_{K_{AB}^{\Pi^3}} &= \begin{cases} 1; (K_{AB}^{\Pi^3} \leq 30) \\ 2; (K_{AB}^{\Pi^3} > 30) \wedge (K_{AB}^{\Pi^3} \leq 40) \\ 3; (K_{AB}^{\Pi^3} > 40) \wedge (K_{AB}^{\Pi^3} \leq 50) \\ 4; (K_{AB}^{\Pi^3} > 50) \wedge (K_{AB}^{\Pi^3} \leq 70) \\ 5; (K_{AB}^{\Pi^3} > 70) \end{cases} \\ \widehat{M}_{K_{AB}^{B-\min}} &= \begin{cases} 1; (K_{AB}^{B-\min} \leq 1) \\ 2; (K_{AB}^{B-\min} > 1) \wedge (K_{AB}^{B-\min} \leq 4,5) \\ 3; (K_{AB}^{B-\min} > 4,5) \wedge (K_{AB}^{B-\min} \leq 15,5) \\ 4; (K_{AB}^{B-\min} > 15,5) \wedge (K_{AB}^{B-\min} \leq 25) \\ 5; (K_{AB}^{B-\min} > 25) \end{cases} \end{aligned}$$

$$\widehat{M}_{K_{AB}^{B-\max}} = \begin{cases} 1; (K_{AB}^{B-\max} \leq 0,7) \\ 2; (K_{AB}^{B-\max} > 0,7) \wedge (K_{AB}^{B-\max} \leq 1,2) \\ 3; (K_{AB}^{B-\max} > 1,2) \wedge (K_{AB}^{B-\max} \leq 2,5) \\ 4; (K_{AB}^{B-\max} > 2,5) \wedge (K_{AB}^{B-\max} \leq 8) \\ 5; (K_{AB}^{B-\max} > 8) \end{cases}$$

При этом анализ полученных показателей позволяет в целом определить необходимые условия для эксплуатации АБ и снизить негативные воздействия на активную массу. Более детально с процессом *категоризации* можно ознакомиться в работах [23, 29, 30].

Интеграция процесса категоризации в задачи оптимизации аккумуляторных батарей в АСЭС с ВИЭ

Процесс *категоризации* АБ является сложным и требует большого количества первоначальной информации. В то же время хорошая проработка химической составляющей влияния режимных параметров на процессы деградации активной массы АБ показывает состоятельность предлагаемой методики.

Важно отметить, что зачастую детализированной первоначальной информации нет в наличии. Кроме того, процесс *категоризации* напрямую зависит от временных интервалов (t), при которых генерация ВИЭ имеет стохастический характер, что, несомненно, влияет на знакопеременную функцию мощности $P_s(t)$. При этом немаловажное значение имеет нагрузочная характеристика потребителя, которая также зависит от времени года, месяца, дня и часа расчетного периода. Поэтому, согласно [23], можно сделать вывод, что в целом численные значения процесса *категоризации* могут варьироваться в зависимости от конфигурации сети, логических условий управления, нагрузочной характеристики потребителя, состава оборудования, природно-климатических показателей и т. д.

В то же время автор статьи утверждает, что при наличии детализированной модели АСЭС с ВИЭ и АБ с интеграцией реальных метеорологических рядов и применении хронологического метода расчета системы с фиксацией необходимых режимных параметров относительно временного интервала (t) возможно использование процесса *категоризации* при решении задачи оптимизации АБ в АСЭС с ВИЭ.

Содержательное описание предлагаемого подхода

Предлагается производить моделирование АСЭС с ВИЭ и АБ на протяжении всего количества лет метеорологических наблюдений с дискретным шагом один час. При этом все метеорологические параметры относительно каждого временного интервала (t) принимаются равными численным значениям, замеренным на соответствующем временном отрезке. Данные массивы автоматически обрабатываются и приводятся к одному временному интервалу в зависимости от первоначального метеорологического кода (*FM 12 Synop* или *METAR*),

описывающего массив природно-климатических показателей.

Обработка метеорологических рядов производится автоматически с применением методики и реализующей её ПВК «Локальный анализ параметров окружающей среды и солнечной радиации», в рамках которого также моделируются актинометрические показатели, такие как прямая, рассеянная и суммарная солнечная радиация с учетом фактической облачности на рассматриваемой территории. При определении актинометрических показателей используется тандем математических моделей *Iqbal* и *Kasten-Czeplak* [33, 34].

После того как сформирован итоговый многолетний массив параметров окружающей среды, включающий актинометрические, ветроэнергетические и другие природно-климатические показатели, производится сквозное моделирование АСЭС с шагом один час на всю глубину метеорологических наблюдений. При этом относительно каждого временного интервала (t) определяется уровень генерации ВЭУ, ФЭП, ДГ в зависимости от условий управления АСЭС и других режимных параметров. Также определяются значения знакопеременной функции мощности $P_s(t)$ системы с учетом нагрузочной характеристики потребителя $P_h(t)$ и потерь электроэнергии $\Delta P_e(t)$ относительно каждого временного интервала с последующим разделением на положительную и отрицательную области. В то же время эксплуатационно-технические ограничения \bar{a}_{AB} по величинам заряда и разряда АБ принимаются равными общепринятым значениям.

На конец расчетного периода относительно знакопеременной функции мощности $P_s(t)$, состояния заряда АБ $Q_{AB}(t)$ и фактических величин тока заряда $I_{AB}^+(t)$ и разряда $I_{AB}^-(t)$ определяются описанные ранее коэффициенты K_{AB}^3 , K_{AB}^Π , $K_{AB}^{P-\max}$, $K_{AB}^{B-\max}$, $K_{AB}^{\Pi_3}$, $K_{AB}^{B-\min}$, необходимые для категоризации АБ. Численные результаты полученных коэффициентов сравниваются с референтными значениями, и производится расчет оценок $M_{K_{AB}^3}$, $M_{K_{AB}^\Pi}$, $M_{K_{AB}^{P-\max}}$, $M_{K_{AB}^{B-\max}}$, $M_{K_{AB}^{\Pi_3}}$, $M_{K_{AB}^{B-\min}}$, где на их основании формируется итоговый результат категоризации АБ. По итогам автоматического анализа и построения графического изображения полученных оценок определяется номер категории АБ. На рис. 4 показаны диаграммы шести категорий АБ [23].

При этом на основании полученных оценок и определения номера категории формируется описание и степень возникновения основных процессов деградации активной массы АБ, что автоматически позволяет сформировать потенциально возможные варианты компоновки электрохимических накопителей энергии, в которых данные негативные процессы сведены к минимуму. Такой подход позволяет заранее отсесть те типы АБ, которые при данных условиях эксплуатации сильно подвержены негативным воздействиям деградации.

В табл. 1 показаны основные процессы деградации активной массы АБ и степень их возникновения в зависимости от полученной категории [23].

Таблица 1. Процессы деградации и степень их возникновения для различных категорий

Table 1. Degradation and its probability for different categories

| Процесс деградации Degradation | Номер категории Category number | | | | | |
|---|------------------------------------|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Коррозия положительной пластины Corrosion of the positive grid | 1 | 4 | 5 | 4 | 3 | 2 |
| Тяжелая/необратимая сульфация Hard/irreversible sulphation | 5 | 1 | 1 | 3 | 3 | 4 |
| Выпадение активной массы из пластин Shedding | 4 | 1 | 4 | 5 | 3 | 3 |
| Потеря жидкости Water loss | 1 | 4 | 5 | 4 | 3 | 2 |
| Разрушение активной массы Destruction of the active mass | 5 | 1 | 2 | 3 | 3 | 3 |
| Стратификация электролита Electrolyte stratification | 5 | 1 | 1 | 4 | 3 | 4 |

1 – очень низкая/very low; 2 – низкая/low; 3 – средняя/medium; 4 – высокая/high; 5 – очень высокая/very high.

Таким образом, совместное использование детализированной модели АСЭС с ВИЭ и АБ, дополненной многолетними метеорологическими рядами с определением основных режимных параметров с соблюдением ряда эксплуатационно-технических ограничений как по отдельным элементам, так и всей системы в целом с последующей категоризацией АБ, позволяет выделить максимально пригодные для данных условий типы (технологии) электрохимических накопителей энергии.

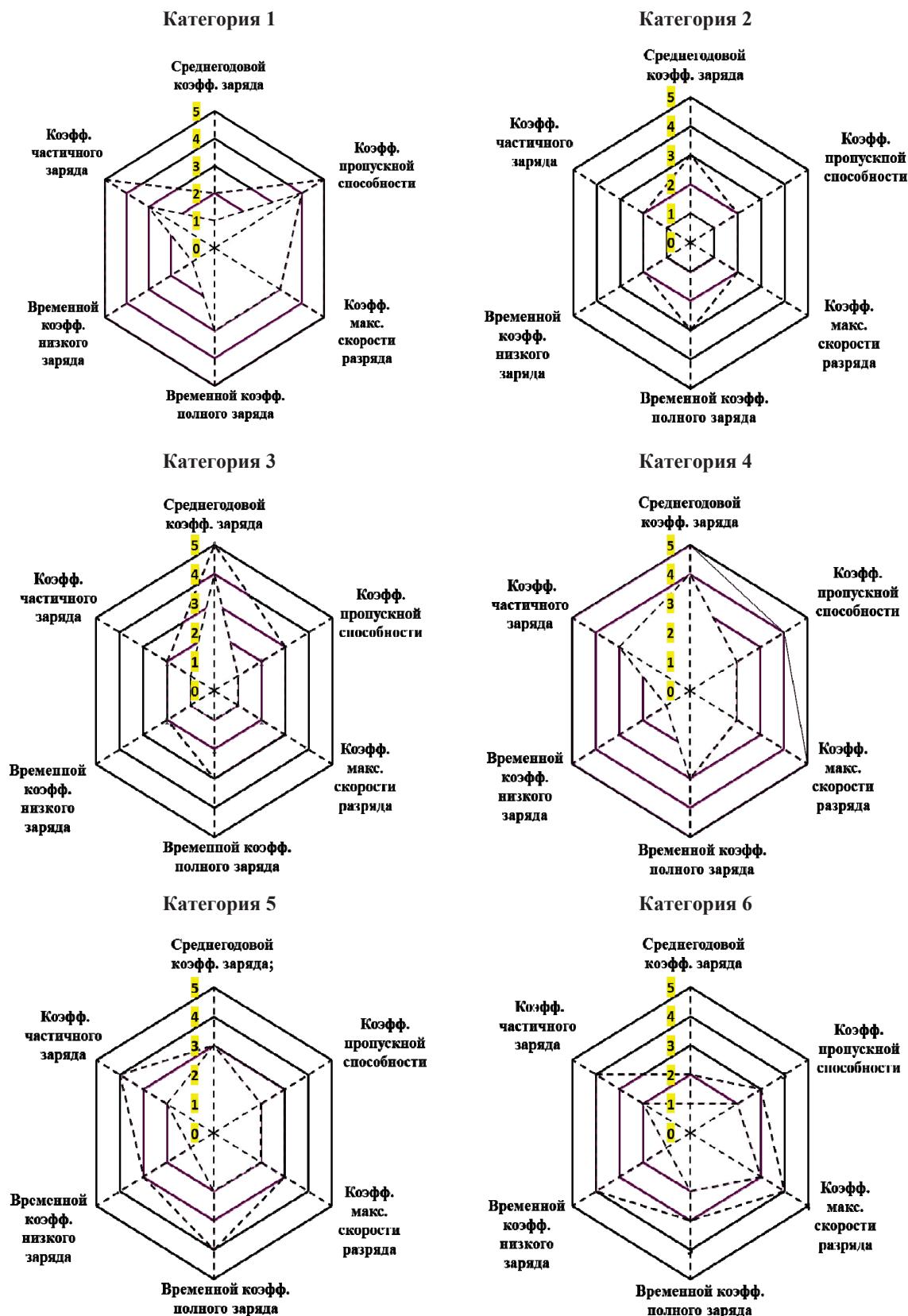
Программно-вычислительный комплекс

Представленный в рамках данной статьи подход реализован в ПВК «Выбор электрохимических накопителей энергии». ПВК состоит из следующих укрупненных информационных блоков, в которых выполняются следующие действия: группа 1 – сбор первоначальной (режимной) информации относительно каждого временного интервала (t), знакопеременной функции мощности $P_s(t)$, состояния заряда АБ $Q_{AB}(t)$ и величин тока заряда $I_{AB}^+(t)$ и разряда $I_{AB}^-(t)$; группа 2 – обработка полученной информации (формирование структуры обрабатываемого массива), передача подготовленного массива для дальнейших операций; группа 3 – определение коэффициентов K_{AB}^3 , K_{AB}^Π , $K_{AB}^{P-\max}$, $K_{AB}^{B-\max}$, $K_{AB}^{\Pi_3}$, $K_{AB}^{B-\min}$ с последующим расчетом оценок $M_{K_{AB}^3}$, $M_{K_{AB}^\Pi}$, $M_{K_{AB}^{P-\max}}$, $M_{K_{AB}^{B-\max}}$, $M_{K_{AB}^{\Pi_3}}$, $M_{K_{AB}^{B-\min}}$ и определением номера категории АБ; группа 4 – выполняет действия визуализации и представления полученных результатов процесса категоризации АБ; группа 5 – является базой данных матричного вида, в которой хранится информация о различных видах АБ.

Работу ПВК можно описать следующей укрупненной блок-схемой (рис. 5).

Объекты исследования

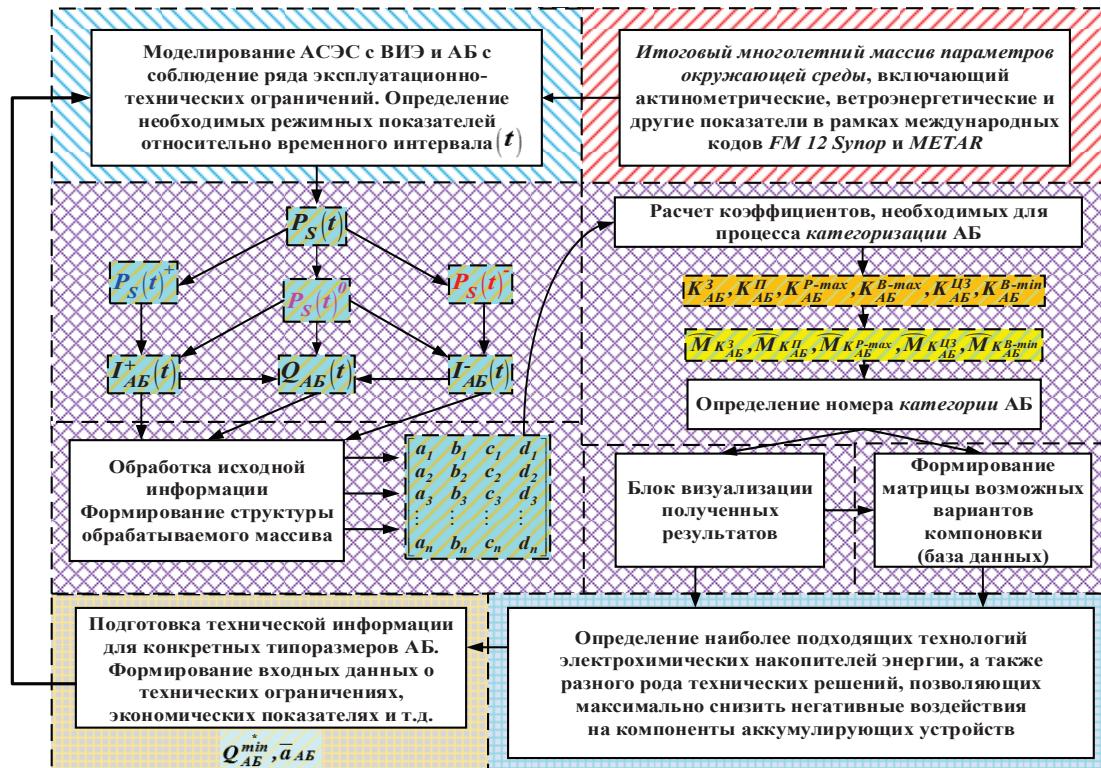
В качестве объектов исследования были выбраны три АСЭС, условно расположенные в различных природно-климатических зонах. При этом анализ природно-климатических показателей выполнялся с использованием метеорологических рядов,



*Розовым цветом показана рабочая область категории/Operating region of the category is shown in pink

Рис. 4. Диаграммы шести категорий АБ в зависимости от условий эксплуатации

Fig. 4. Diagrams of six categories of storage batteries, depending on the operating conditions



В работе использовались природно-климатические показатели, полученные для н.п. *Ном*, *Кодиак*, *Адак*, расположенных в американском штате Аляска. Природно-климатические показатели были определены автором в предыдущих исследованиях [34].

Численные результаты

- АСЭС № 1 – *Ном*. Согласно принятым допущениям в АСЭС имеется следующий первоначальный состав энергетического оборудования: ВЭУ – 4×30 (120) кВт; ДГ – 1×75. Согласно рис. 5, на первом этапе задается *условная АБ* с общезвестными ограничениями \bar{a}_{AB} . На рис. 7, 8 показаны характеристики генерации ВЭУ и ДГ при различных установленных емкостях АБ для АСЭС № 1 – *Ном*.

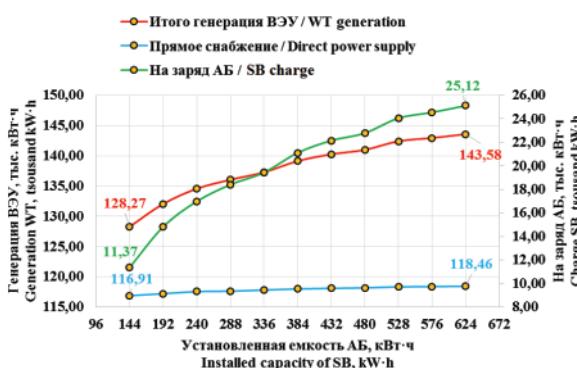


Рис. 7. Характеристики генерации ВЭУ при различных установленных емкостях АБ

Fig. 7. Characteristics of WT generation (4×30 kW) at various installed capacity of SB

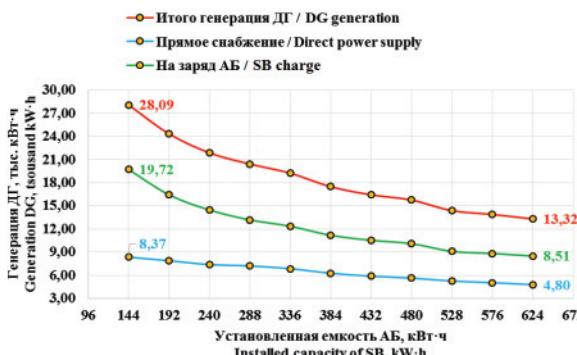


Рис. 8. Характеристики генерации ДГ при различных установленных емкостях АБ

Fig. 8. Characteristics of DG generation at various installed capacity of SB

Как видно из полученных результатов, увеличение установленной емкости АБ позволяет для АСЭС № 1 – *Ном* увеличить генерацию ВЭУ, повысить маневренность АСЭС, при этом существенно сократить число часов работы и соответственно генерацию ДГ.

При этом анализ оценок $\hat{M}_{K_{AB}^3}$, $\hat{M}_{K_{AB}^4}$, $\hat{M}_{K_{AB}^{P-\max}}$, $\hat{M}_{K_{AB}^{P-\min}}$, $\hat{M}_{K_{AB}^{H}}$, $\hat{M}_{K_{AB}^{B-\min}}$ относительно каждой итерации расчета имеет следующую картину (табл. 2).

Таблица 2. Численные значения оценок коэффициентов, характеризующих процесс категоризации АБ относительно установленной емкости АБ

Table 2. Numerical values of estimates coefficients characterizing SB categorization relative to the installed capacity of SB

| Уст. емкость АБ, кВт·ч Ins. capacity of SB, kW·h | Оценки/Estimates | | | | | |
|---|----------------------|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------------|
| | $\hat{M}_{K_{AB}^3}$ | $\hat{M}_{K_{AB}^4}$ | $\hat{M}_{K_{AB}^{P-\max}}$ | $\hat{M}_{K_{AB}^{P-\min}}$ | $\hat{M}_{K_{AB}^{H}}$ | $\hat{M}_{K_{AB}^{B-\min}}$ |
| 144 | 2 | 5 | 5 | 3 | 2 | 5 |
| 192 | 2 | 5 | 4 | 3 | 2 | 4 |
| 240 | 2 | 5 | 3 | 3 | 2 | 4 |
| 288 | 2 | 5 | 3 | 3 | 1 | 4 |
| 336 | 1 | 4 | 3 | 3 | 1 | 4 |
| 384 | 1 | 4 | 3 | 3 | 1 | 3 |
| 432 | 1 | 4 | 3 | 3 | 1 | 3 |
| 480 | 1 | 3 | 3 | 3 | 1 | 3 |
| 528 | 1 | 3 | 3 | 3 | 1 | 3 |
| 576 | 1 | 3 | 3 | 3 | 1 | 3 |
| 624 | 1 | 3 | 3 | 3 | 1 | 3 |

В целом полученные значения оценок показывают, что изменение установленной емкости АБ существенно влияет на режимные эксплуатационные параметры рассматриваемой системы. При этом увеличение установленной емкости АБ снижает численные значения полученных оценок, что существенно сказывается на процессе идентификации вектора оценок $\hat{M}_{K_{AB}^3}$, $\hat{M}_{K_{AB}^4}$, $\hat{M}_{K_{AB}^{P-\max}}$, $\hat{M}_{K_{AB}^{P-\min}}$, $\hat{M}_{K_{AB}^{H}}$, $\hat{M}_{K_{AB}^{B-\min}}$ с последующим выводом о номере категории.

В табл. 3 показано соответствие полученных численных значений оценок относительно каждой итерации расчета.

Таблица 3. Степень совпадения оценочных коэффициентов с референтными значениями относительно установленной емкости АБ и номера категории

Table 3. Degree of coincidence of the estimated coefficients with reference values relative to the installed capacity of SB and the category number

| Уст. емкость АБ, кВт·ч Ins. capacity of SB, kW·h | Номер категории/Category number | | | | | |
|---|---------------------------------|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 144 | | | | | | |
| 192 | | | | | | |
| 240 | | | | | | |
| 288 | | | | | | |
| 336 | | | | | | |
| 384 | | | | | | |
| 432 | | | | | | |
| 480 | | | | | | |
| 528 | | | | | | |
| 576 | | | | | | |
| 624 | | | | | | |

Результаты категоризации АБ для АСЭС № 1 – *Ном* позволяют сделать следующие выводы:

- при установленной емкости АБ от 144 до 432 кВт·ч режимы работы аккумулятора соответствуют 1 категории;
- начиная с 480 кВт·ч режимы работы АБ соответствуют 6 категории;
- АСЭС № 2 – *Кодиак*.

С учетом озвученных допущений было принято, что первоначальный состав генерирующего оборудования составляет 100 кВт ФЭП и ДГ – 1?75. При этом моделирование рассматриваемой системы для метеорологических условий АСЭС № 2 – Кодиак показывает следующий характер (рис. 9, 10).

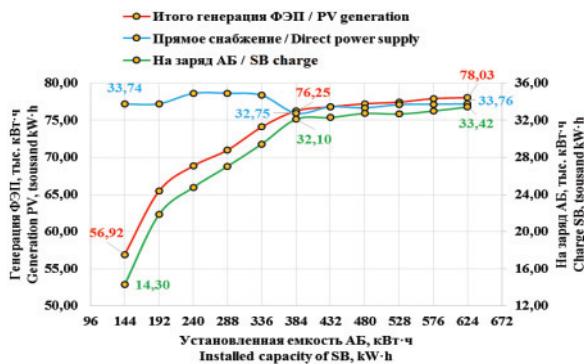


Рис. 9. Характеристики генерации ФЭП при различных установленных емкостях АБ

Fig. 9. Characteristics of PV generation (100 kW) at various installed capacity of SB

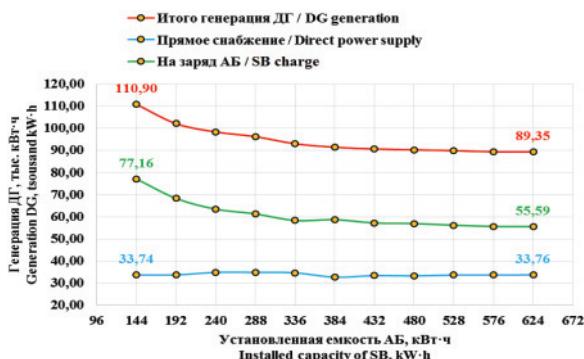


Рис. 10. Характеристики генерации ДГ при различных установленных емкостях АБ

Fig. 10. Characteristics of DG generation at various installed capacity of SB

В табл. 4 показаны полученные оценки относительно различных величин установленных емкостей АБ.

В табл. 5 показано соответствие полученных численных значений оценок относительно каждой итерации расчета.

Полученные результаты показывают, что использование АБ в АСЭС № 2 – Кодиак начиная от 144 до 624 кВт·ч имеют 100 % совпадение с 1 категорией.

- АСЭС № 3 – Адак.

Согласно исходному сценарию, имеется следующий состав генерирующего оборудования: ВЭУ – 4×30 (120) кВт; ФЭП – 50 кВт; ДГ – 1×75.

На рис. 11–13 показаны характеристики генерации ВЭУ, ФЭП и ДГ при различной установленной емкости АБ.

В табл. 6 показаны полученные оценки относительно различных величин установленных емкостей АБ.

Таблица 4. Численные значения оценок коэффициентов, характеризующих процесс категоризации АБ относительно установленной емкости АБ

Table 4. Numerical values of estimates coefficients characterizing SB categorization relative to the installed capacity of SB

| Уст. емкость АБ, кВт·ч Ins. capacity of SB, kW·h | Оценки/Estimates | | | | | |
|---|--------------------------|--------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| | $\widehat{M}_{K_{AB}^3}$ | $\widehat{M}_{K_{AB}^1}$ | $\widehat{M}_{K_{AB}^{P-\max}}$ | $\widehat{M}_{K_{AB}^{B-\max}}$ | $\widehat{M}_{K_{AB}^{B-\min}}$ | $\widehat{M}_{K_{AB}^{103}}$ |
| 144 | 1 | 5 | 5 | 4 | 3 | 4 |
| 192 | 1 | 5 | 5 | 4 | 3 | 5 |
| 240 | 1 | 5 | 5 | 4 | 2 | 5 |
| 288 | 1 | 5 | 5 | 4 | 2 | 4 |
| 336 | 1 | 5 | 5 | 4 | 2 | 4 |
| 384 | 1 | 5 | 5 | 4 | 2 | 4 |
| 432 | 1 | 5 | 5 | 4 | 2 | 4 |
| 480 | 1 | 5 | 5 | 4 | 2 | 4 |
| 528 | 1 | 5 | 4 | 4 | 2 | 4 |
| 576 | 1 | 5 | 4 | 4 | 2 | 4 |
| 624 | 1 | 5 | 4 | 4 | 2 | 4 |

Таблица 5. Степень совпадения оценочных коэффициентов с референтными значениями относительно установленной емкости АБ и номера категории

Table 5. Degree of coincidence of the estimated coefficients with reference values relative to the installed capacity of SB and the category number

| Уст. емкость АБ, кВт·ч Ins. capacity of SB, kW·h | Номер категории/Category number | | | | | |
|---|---------------------------------|----|---|---|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 144 | | 17 | 0 | | 50 | 50 |
| 192 | | | | | 33 | 33 |
| 240 | | | | | | |
| 288 | | | | | | |
| 336 | | | | | | |
| 384 | | | | | | |
| 432 | | | | | | |
| 480 | | | | | | |
| 528 | | | | | | |
| 576 | | | | | | |
| 624 | | | | | | |

Таблица 6. Численные значения оценок коэффициентов, характеризующих процесс категоризации АБ относительно установленной емкости АБ

Table 6. Numerical values of coefficients estimates characterizing the process of categorization of SB relative to the installed capacity of SB

| Уст. емкость АБ, кВт·ч Ins. capacity of SB, kW·h | Оценки/Estimates | | | | | |
|---|--------------------------|--------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| | $\widehat{M}_{K_{AB}^3}$ | $\widehat{M}_{K_{AB}^1}$ | $\widehat{M}_{K_{AB}^{P-\max}}$ | $\widehat{M}_{K_{AB}^{B-\max}}$ | $\widehat{M}_{K_{AB}^{B-\min}}$ | $\widehat{M}_{K_{AB}^{103}}$ |
| 144 | 2 | 5 | 5 | 3 | 2 | 4 |
| 192 | 2 | 5 | 5 | 3 | 2 | 4 |
| 240 | 2 | 5 | 4 | 3 | 2 | 4 |
| 288 | 2 | 5 | 3 | 3 | 1 | 4 |
| 336 | 2 | 5 | 3 | 3 | 1 | 4 |
| 384 | 1 | 4 | 3 | 3 | 1 | 4 |
| 432 | 1 | 4 | 3 | 3 | 1 | 4 |
| 480 | 1 | 4 | 3 | 3 | 1 | 4 |
| 528 | 1 | 3 | 3 | 3 | 1 | 3 |
| 576 | 1 | 3 | 3 | 3 | 1 | 3 |
| 624 | 1 | 3 | 3 | 3 | 1 | 3 |

В табл. 7 показано соответствие полученных численных значений оценок относительно каждой итерации расчета.

Таблица 7. Степень совпадения оценочных коэффициентов с референтными значениями относительно установленной емкости АБ и номера категории

Table 7. Degree of coincidence of the estimated coefficients with reference values relative to the installed capacity of the SB and the category number

| Уст. емкость АБ, кВт·ч Ins. capacity of SB, kW·h | Номер категории/Category number | | | | | |
|---|---------------------------------|-----|----|----|----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| | % | | | | | |
| 144 | | | | | | |
| 192 | | | | | | |
| 240 | | | 33 | 67 | 50 | 67 |
| 288 | | 100 | | | | |
| 336 | | | 50 | | | |
| 384 | | | | 67 | | |
| 432 | | | | | 67 | |
| 480 | | | | | | 83 |
| 528 | | 83 | | | 83 | |
| 576 | | | 67 | | 83 | |
| 624 | | | | | | 100 |

Результаты категоризации АБ для АСЭС № 3 – Адак позволяют сделать следующие выводы:

- при установленной емкости АБ от 144 до 480 кВт·ч режимы работы аккумулятора соответствуют 1 категории;
- начиная с 528 кВт·ч режимы работы АБ соответствуют 6 категории.

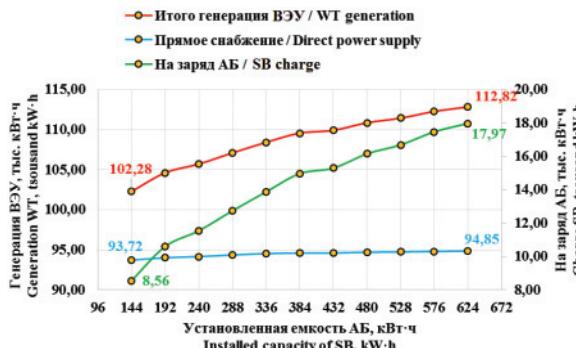


Рис. 11. Характеристики генерации ВЭУ при различных установленных емкостях АБ

Fig. 11. Characteristics of WT generation (4×30 kW) at various installed capacity of SB

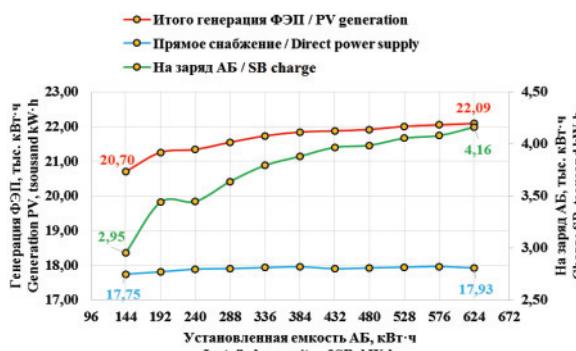


Рис. 12. Характеристики генерации ФЭП при различных установленных емкостях АБ

Fig. 12. Characteristics of PV generation (50 kW) at various installed capacity of SB

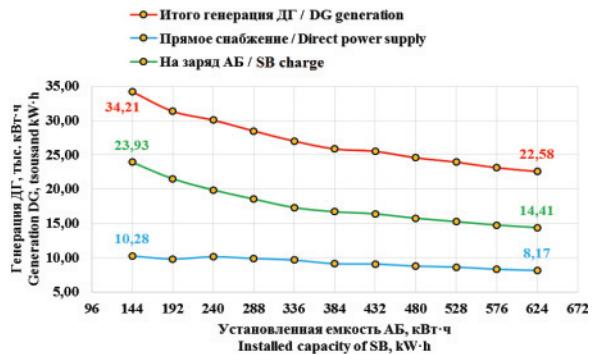


Рис. 13. Характеристики генерации ДГ при различных установленных емкостях АБ

Fig. 13. Characteristics of DG generation at various installed capacity of SB

Обсуждение полученных результатов

Полученные результаты показывают, что в зависимости от состава генерирующего оборудования и установленной емкости АБ существенно изменяются численные значения расчетных коэффициентов и оценок, отвечающих за номер полученной категории и как следствие потенциально возможных технических решений при данных условиях эксплуатации.

АСЭС № 1 – Ном. Исходя из расчетных значений коэффициентов и оценок можно отметить, что с увеличением установленной емкости АБ существенно снижаются численные значения как временных коэффициентов низкого заряда и полного заряда АБ ($K_{AB}^{B-min}, K_{AB}^{B-max}$), так и коэффициент максимальной скорости разряда (K_{AB}^{P-max}).

Полученные оценки, характеризующие режимы работы АБ, начиная с установленной емкости от 144 до 432 кВт·ч, соответствуют 1 категории, которая сопровождается тяжелой/необратимой сульфацией, выпадением и разрушением активной массы, а также кислотной стратификацией. При установленной емкости АБ 480 кВт·ч и более коэффициент пропускной способности уменьшается до среднего уровня, что соответствует 6 категории, которая по своей специфике является начальным приближением 1 категории.

АСЭС № 2 – Кодиак. Результат категоризации АБ показывает, что на протяжении всего цикла расчетов режимы работы соответствуют 1 категории. На полученный результат в первую очередь влияют режимы работы элементов генерации, а именно ФЭП, которые имеют ярко выраженный циклический характер. В таких условиях численные значения коэффициентов $K_{AB}^P, K_{AB}^{P-max}, K_{AB}^{B-max}, K_{AB}^{B-min}$ имеют достаточно высокий уровень, что, несомненно, увеличивает требования к выбираемым типам АБ для данных условий эксплуатации.

АСЭС № 3 – Адак. В целом полученные результаты показывают, что процесс категоризации АБ при совместном использовании энергии ветра и Солнца совпадает с результатами, полученными для АСЭС № 1 – Ном с небольшим сдвигом в стороны

ну увеличения установленной емкости АБ для *1 категории*. Следовательно, анализ природно-климатических показателей для н.п. *Адак* показывает, что скорость ветра на высоте установки лопастей ветрогенератора (30 м) имеет *среднемесячные* значения 9–11 м/с в *зимне-осенний* и 7–8 м/с в *весенне-летний* периоды, что позволяет сделать вывод о главенствующей роли ВЭУ в данном примере.

Таким образом, на основании полученных категорий АБ для *ACЭС № 1 – Ном* и *ACЭС № 3 – Адак* в пределах суммарной установленной емкости АБ от 144 до 432 и 480 кВт·ч предлагается использовать *свинцово-карбоновые* АБ, в которых существенно снижается влияние негативных воздействий, присущих *1 категории*. Кроме того, для данной категории можно использовать АБ с *трубчатыми* (*OPzS*, *OPzV*) электродами и наполнением как *жидким*, так и *гелевым* электролитом. При использовании жидкого электролита настоятельно рекомендуется использовать *систему циркуляции электролита*. При увеличении установленной емкости АБ выше 432 и 480 кВт·ч, предлагается использовать только технологии *OPzS* и *OPzV*. Для *ACЭС № 2 – Кодиак* рекомендуется использовать так называемые «*тяжелые*» аккумулирующие устройства, к которым относятся тип *свинцово-карбоновых* АБ. Как отмечалось ранее, основные процессы деградации АБ, такие как *тяжелая/необратимая сульфация, выпадение и разрушение активной массы* из пластин, а также *кислотная стратификация*, снижаются более чем на 75 %. Также одним из возможных вариантов компоновки аккумулирующего звена являются *гелевые* АБ типа *OPzV*.

Выводы

Результаты, полученные при выполнении данного исследования, демонстрируют состоятельность предложенной методики, направленной на интеграцию процесса категоризации электрохимических накопителей энергии при решении оптимизации состава оборудования АСЭС, использующих ВИЭ.

По результатам исследования были получены численные значения коэффициентов K_{AB}^3 , K_{AB}^Π , $K_{AB}^{P-\max}$, $K_{AB}^{B-\max}$, $K_{AB}^{B-\min}$, необходимых для определения оценок $\hat{M}_{K_{AB}^3}$, $\hat{M}_{K_{AB}^\Pi}$, $\hat{M}_{K_{AB}^{P-\max}}$, $\hat{M}_{K_{AB}^{B-\max}}$, $\hat{M}_{K_{AB}^{B-\min}}$, на основании которых определяется номер категории АБ. Анализ полученных численных значений оценок в зависимости от суммарной установленной емкости показывает, что происходит изменение технических требований к АБ. Данное положение наглядно демонстрируется в примерах *ACЭС № 1 – Ном* и *ACЭС № 3 – Адак*. Следовательно, использование предложенной в рамках данной статьи методики позволяет определить такие типы АБ и технические решения, которые позволяют снизить негативные воздействия на внутренние элементы и составные части АБ.

Стоит отметить, что в рамках данного исследования автор статьи с первую очередь акцентировал внимание на процессе моделирования режимных

показателей АБ относительно каждого временного интервала (t) с последующим определением численных значений расчетных коэффициентов и оценок, отвечающих за конечный результат категоризации АБ. Таким образом, дальнейшее решение задачи оптимизации состава оборудования может производиться на основании полученных ранее обоснованных технических решений с определением экономической эффективности и выбором соответствующего варианта компоновки.

Кроме того, состоятельность предложенной методики подтверждается тем, что полученные численные результаты *категоризации АБ* подтверждаются данными с реальных АСЭС с ВИЭ и АБ [23]. Режимные показатели реальных комплексов генерации, использующих ФЭП-ДГ-АБ, в большинстве случаев относятся к *1 категории*, что подтверждается примером *ACЭС № 2 – Кодиак*. В то же время использование ВЭУ (в т. ч. ВЭУ-ФЭП) может существенно влиять на процесс категоризации в зависимости от суммарной установленной емкости АБ (табл. 3, 7).

Следует отметить, что данные о минимально допустимом заряде АБ Q_{AB}^{min} принимались по спецификации завода изготовителя (20 % от установленной емкости для типов *OPzS* и *OPzV* и 30 % для *свинцово-карбоновых* АБ). Эти соотношения могут существенно варьироваться, что, несомненно, отразится на частоте включения резервного источника (ДГ), а численные значения коэффициентов K_{AB}^3 , K_{AB}^Π , $K_{AB}^{P-\max}$, $K_{AB}^{B-\max}$, $K_{AB}^{B-\min}$, не необходимых для определения оценок $\hat{M}_{K_{AB}^3}$, $\hat{M}_{K_{AB}^\Pi}$, $\hat{M}_{K_{AB}^{P-\max}}$, $\hat{M}_{K_{AB}^{B-\max}}$, $\hat{M}_{K_{AB}^{B-\min}}$, будут изменяться с учетом данных условий.

Такое положение является отдельным достаточно сложным исследованием, не входящим в рамки текущей статьи.

Стоит отметить, что точность полученных результатов напрямую зависит от уровня детализации используемых математических моделей АСЭС, анализа параметров окружающей среды, режимных показателей рассматриваемой системы и т. д.

Заключение

Главная цель статьи направлена на повышение качества решения задачи оптимизации состава оборудования АСЭС, использующих ВИЭ и АБ. Представлен подробный обзор основных задач, возникающих при нахождении оптимального состава оборудования. Произведен графоаналитический анализ структуры АСЭС, где полученный результат позволяет сделать вывод о важном значении АБ, выступающих в роли стабилизирующего элемента автономной энергетической системы.

Представлено математическое описание *знакопеременной функции* мощности системы $P_s(t)$ с разбивкой на положительную $P_s(t)^+$ и отрицательную $P_s(t)^-$ зоны, характеризующие процессы заряда и разряда АБ относительно каждого временного интервала (t) с соблюдением ряда эксплуатационно-технических ограничений \bar{a}_{AB} . Описаны основ-

ные процессы деградации активной массы АБ, возникающие в различных типах электрохимических накопителей энергии. Представлен процесс категоризации АБ в зависимости от условий эксплуатации с описанием основных расчетных коэффициентов с последующим построением шести типовых диаграмм *категорий* АБ.

Предложена методика интеграции процесса *категоризации* АБ в задачи оптимизации состава оборудования, использующего ВИЭ и АБ. В рамках данной методики было предложено моделировать АСЭС для условий *типичной* АБ с определением основных режимных показателей системы для всего периода лет метеорологических наблюдений с последующим определением численных значений расчетных оценок $M_{K_{AB}^n}$, $\hat{M}_{K_{AB}^n}$, $\hat{M}_{K_{AB}^{P-\max}}$, $\hat{M}_{K_{AB}^{B-\max}}$, $M_{K_{AB}^{IZ}}$, $\hat{M}_{K_{AB}^{B-\min}}$, отвечающих за номер категории АБ.

В ходе работы были исследованы *три* АСЭС, расположенные в Американском штате Аляска, с различными составами генерирующего оборудования, где на основании процесса *категоризации* АБ были получены численные значения категорий, что в дальнейшем позволило сформировать *матрицу рассматриваемого оборудования*. Таким образом, на основании полученной категории выбираются такие технические решения и типы АБ, в которых процессы деградации активной массы сведены к минимальным значениям. В дальнейшем полученные технические решения и типы электрохимических накопителей энергии используются для определения показателя целевой функции *LCOE* (руб/кВт·ч), где минимальное значение *нормированной стоимости электрической энергии* будет являться оптимальным решением при данных условиях. При этом автор статьи уверен, что дополнительно необходимо учитывать количе-

ство замен АБ в течение всего срока эксплуатации исходя из их пропускной способности, количества циклов *заряд/разряд* и предельного количества циклов с учетом минимально допустимого состояния заряда АБ.

Реализация на практике

Описанная в рамках данной статьи методика применялась при реализации *солнечно-дизельного* комплекса генерации с АБ «*Верхняя Амга*», расположенного в Алданском районе Республики Саха (Якутия). По итогам решения задачи оптимизации состава оборудования с учетом процесса *категоризации* было получено, что в рамках данного проекта необходимо использовать *свинцово-карбоновые* АБ. В октябре 2016 г. станция была введена в эксплуатацию со следующими значениями установленной мощности: ФЭП – 36 кВт, сетевой инвертер – 36 кВт, батарейный инвертер – 24 кВт, свинцово-карбоновые АБ – 144 кВт·ч.

Дальнейшие исследования

В первую очередь автор статьи направит свои силы на исследование влияния неопределенности нагрузочной характеристики потребителя на процесс категоризации АБ. Кроме того, автор статьи отмечает, что представленная методика требует дополнительного учета количества замен АБ в течение всего срока эксплуатации, что, несомненно, повлияет на результат оптимизации состава оборудования.

Исследование выполнено в рамках проекта СО РАН: III.17.1.1. Системный анализ влияния показателей технологических процессов и конструкционных материалов на характеристики перспективных энергетических установок рег. № АААА-А17-117030310433-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. «РАО ЕЭС Востока». URL: <http://www.rao-esv.ru/map> (дата обращения: 25.05.2018).
2. Cristóbal-Monreal I.R., Dufo-López R. Optimisation of photovoltaic-diesel-battery stand-alone systems minimising system weight // Energy Conversion and Management. – 2014. – V. 29. – P. 151–157.
3. Li F.F., Qiu J. Multi-objective optimization for integrated hydro-photovoltaic power system // Applied Energy. – 2016. – V. 167. – P. 377–384.
4. Оценка целесообразности применения фотоэлектрических установок для электроснабжения удаленных потребителей в климатических условиях Севера Российской Федерации / М.А. Сурков, С.Г. Обухов, И.А. Плотников, Л.П. Сумарокова, М.М. Попов, С.А. Байдали // Интернет-журнал «Науковедение». – 2016. – № 4. – С. 1–13. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/97TVN416.pdf> (дата обращения: 25.05.2018).
5. Саврасов Ф.В., Лукутин Б.В. Расчет эффективности использования автономных систем электроснабжения с фотоэлектростанциями в условиях Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 6. – С. 17–21.
6. Merei G., Berger C., Sauer D.U. Optimization of an off-grid hybrid PV-Wind-Diesel system with different battery technologies using genetic algorithm // Solar Energy. – 2013. – V. 97. – P. 460–473.
7. Modeling and optimization of batteryless hybrid PV (photovoltaic)/Diesel systems for off-grid applications / D. Tsuanyo, Y. Azoumah, D. Aussel, P. Neveu // Energy. – 2015. – V. 86. – P. 152–163.
8. Optimization of a Multi-source System with Renewable Energy Based on Ontology / D. Saba, F.Z. Laallam, A.E. Hadidi, B. Berbaoui // Energy Procedia. – 2015. – V. 74. – P. 608–615.
9. Sizing and simulation of a photovoltaic-wind energy system using batteries, applied for a small rural property located in the south of Brazil / C.E.C. Nogueira, M.L. Vidotto, R.K. Niedzialkoski, S.N. Melegari de Souza, L.I. Chaves, T. Edwiges, D. Bentes dos Santos, I. Werncke // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – V. 29. – P. 151–157.
10. Optimal sizing of a hybrid grid-connected photovoltaic and wind power system / A. González, J-R. Riba, A. Rius, R. Puig // Applied Energy. – 2015. – V. 154. – P. 752–762.
11. Bala B.K., Siddique S. A. Optimal design of a PV-diesel hybrid system for electrification of an isolated island – Sandwip in Bangladesh using genetic algorithm // Energy for Sustainable Development. – 2009. – V. 13. – P. 137–142.
12. Карамов Д.Н. Математическое моделирование автономной системы электроснабжения, использующей возобновляемые источники энергии // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – Т. 104. – № 9. – С. 133–140.
13. Methodology to Size an Optimal Stand-Alone PV/wind/diesel/battery System Minimizing the Levelized cost of Energy and the

- Emissions / B.O. Bilal, V. Sambou, C.M.F. Kebe, P.A. Ndiaye, M. Ndongo // Energy Procedia. – 2014. – V. 195. – P. 1636–1647.
14. Branker K., Pathak M.J.M., Pearce J.M. A review of solar photovoltaic leveled cost of electricity // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2011. – V. 15. – P. 4470–4482.
15. Calculation of leveled costs of electricity for various electrical energy storage systems / M. Obi, S.M. Jensen, J.B. Ferris, R.B. Bass // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – V. 67. – P. 908–920.
16. Карамов Д.Н. Оптимизация состава оборудования автономных энергетических комплексов, использующих возобновляемые источники и накопители энергии: дис. ... канд. техн. наук. – Иркутск, 2016. – 152 с.
17. Marchenko O.V., Solomin S.V. Modeling of hydrogen and electrical energy storages in wind/PV energy system on the Lake Baikal coast // International Journal of Hydrogen Energy. – 2017. – V. 42. – P. 9361–9370.
18. Marchenko O.V. Mathematical modeling and economic efficiency assessment of autonomous energy systems with production and storage of secondary energy carriers // International Journal of Low-Carbon Technologies. – 2010. – V. 5. – P. 250–255.
19. Dufo-López R. Optimisation of size and control of grid-connected storage under real time electricity pricing conditions // Applied Energy. – 2015. – V. 140. – P. 395–408.
20. Dufo-López R., Cristóbal-Monreal I.R., Yusta J.M. Optimisation of PV-wind-diesel-battery stand-alone systems to minimise cost and maximise human development index and job creation // Renewable Energy. – 2016. – V. 84. – P. 280–293.
21. Dufo-López R., Lujano-Rojas J.M., Bernal-Agustín J.L. Comparison of different lead-acid battery lifetime prediction models for use in simulation of stand-alone photovoltaic systems // Applied Energy. – 2014. – V. 115. – P. 242–253.
22. Schiffer J., Sauer D.U., Bindner H., Cronin T., Lundsager P., Kaiser R. Model prediction for ranking lead-acid batteries according to expected lifetime in renewable energy systems and autonomous power-supply systems // Journal of Power Sources. – 2007. – V. 168. – P. 66–78.
23. Operating conditions of batteries in off-grid renewable energy systems / V. Svoboda, H. Wenzl, R. Kaiser, A. Jossen, I. Baring-Gould, J. Manwell, P. Lundsager, H. Bindner, T. Cronin, P. Nørgard, A. Ruddell, A. Perujo, K. Douglas, C. Rodrigues, A. Joyce, S. Tselepis, N. van der Borg, F. Nieuwenhout, N. Wilmet, F. Mattera, D.U. Sauer // Solar Energy. – 2007. – V. 81. – P. 1409–1425.
24. Воропай Н.И. Теория систем для электроэнергетиков. – Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 2000. – 273 с.
25. Лукутин Б.В., Лукутин О.Б., Шандарова Е.Б. Энергоэффективные системы генерирования электроэнергии для автономных ветроэлектростанций // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 7. – С. 203–206.
26. Обухов С.Г., Плотников И.А. Имитационная модель режимов работы автономной фотоэлектрической станции с учетом реальных условий эксплуатации // Известия томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 6. – С. 38–51.
27. Применение буферных накопителей энергии для повышения энергоэффективности ветродизельных электростанций / Б.В. Лукутин, С.Г. Обухов, Е.А. Шутов, З.П. Хошнау // Электротехничество. – 2012. – № 6. – С. 24–29.
28. Durmus E., Kilic O. Comparative evaluation of different power management strategies of a stand-alone PV/Wind/PEMFC hybrid power system // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2012. – V. 34. – P. 81–89.
29. Analysis of the performance parameters of lead/acid batteries in photovoltaic systems / D.U. Sauer, M. Bächler, G. Bopp, W. Höhe, J. Mittermeier, P. Sprau, B. Willer, M. Wollny // Journal of Power Sources. – 1997. – V. 64. – P. 197–201.
30. Sauer D.U., Garche J. Optimum battery design for applications in photovoltaic systems – theoretical considerations // Journal of Power Sources. – 2001. – V. 95. – P. 130–134.
31. Wagner R., Sauer D.U. Charge strategies for valve-regulated lead/acid batteries in solar power applications // Journal of Power Sources. – 2001. – V. 95. – P. 141–152.
32. Moseley P.T., Garche J. Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing. 1st ed. – Amsterdam: Elsevier, 2014. – 492 p.
33. Карамов Д.Н. Математическое моделирование солнечной радиации с использованием многолетних метеорологических рядов находящихся в открытом доступе // Известия томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 6. – С. 28–38.
34. Карамов Д.Н. Формирование исходных метеорологических массивов с использованием многолетних рядов FM 12 Synop и METAR в системных энергетических исследованиях // Известия томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 1. – С. 69–88.

Поступила 04.06.2018 г.

Информация об авторах

Карамов Д.Н., кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории исследования энергетических установок № 71 отдела теплосиловых систем № 70 Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук; доцент Иркутского национального исследовательского технического университета.

UDC 620.9:621.355.2:621:355.5:621.354.324.1:621.311.2

INTEGRATION OF THE STORAGE BATTERY CATEGORIZATION PROCESS INTO THE TASK OF OPTIMIZING THE EQUIPMENT OF STAND-ALONE ENERGY SYSTEMS WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES

Dmitriy N. Karamov^{1,2},
dmitriy.karamov@mail.ru

¹ Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Science,
130, Lermontov street, Irkutsk, 664033, Russia.

² Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russia.

This research arises from the need to enhance the accuracy of optimizing the equipment of stand-alone energy systems with renewable energy sources and storage batteries.

Objective. The paper aims to demonstrate the feasibility of integrating the storage battery categorization process into the task of optimizing the equipment of stand-alone energy systems with renewable energy sources, to identify factors affecting the storage battery categorization process and, finally, to summarize and conduct a detailed analysis of the information obtained.

Methods. The theoretical framework for this paper borrows from the systems theory and commonly known mathematical models that make it possible to configure the main operating parameters of stand-alone energy systems with renewable energy sources and storage batteries. Extensive use is made of actinometric, wind energy and many other natural and climatic indicators obtained by processing long-term meteorological series at weather stations such as Nome, Kodiak and Adak (Alaska, USA).

The results. A methodology was suggested to integrate the storage battery categorization process into the task of optimizing the equipment of stand-alone energy systems using renewable energy sources. The paper presents the research outcomes produced by three conditional stand-alone energy systems using renewable sources and storage batteries. The research findings pointed to the relationship between generation equipment and the total storage battery capacity. An analysis of the research findings was made, followed by appropriate conclusions, their visual representation and assessment of their reliability and potential use in optimization-focused research on stand-alone energy systems.

Key words:

Renewable energy sources, battery storage categorization, battery storage degradation, system studies, optimization.

The research was carried out within the project of SB RAS: III.17.1.1. System analysis of the effect of process flow and engineering material parameters on characteristics of prospecting power plants reg. no. AAA-A17-117030310433-6

REFERENCES

1. «RAO EES Vostoka» [«RAO Energy Systems of the East»]. Available at: <http://www.rao-esv.ru/map> (accessed 25 May 2018).
2. Cristóbal-Monreal I.R., Dufo-López R. Optimisation of photovoltaic–diesel–battery stand-alone systems minimising system weight. *Energy Conversion and Management*, 2014, vol. 29, pp. 151–157.
3. Li F.F., Qiu J. Multi-objective optimization for integrated hydro-photovoltaic power system. *Applied Energy*, 2016, vol. 167, pp. 377–384.
4. Surkov M.A., Obukhov S.G., Plotnikov I.A., Sumarokova L.P., Popov M.M., Baydali S.A. Feasibility assessment of photovoltaic plants for power supply of remote customers in the climatic conditions of Northern Russia. *Naukovedenie*, 2016, vol. 8, no. 4, pp. 1–13. In Rus. Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/97TVN416.pdf> (accessed 25 May 2018).
5. Savrasov F.V., Lukutin B.V. Calculation of the efficiency of the use of autonomous power supply systems with photoelectric stations in the conditions of Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 6, pp. 17–21. In Rus.
6. Merei G., Berger C., Sauer D.U. Optimization of an off-grid hybrid PV–Wind–Diesel system with different battery technologies using genetic algorithm. *Solar Energy*, 2013, vol. 97, pp. 460–473.
7. Tsuanyo D., Azoumah Y., Aussel D., Neveu P. Modeling and optimization of batteryless hybrid PV (photovoltaic)/Diesel systems for off-grid applications. *Energy*, 2015, vol. 86, pp. 152–163.
8. Saba D., Laallam F.Z., Hadidi A.E., Berbaoui B. Optimization of a Multi-Source System with Renewable Energy Based on Ontology. *Energy Procedia*, 2015, vol. 74, pp. 608–615.
9. Nogueira C.E.C., Vidotto M.L., Niedzialkoski R.K., De Souza S.N.M., Chaves L.I., Edwiges T., Dos Santos D.B., Werncke I. Sizing and simulation of a photovoltaic–wind energy system using batteries, applied for a small rural property located in the south of Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 29, pp. 151–157.
10. González A., Riba J.-R., Rius A., Puig R. Optimal sizing of a hybrid grid-connected photovoltaic and wind power system. *Applied Energy*, 2015, vol. 154, pp. 752–762.
11. Bala B.K., Siddique S. A. Optimal design of a PV-diesel hybrid system for electrification of an isolated island – Sandwip in Bangladesh using genetic algorithm. *Energy for Sustainable Development*, 2009, vol. 13, pp. 137–142.
12. Karamov D.N. Mathematical modelling of an autonomous power supply system using renewable energy sources. *Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2015, vol. 104, no. 9, pp. 133–140. In Rus.
13. Bilal B.O., Sambou V., Kebe C.M.F., Ndiaye P.A., Ndongo M. Methodology to Size an Optimal Stand-Alone PV/wind/diesel/battery System Minimizing the Levelized cost of Energy and the CO₂ Emissions. *Energy Procedia*, 2014, vol. 195, pp. 1636–1647.
14. Branker K., Pathak M.J.M., Pearce J.M. A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, vol. 15, pp. 4470–4482.

15. Obi M., Jensen S.M., Ferris J. B., Bass R. B. Calculation of leveled costs of electricity for various electrical energy storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 67, pp. 908–920.
16. Karamov D.N. *Optimizasiya sostava oborudovaniya avtonomnykh energeticheskikh kompleksov, ispolzuyushchikh vozobnovlyayemye istochniki i nakopiteli energii*. Avtoreferat Kand. nauk [Optimization of the equipment composition of autonomous energy complexes using renewable sources and energy storages. Cand. Diss]. Irkutsk, 2016. 152 p.
17. Marchenko O.V., Solomin S.V. Modeling of hydrogen and electrical energy storages in wind/PV energy system on the Lake Baikal coast. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, vol. 42, pp. 9361–9370.
18. Marchenko O.V. Mathematical modeling and economic efficiency assessment of autonomous energy systems with production and storage of secondary energy carriers. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 2010, vol. 5, pp. 250–255.
19. Dufo-López R. Optimisation of size and control of grid-connected storage under real time electricity pricing conditions. *Applied Energy*, 2015, vol. 140, pp. 395–408.
20. Dufo-López R., Cristóbal-Monreal I.R., Yusta J. M. Optimisation of PV-wind-diesel-battery stand-alone systems to minimise cost and maximise human development index and job creation. *Renewable Energy*, 2016, vol. 84, pp. 280–293.
21. Dufo-López R., Lujano-Rojas J. M., Bernal-Agustín J. L. Comparison of different lead-acid battery lifetime prediction models for use in simulation of stand-alone photovoltaic systems. *Applied Energy*, 2014, vol. 115, pp. 242–253.
22. Schiffer J., Sauer D. U., Bindner H., Cronin T., Lundsager P., Kaiser R. Model prediction for ranking lead-acid batteries according to expected lifetime in renewable energy systems and autonomous power-supply systems. *Journal of Power Sources*, 2007, vol. 168, pp. 66–78.
23. Svoboda V., Wenzl H., Kaiser R., Jossen A., Baring-Gould I., Manwell J., Lundsager P., Bindner H., Cronin T., Nørgard P., Ruddell A., Perujo A., Douglas K., Rodrigues C., Joyce A., Tselepis S., van der Borg N., Nieuwenhout F., Wilmot N., Mattera F., Sauer D. U. Operating conditions of batteries in off-grid renewable energy systems. *Solar Energy*, 2007, vol. 81, pp. 1409–1425.
24. Voropai N.I. *Teoriya sistem dlya elektroenergetikov* [Theory of systems for electric power industry]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2000. 273 p.
25. Lukutin B.V., Lukutin O.B., Shandarova E.B. Energy-efficient power generation systems for autonomous wind stations. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2005, vol. 308, no. 7, pp. 203–206. In Rus.
26. Obukhov S.G., Plotnikov I.A. Simulation model of operation of autonomous photovoltaic plant under actual operating conditions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 6, pp. 38–51. In Rus.
27. Lukutin B.V., Obukhov S.G., Shutov E.A., Khoshnau Z.P. Primenenie bufernnykh nakopiteley energii dlya povysheniya energoefektivnosti vetrodizelnykh elektrostantsiy [Use of buffer storage for increasing energy efficiency wind-diesel power stations]. *Electricity*, 2012, no. 6, pp. 24–29.
28. Durusun E., Kilic O. Comparative evaluation of different power management strategies of a stand-alone PV/Wind/PEMFC hybrid power system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2012, vol. 34, pp. 81–89.
29. Sauer D.U., Bächler M., Bopp G., Höhe W., Mittermeier J., Sprau P., Willer B., Wollny M. Analysis of the performance parameters of lead/acid batteries in photovoltaic systems. *Journal of Power Sources*, 1997, vol. 64, pp. 197–201.
30. Sauer D.U., Garche J. Optimum battery design for applications in photovoltaic systems – theoretical considerations. *Journal of Power Sources*, 2001, vol. 95, pp. 130–134.
31. Wagner R., Sauer D.U. Charge strategies for valve-regulated lead/acid batteries in solar power applications. *Journal of Power Sources*, 2001, vol. 95, pp. 141–152.
32. Moseley P.T., Garche J. *Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing*. 1st ed. Amsterdam, Elsevier, 2014. 492 p.
33. Karamov D.N. Mathematical modeling of solar radiation based on open access long-term meteorological observation data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 6, pp. 28–37. In Rus.
34. Karamov D.N. Formation of initial meteorological arrays with the use of long-term series FM 12 Synop and METAR in systems energy studies. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 1. 69–88. In Rus.

Received: 4 June 2018.

Information about the authors

Dmitriy N. Karamov, Cand. Sc., researcher, Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Science; associate professor, Irkutsk National Research Technical University.

УДК 621.313.33.004–027.45:51:622.371

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЁЖНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН В АЛМАЗОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Однокопылов Георгий Иванович¹,

OGIz@ya.ru

Дементьев Юрий Николаевич¹

Шевчук Владислав Алексеевич¹,

vashevchuk@tpu.ru

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

Актуальность. В последнее время в алмазодобывающей промышленности наметилась тенденция добычи полезных ископаемых шахтным методом. В связи с этим широкое распространение получил привод на основе электрических машин постоянного и переменного тока. Внеплановая остановка горного оборудования приводит к ухудшению экономических показателей и дополнительным расходам на ремонт. Внезапный выход из строя проходческого оборудования приводит к техногенным катастрофам и ставит под угрозу безопасность рабочего персонала. Поэтому обеспечение должного уровня эксплуатационной надёжности горного оборудования является важнейшей задачей для алмазодобывающего комплекса. Чтобы минимизировать время простоя и исключить внезапные отказы необходима своевременная диагностика, ремонт с применением современных технологий, а также постоянное совершенствование системы технического обслуживания и ремонта. На сегодняшний день применение системного анализа в области надёжности электрических машин не получило необходимого развития. Парные сравнения, применяемые в системном анализе, позволяют анализировать критерии, не поддающиеся количественной оценке.

Цель: определить наиболее эффективные пути решения проблемы обеспечения должного уровня эксплуатационной надёжности электрических машин режущего органа проходческого комбайна АМ-75 в алмазодобывающей промышленности методом анализа иерархий.

Объект: электропривод режущего органа проходческого комбайна АМ-75, эксплуатируемый в условиях алмазодобывающего комплекса.

Методы: системный анализ, метод анализа иерархий, метод экспертных оценок.

Результаты. С помощью метода анализа иерархий выявлен критерий, оказывающий наибольшее влияние на уровень эксплуатационной надёжности электропривода режущего органа проходческого комбайна АМ-75, иерархично представлено дерево целей для решения проблемы поддержания эксплуатационной надёжности электрических машин комбайнов.

Ключевые слова:

Системный анализ, метод анализа иерархий, дерево целей, проходческий комбайн, электрические машины, эксплуатационная надёжность, алмазодобывающая промышленность.

Введение

Технологическое оборудование алмазодобывающего комплекса г. Мирный относится к категории опасных производственных объектов с риском техногенных аварий и необходимостью снижения невосполнимых экономических потерь. Юридической основой обеспечения промышленной безопасности служит Постановление Правительства РФ от 28.03.2001 № 241 О мерах обеспечения на территории РФ промышленной безопасности опасных производственных объектов (с изменениями от 1 февраля 2005 г. и 22 апреля 2009 г.). Обеспечить промышленную безопасность опасного производственного объекта, имеющего в своем составе электропривод, возможно на основе обеспечения живучести [1–8] с применением различных видов резервирования, в том числе с повышением эксплуатационной надежности [9–20] на основе анализа работы оборудования с учетом рассмотрения нормативных и сверхнормативных режимов эксплуатации [21–24].

Обеспечение должного уровня эксплуатационной надёжности электрических машин (ЭМ) является сложной задачей, так как для разных этапов жизненного цикла оборудования характерны различные методы её решения.

В алмазодобывающей промышленности задачу обеспечения эксплуатационной надёжности предлагаются рассматривать как упорядоченную иерархическую структуру критериев для достижения необходимой надёжности. В работах [25, 26] выявлено, что в алмазодобывающем комплексе г. Мирный наиболее подвержены отказам двигатели режущего органа проходческих комбайнов АМ-75. Комбайны эксплуатируются в условиях подземной разработки, где непрерывное воздействие оказывают такие факторы, как запылённость, влажность, сильные колебания температуры. Немаловажное значение имеет и многолетнемерзлые породы, оказывающие дополнительное влияние на бурильные части проходческого оборудования, поскольку нормативных документов по разработке подзем-

ных месторождений в условиях многолетней мерзлоты нет и необходимые расчёты по надёжности оборудования производятся на основании производственного опыта. Задача обеспечения должного уровня эксплуатационной надёжности ЭМ режущего органа проходческого комбайна АМ-75 стоит достаточно остро, поскольку его внезапный выход из строя приводит к невосполнимым экономическим убыткам и ставит безопасность рабочего персонала под угрозу. Методы системного анализа позволяют выявить такие критерии, которые наибольшим образом влияют на главную цель.

Теоретическая часть

Системный анализ – это процесс изучения поставленной задачи с целью определения действий или мероприятий (критериев системы), которые позволяют решить её эффективным способом. Системный анализ нашёл своё применение в разработке искусственных систем (социальных, технических, экономических и др.), то есть в системах, где важную роль играет человек. Однако наиболее широкое распространение получил в области, связанной с принятием и обоснованием решений в проектировании [27, 28].

На сегодняшний день среди методов системного анализа большое распространение получили системы поддержки принятия решений. Количественные методы экспертных оценок, такие как метод анализа иерархий (МАИ) или метод Дельфи, дают более правдоподобные экспертные оценки при принятии решений [28].

Метод анализа иерархий является математическим аппаратом системного анализа для принятия решений в задачах, не имеющих определённо верного решения. С его помощью эксперт, основываясь на личном опыте, знаниях и понимании проблемы, смог бы решить её. Смысл метода заключается в получении парных матриц из критериев системы с их последующим сравнением. Эти критерии составляют связанные между собой уровни иерархии, которые могут группироваться в несвязанные множества и таким образом структурировать сложные задачи. В МАИ входят следующие этапы указанного процесса [27–32]:

- формирование структуры проблемы со связями ее критериев;
- моделирование критериальных оценок с экспертными предпочтениями;
- синтез правила решения с установленными предпочтениями на альтернативных множествах.

Преимуществами МАИ являются [33–36]:

- при сравнении экспертом факторов по парам позволяет концентрироваться на конкретной проблеме и исключает необходимость в постоянной проверке групп однородных факторов;
- в случаях, когда необходимо скорректировать факторы, пересчитываются только новые значения или же удаляются строки и столбцы, соответствующие изъятым факторам;

- использует вербально-числовую шкалу Саати, которая позволяет оценивать факторы, выражаемые в разных размерностях;
- позволяет проверять результаты экспертов на согласованность, что является удобством при автоматизации процесса.

К недостаткам МАИ следует отнести [28, 34]:

- необходимость обработки большого количества информации от экспертов;
- не позволяет проверить оценку эксперта на согласованность, если критериев больше 15. В таких случаях необходимо дальнейшее разделение на подгруппы;
- оценки являются субъективными, поскольку эксперт опирается исключительно на собственные знания и опыт.

Применение МАИ в сложных задачах выбора является лучшим решением, поскольку имеет ряд преимуществ перед методом Дельфи, таких как [28, 29]:

- наличие конкретного математического аппарата;
- поддержка взаимодействий и дискуссий, что способствует появлению новых решений. При этом все мнения учитываются при расчётах;
- разделение поставленной задачи на более простые.

Иерархия – это тип системы, при которой его элементы могут группироваться в множества, не связанные между собой. Однако элементы одних групп находятся под влиянием других и так далее [35].

Задача обеспечения должного уровня эксплуатационной надёжности ЭМ режущего органа комбайна в алмазодобывающей промышленности является достаточно сложной и обширной. Для её успешного выполнения необходимо не только учитывать ряд мероприятий, которые оказывают как прямое, так и косвенное влияние, но и подобрать экспертов, имеющих достаточный уровень знаний, для выставления адекватных оценок при парных сравнениях. В практике не редки случаи, когда количество элементов и их связей настолько велико, что затрудняет анализ. В таких случаях необходимо разделение системы на подсистемы.

Практическая часть

В работе [37] представлено дерево целей для задачи повышения эффективности эксплуатации и обслуживания ЭМ в горнодобывающем комплексе. Однако слишком большое количество критериев не позволяет дать точную оценку, так как это усложняет задачу и приводит к рассогласованности матриц [27, 28, 30, 38]. На рис. 1 в виде дерева целей представлены критерии, наиболее влияющие на обеспечение заданного уровня эксплуатационной надёжности ЭМ режущего органа проходческого комбайна АМ-75. Первый уровень является уровнем общей цели и представляет собой основную задачу. В нашем случае это обеспечение эксплуатационной надёжности ЭМ в алмазодобывающей промышленности. На втором уровне были

расположены критерии, влияющие на прирост уровня эксплуатационной надёжности. На третьем и четвёртом уровне были классифицированы мероприятия по повышению эксплуатационной надёжности, где 1.1.1.1. – Ремонт по техническому состоянию; 1.1.1.2. – Фирменный метод ТО и ремонта; 1.1.2.1. – ТО по событию; 1.1.2.2. – ТО по регламенту; 1.1.2.3. – ТО по состоянию; 1.1.3.1. – Соблюдение эксплуатационных режимов; 1.1.3.2. – Энергосберегающие мероприятия; 1.1.3.3. – Модернизация оборудования; 1.1.4.1. – Средства и сооружения для выполнения ТО и ремонта; 1.2.1.1. – Тестовое диагностирование; 1.2.1.2. – Рабочее диагностирование; 1.2.1.3. – Экспресс-диагностирование; 1.3.1.1. – Параметрическое оценивание надёжности; 1.3.1.2. – Непараметрическое оценивание надёжности; 1.3.1.3. – Определение работоспособного интервала времени с заданной вероятностью; 1.3.1.4. – Определение вероятности работоспособности в определенный интервал времени.

На примере расчёта критериев второго уровня относительно главной цели рассмотрим работу механизма МАИ [27, 28]. После построения дерева целей экспертами заполняется матрица парных сравнений порядка n (n – количество критериев). Для данной работы экспертные оценки были получены от инженеров алмазодобывающего комплекса в г. Мирный (Якутия). Такая матрица является квадратной, обратно симметричной с единицами на главной диагонали. Сравнение происходит

между критериями в строках и критериями в столбцах по правилам [39–41]:

$$a_{ij} = \alpha; \quad a_{ji} = 1/\alpha; \quad a_{ij} = a_{ji} = 1,$$

где α – оценка эксперта по 9-балльной шкале, где 1 означает равную важность, а 9 – полное превосходство одного критерия над другим.

Если рассматривается n критериев, то всего возможно наличие $(n^2-n)/2$ значащих сочетаний [35, 42–44]. Например, при сравнении пары критериев 1.1. и 1.3. (табл. 1) эксперт посчитал, что первый умеренно превосходит второй, что соответствует цифре 3 в табл. 1. Это значит, что паре критериев 1.3. и 1.1. автоматически соответствует значение 1/3. Далее по формуле (1) находим геометрическую сумму каждой строки и по (2) их сумму:

$$a_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n X_{ij}}, \quad (1)$$

$$\sum a_i = a_1 + a_2 + \dots + a_n. \quad (2)$$

Компонентами нормализованного вектора приоритетов являются отношения геометрической суммы строк на общую сумму (3):

$$V_i = a_i / \sum a_i,$$

$$V_1 = 0,25; \quad V_2 = 0,65; \quad V_3 = 0,1. \quad (3)$$

В алгоритм МАИ заложен расчёт индекса согласованности (ИС), который необходим для проверки оценок эксперта на согласованность [28, 40]. Для

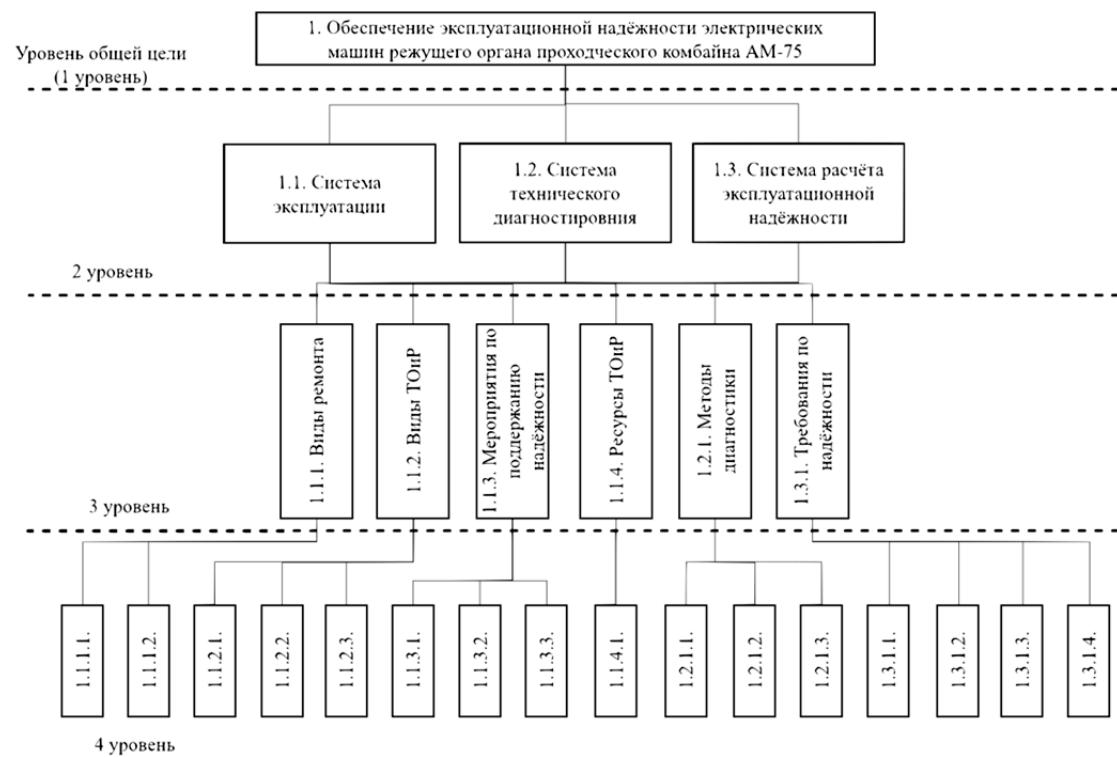


Рис. 1. Дерево целей для задачи по обеспечению эксплуатационной надёжности ЭМ режущего органа проходческого комбайна AM-75

Fig. 1. Tree of goals for the task of ensuring the operational reliability of the AM-75 roadheader cutting body electrical machine

Таблица 1. Величины случайной согласованности

Table 1. Values of random consistency

| <i>n</i> | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|----------|---|---|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| CC | 0 | 0 | 0,58 | 0,9 | 1,12 | 1,24 | 1,32 | 1,41 | 1,45 | 1,49 | 1,51 | 1,48 | 1,56 | 1,57 | 1,59 |

начала нужно произвести расчёт максимального собственного значения матрицы λ_{\max} по (4). Чем ближе значение λ_{\max} к порядку матрицы *n*, тем выше будет её значение согласованности ($\lambda_{\max} \geq n$) [45].

$$\lambda_{\max} = V_1 R_1 + V_2 R_2 + \dots + V_n R_n, \quad (4)$$

где R_n – сумма элементов *n*-столбца.

Расчёт ИС производится по следующей формуле (5):

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}. \quad (5)$$

Значение ИС необходимо сравнить с величинами средней согласованности (СС), которые были получены в работе [28] для матриц порядка от 1 до 15 (табл. 1). Отношение ИС к СС называется отношением согласованности (ОС) (6).

$$OC = \frac{IC}{CC}. \quad (6)$$

Если значения величин ОС и ИС меньше или равны 0,1, то матрица является согласованной. Однако в системах с большим количеством критериев допускается величина $OC \leq 0,2$ [27, 28, 35, 46, 47].

Таблица 2. Матрица парных сравнений критериев второго уровня по отношению к главной цели

Table 2. Array of pairwise comparisons of the 2nd level criteria in relation to the main goal

| | 1.1. | 1.2. | 1.3. | a_i | Σa_i | λ_{\max} | ИС Consistency index | ОС Consistency relation |
|------|------|------|------|-------|--------------|------------------|----------------------|-------------------------|
| 1.1. | 1 | 1/3 | 3 | 1 | | | | |
| 1.2. | 3 | 1 | 6 | 2,62 | 4 | 3,02 | 0,01 | 0,02 |
| 1.3. | 1/3 | 1/6 | 1 | 0,38 | | | | |

Для определения наиболее важного критерия в достижении главной цели воспользуемся расчётом коэффициента относительной важности (КОВ). Для его расчёта используют методы нормирования, ранжирования, групповой экспертизы и другие [28]. В нашем случае воспользуемся методом ранжирования. Для этого необходимо в каждой строке матрицы (табл. 1) найти максимальное значение и вычесть его из каждого элемента строки. Итогом станет ранжированная матрица (табл. 3).

Таблица 3. Ранжированная матрица критериев второго уровня

Table 3. Ranked array of the 2nd level elements

| | 1.1. | 1.2. | 1.3. | a_i | Σa_i | КОВ/Relative importance factor (W_j) |
|------|------|------|------|-------|--------------|--|
| 1.1. | 1 | 1/3 | 3 | 4,67 | | 0,329 |
| 1.2. | 3 | 1 | 6 | 8 | 14,17 | 0,565 |
| 1.3. | 1/3 | 1/6 | 1 | 1,5 | | 0,106 |

КОВ критериев (8) есть отношение суммы элементов строки ранжированной матрицы (7) и общей суммы (2).

$$a_i = \sum_{j=1}^n x_{ij}; \quad (7)$$

$$W_j = \frac{a_i}{\sum a_i}. \quad (8)$$

Согласно табл. 3, наиболее сильно влияющим критерием второго уровня является «Система технического диагностирования» с КОВ, равным 0,565. Меньшее влияние оказывают «Система эксплуатации» (КОВ равен 0,329) и «Система расчёта эксплуатационной надёжности» (КОВ равен 0,106). ИС и ОС меньше 0,1, что выполняет условие согласованности. Второй уровень представляет собой разбиение главной цели на критерии, которые отображают эффективность обслуживания и эксплуатации электрических машин текущего органа комбайна. Наибольшее влияния критерия диагностики в данном случае очевидно, поскольку своевременная диагностика и ремонт ЭМ позволяют избежать внезапного выхода из строя.

По такому же алгоритму необходимо провести расчёты для третьего уровня. Однако стоит заметить, что так как вышеупомянутых критериев три, парное сравнение необходимо провести относительно каждого из трёх критериев.

В табл. 4–6 из критериев третьего уровня рассчитаны векторы КОВ. Для получения общего вектора КОВ необходимо матрицу из трёх векторов умножить на вектор КОВ второго уровня.

$$\begin{array}{cccccc}
 0,22 & 0,172 & 0,187 & & 0,189 & 1.1.1. \\
 0,206 & 0,277 & 0,197 & & 0,245 & 1.1.2. \\
 0,27 & 0,268 & 0,192 & & 0,26 & 1.1.3. \\
 0,052 & 0,037 & 0,195 & \times 0,565 = & 0,058 & 1.1.4. \\
 0,152 & 0,123 & 0,198 & 0,106 & 0,14 & 1.2.1. \\
 0,1 & 0,124 & 0,031 & & 0,106 & 1.3.1.
 \end{array}$$

Согласно общему вектору, из критериев третьего уровня наиболее сильное влияние на главную цель имеют мероприятия по поддержанию надёжности (критерий 1.1.3.) с КОВ, равным 0,26 (рис. 2). Стоит отметить, что критерий 1.1.2. «Виды ТОиР» также имеет достаточно высокий показатель КОВ ($W_j = 0,245$), что подтверждает сказанное выше о своевременном обслуживании. Третий уровень дерева целей, в котором были структурированы критерии четвёртого уровня, является промежуточным, что в дальнейшем позволит произвести оценку только тех критериев, которые

Таблица 4. Матрица парных сравнений критерииев третьего уровня по отношению к критерию 1.1.

Table 4. Array of the pairwise comparisons of the 3rd level criteria in relation to criterion 1.1.

| | 1.1.1. | 1.1.2. | 1.1.3. | 1.1.4. | 1.2.1. | 1.3.1. | KOB Relative importance factor (W_j) | λ_{\max} | ИС Consistency index | ОС Consistency relation |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---|------------------|-------------------------|----------------------------|
| 1.1.1. | 1 | 1 | 1 | 4 | 1 | 1/2 | 0,22 | 6,4 | 0,09 | 0,07 |
| 1.1.2. | 1 | 1 | 2 | 4 | 1 | 1/2 | 0,206 | | | |
| 1.1.3. | 1 | 1/2 | 1 | 5 | 3 | 1/2 | 0,27 | | | |
| 1.1.4. | 1/4 | 1/4 | 1/5 | 1 | 1/3 | 1/3 | 0,052 | | | |
| 1.2.1. | 1 | 1 | 1/3 | 3 | 1 | 1 | 0,152 | | | |
| 1.3.1. | 2 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 | 0,1 | | | |

Таблица 5. Матрица парных сравнений критерииев третьего уровня по отношению к критерию 1.2.

Table 5. Array of pairwise comparisons of the 3rd level criteria in relation to criterion 1.2.

| | 1.1.1. | 1.1.2. | 1.1.3. | 1.1.4. | 1.2.1. | 1.3.1. | KOB Relative importance factor (W_j) | λ_{\max} | ИС Consistency index | ОС Consistency relation |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---|------------------|-------------------------|----------------------------|
| 1.1.1. | 1 | 3 | 4 | 5 | 7 | 9 | 0,268 | 6,4 | 0,08 | 0,07 |
| 1.1.2. | 1/3 | 1 | 3 | 4 | 7 | 7 | 0,211 | | | |
| 1.1.3. | 1/4 | 1/3 | 1 | 3 | 4 | 5 | 0,176 | | | |
| 1.1.4. | 1/5 | 1/4 | 1/3 | 1 | 3 | 4 | 0,163 | | | |
| 1.2.1. | 1/7 | 1/7 | 1/4 | 1/3 | 1 | 3 | 0,141 | | | |
| 1.3.1. | 1/9 | 1/7 | 1/5 | 1/4 | 1/3 | 1 | 0,042 | | | |

Таблица 6. Матрица парных сравнений критерииев третьего уровня по отношению к критерию 1.3.

Table 6. Array of the pairwise comparisons of the 3rd level criteria in relation to criterion 1.3.

| | 1.1.1. | 1.1.2. | 1.1.3. | 1.1.4. | 1.2.1. | 1.3.1. | KOB Relative importance factor (W_j) | λ_{\max} | ИС Consistency index | ОС Consistency relation |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---|------------------|-------------------------|----------------------------|
| 1.1.1. | 1 | 1/4 | 1/5 | 1/3 | 2 | 6 | 0,187 | 6,5 | 0,1 | 0,08 |
| 1.1.2. | 4 | 1 | 1/3 | 3 | 4 | 8 | 0,197 | | | |
| 1.1.3. | 5 | 3 | 1 | 4 | 5 | 9 | 0,192 | | | |
| 1.1.4. | 3 | 1/3 | 1/4 | 1 | 3 | 7 | 0,195 | | | |
| 1.2.1. | 1/2 | 1/4 | 1/5 | 1/3 | 1 | 6 | 0,198 | | | |
| 1.3.1. | 1/6 | 1/8 | 1/9 | 1/7 | 1/6 | 1 | 0,031 | | | |

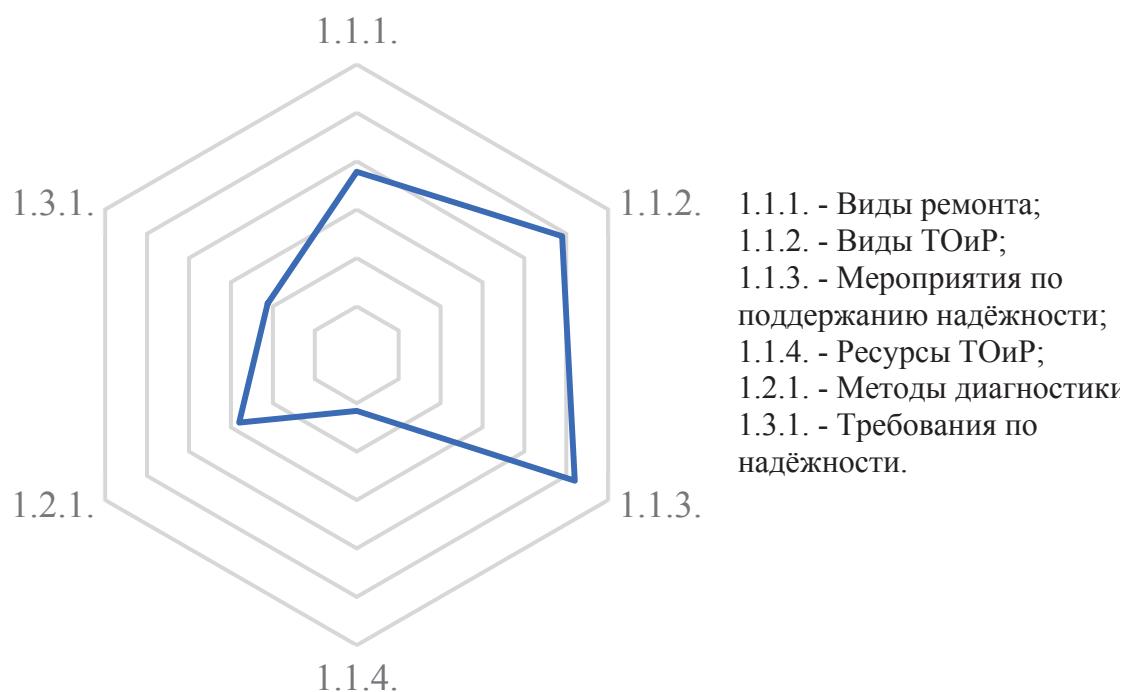


Рис. 2. Диаграмма значимости критерииев третьего уровня

Fig. 2. Chart of the 3rd level criteria

имеют непосредственное отношение к весомому критерию третьего уровня. Согласно дереву целей, пункт 1.1.3. разделяется на критерии: «Соблюдение эксплуатационных режимов»; «Энергосберегающие мероприятия» и «Модернизация оборудования».

Таблица 7. Матрица парных сравнений критериев четвертого уровня по отношению к критерию 1.1.3.

Table 7. Array of pairwise comparisons of the 4th level criteria in relation to criterion 1.1.3.

| | 1.1.3.1. | 1.1.3.2. | 1.1.3.3. | KOB Relative importance factor (W_j) | λ_{\max} | ИС Consistency index | OC Consistency relation |
|----------|----------|----------|----------|---|------------------|-------------------------|----------------------------|
| 1.1.3.1. | 1 | 7 | 2 | 0,336 | | | |
| 1.1.3.2. | 1/7 | 1 | 1/7 | 0,068 | 3,05 | 0,03 | 0,05 |
| 1.1.3.3. | 1/2 | 7 | 1 | 0,596 | | | |

Согласно полученному вектору (табл. 7), критерий «Модернизация оборудования» (с КОВ равным 0,596) наиболее сильно влияет на главную цель.

Заключение

Произведён подробный анализ иерархий задачи обеспечения эксплуатационной надёжности ЭМ режущего органа проходческого комбайна АМ-75 в алмазодобывающей промышленности. Благодаря МАИ получена возможность систематизировать задачу, а на основе данных, полученных от экспертов, выявить наиболее эффективное решение при наличии нескольких альтернатив. В работе получены следующие результаты:

1. Согласно вектору критериев относительной важности второго уровня наиболее весомым критерием является «Система технического диагностирования» с КОВ, равным 0,565, далее идёт «Система эксплуатации» (КОВ равен 0,329) и «Система расчёта эксплуатационной надёжности» (КОВ равен 0,106).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стекольников Ю.И. Живучесть систем. – СПб.: Политехника, 2002. – 155 с.
2. Odnokopylov G.I., Bragin A.D. Fault tolerant vector control of induction motor drive (Article number 012015) // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2014. – V. 66. – № . 1. – P. 1–6.
3. Odnokopylov G.I., Rozaev I.A. Formation of failure matrix and failure-free control algorithm for multi-sectioned Switched-reluctance drive (Article number 012035) // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2014. – V. 66. – № 1. – P. 1–7.
4. Odnokopylov G.I., Bragin A.D. Mathematical model of brushless DC motor in phase loss operation mode // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – V. 698. – P. 24–29.
5. Odnokopylov G.I., Bragin A.D. Algorithms of fault tolerant control of induction motor electric drive in phase loss operate mode // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON): Proc. – Omsk, May 21–23, 2015. – Novosibirsk: IEEE Russia Siberia Section, 2015. – P. 1–5.
6. Odnokopylov G.I., Rozaev I.A. Fault-tolerant control of switched-reluctance drive in emergency modes // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON): proceedings, Omsk, May 21–23, 2015. – Novosibirsk: IEEE Russia Siberia Section, 2015. – P. 1–6.
7. Odnokopylov G.I., Rozaev I.A. Fault-tolerant control algorithms of switched-reluctance motor drive in open-phase modes // 2016 The 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST): Proc. – Novosibirsk, June 1–3, 2016. – Novosibirsk: IEEE Russia Siberia Section, 2016. – P. 140–144.
8. Ткачук Р.Ю., Глазырин А.С. Принцип построения отказоустойчивой системы управления асинхронным электроприводом // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 5. – С. 105–109.
9. Almashakbeh A.S., Prus V., Zagirnyak M. Models for electric machine reliability prediction at variation of the condition of ba-

2. Для определения наиболее весомого критерия третьего уровня из трёх векторов каждого критерия второго уровня был получен общий вектор КОВ, согласно которому наиболее весомым критерием является «Мероприятия по поддержанию надёжности» с КОВ, равным 0,26.
3. Критерий «Модернизация оборудования» (с КОВ, равным 0,596) наиболее сильно влияет на главную цель. В связи с агрессивной средой эксплуатации элементы ЭМ комбайна подвергаются постоянному износу даже во время простоя. От повышенной влажности (80–98 %) происходит коррозия металлических деталей, которая ухудшает электрические свойства. Из-за повышенной запылённости (70–695 мг/м³) происходит загрязнение изоляции, что приводит к дальнейшему её пробою. Пыль забивается в подшипниковый узел и, смешиваясь со смазкой, вызывает быстрый износ электрической машины. Длительная работа в условиях высокой запылённости приводит к образованию слоя пыли на обмотках, что приводит к перегреву.
4. При расчёте все оценки экспертов были подвергнуты проверке суждений на согласованность, результатом которой во всех случаях стали низкие показатели значений индекса согласованности и отношения согласованности (ниже 0,1). Это говорит о компетентности экспертов и позволяет сделать выводы на основе их оценок.

Результаты, полученные в работе, показывают, что в случае с проходческим комбайном АМ-75 необходимо не только усовершенствование системы технического обслуживания и ремонта, но и модернизация самих узлов, наиболее подверженных факторам внешней среды. Поскольку метод анализа иерархий является универсальным, его целесообразно применить и к другим типам производства. Однако в этом случае необходимо пересмотреть дерево целей, так как для разного типа оборудования характерны разные критерии.

- sic structural units // Przeglad elektrotechniczny. – 2017. – V. 1 (93). – P. 117–120.
10. Muravleva O.O., Tyuteva P.V. Operation features of the improved induction motors in the variable speed drive of pump units // EUROCON 2009. – St. Petersburg, May 18–23 2009. – P. 703–708.
11. Muravleva O.O. Resource saving prospects based on accuracy theory // EUROCON 2007 – The International Conference on Computer as a Tool. – Warsaw, Poland, September 9–12, 2007. – P. 1845–1850.
12. Glowacz A., Glowacz Z. Diagnostics of stator faults of the single-phase induction motor using thermal images, MoASoS and selected classifiers // Measurement. – 2016. – V. 93. – P. 86–93.
13. Electrical & mechanical diagnostic indicators of wind turbine induction generator rotor faults / D. Zappalá, N. Sarma, S. Djurović, C.J. Crabtree, A. Mohammad, P.J. Tavner // Renewable energy. – 2019. – V. 131. – P. 14–24.
14. Sakhara S., Saad S. Diagnosis and detection of short circuit in asynchronous motor using three-phase model // International journal of system assurance engineering and management. – 2017. – V. 8. – P. 308–317.
15. A fault-tolerant control strategy for switched reluctance motor drive for electric vehicles under short-fault condition / M. Ma, R. Wang, F. Li, J. Wang, S. Yang // Microelectronics reliability. – 2018. – V. 88–90. – P. 1221–1225.
16. Performance comparison of fault-tolerant three-phase induction motor drives considering current and voltage limits / M. Tousizadeh, H.S. Che, J. Selvaraj, N.A. Rahim, B.-T. Ooi // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2019. – V. 66 (4). – P. 2639–2648.
17. Шевчук В.А., Муравлев О.П. Анализ вероятности безотказной работы электрических машин в алмазодобывающей промышленности // Горное оборудование и электромеханика. – 2018. – № 4 (138). – С. 39–46.
18. Brushless DC motor torque estimation based on nonlinear partial least square method / Z. Zhiyong, Z. Fei, L. Zhiqiang, Z. Xin // Transactions of China electrotechnical society. – 2017. – V. 32. – P. 62–69.
19. Analysis, design and dynamic simulation of novel limited swing angle torque permanent magnet motor for high voltage circuit breaker application / G. Zeng, X. Yang, S. Zhao, H. Yin, Y. Pei, J. Cao // Energies. – 2018. – V. 11 (10). – P. 1–18.
20. Meng L., Liu Z. Fault simulation and diagnosis for vector control of AC motor drive // IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering. – 2016. – V. 11 (5). – P. 618–623.
21. Zyuzev A.M., Bubnov M.V. Model for Sucker-Rod Pumping Unit Operating Modes Analysis Based on SimMechanics Library // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – V. 944. – P. 1–7.
22. Зюзев А.М., Метельков В.П. О проблеме перегрева обмотки ротора асинхронных двигателей в пусковых режимах высокочастотных электроприводов нефтегазовой и горной промышленности // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 7. – С. 96–103.
23. Зюзев А.М., Метельков В.П. Учет колебаний температуры обмотки статора асинхронного двигателя при проверке по нагреванию в повторно-кратковременном режиме // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 4. – С. 146–153.
24. Zyuzev A.M., Kostylev A.V., Stepanyuk D.P. A soft-startup device for an induction motor with supply-network voltage control // Russian Electrical Engineering. – 2014. – V. 85 (9). – P. 586–590.
25. Ruan L., Chen J., Gu G. Different Influence of Cooling Method to Stator Bar Insulation Characteristics in Pumped Storage Units // Diangong Jishu Xuebao/Transactions of China Electrotechnical Society. – 2017. – V. 32 (14). – P. 246–251.
26. Shevchuk V.A., Muravlev O.P., Stolyarova O.O. Survival analysis of a.c. machines in the diamond industry using the Kaplan-Meier estimator // MATEC Web of Conferences. – 2017. – V. 141. – P. 1–4.
27. The use of a special software for induction motor diagnostics in the diamond industry / V.A. Shevchuk, O.P. Muravlev, O.O. Stolyarova, V.P. Shevchuk // MATEC Web of Conferences. – 2017. – V. 91. – P. 1–4.
28. Saaty T. Принятие решений. Метод анализа иерархии. – М.: Радио и связь, 1993. – 320 с.
29. Saaty T.L., Vargas L.G. Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process. – Boston: Springer US, 2001. – 333 p.
30. Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н. Анализ, синтез, планирование решений в экономике. – М.: Финансы и статистика, 2000. – 368 с.
31. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Основы системного анализа. – Томск: Изд-во НТЛ, 2001. – 396 с.
32. Brunelli M. Introduction to the Analytic Hierarchy Process. – New York: Springer, 2015. – 83 p.
33. Антонов А.В. Системный анализ. – М.: Высшая школа, 2006. – 454 с.
34. Тутыгин А.Г., Коробов В.Б. Преимущества и недостатки метода анализа иерархий // Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена. – 2010. – № 122. – С. 108–115.
35. Деордица Ю.С. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений. – Луганск: ВНУ, 2005. – 64 с.
36. Hierarchical model of assessing and selecting experts / T.Y. Chernysheva, M.A. Korchuganova, V.V. Borisov, S.L. Minkov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – V. 127. – P. 1–6.
37. He M.X., An X. Information security risk assessment based on analytic hierarchy process // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2016. – V. 1 (3). – P. 656–664.
38. Гусев В.В., Муравлев О.П., Шевчук В.П. Системный анализ эффективности функционирования электрических машин в горнодобывающем комплексе // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314. – № 4. – С. 74–78.
39. Fei S., Xiangdong L., Yali F. Safety evaluation for bridge crane based on FTA and AHP // MATEC Web of Conferences. – 2018. – V. 207. – P. 1–4.
40. Макарова И.Л. Анализ методов определения весовых коэффициентов в интегральном показателе общественного здоровья // Символ науки. – 2015. – № 7. – С. 87–95.
41. Emrouznejad A., Ho W. Fuzzy Analytic Hierarchy Process. – Boca Raton: CRC Press, 2018. – 407 p.
42. Greco S., Ehrgott M., Figueira J.R. Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys. – New York: Springer, 2016. – 1346 p.
43. Intelligent collaborative support system for AHP-group decision making / G. Kou, X. Chao, Y. Peng, L. Xu, Y. Chen // Studies in Informatics and Control. – 2017. – V. 26 (2). – P. 131–142.
44. Research on comprehensive evaluation system of urban energy data based on AHP method / X.D. Ma, Q. Sun, J.M. Zhang, P. He // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – V. 382 (5). – P. 1–7.
45. Choosing the Optimal Technology to Rehabilitate the Pipes in Water Distribution Systems Using the AHP Method / I. Aschilean, G. Badea, I. Giurca, G.S. Naghiu, F.G. Illoae // Energy Procedia. – 2017. – V. 112. – P. 19–26.
46. Evans G.W. Multiple Criteria Decision Analysis for Industrial Engineering: Methodology and Applications. – Boca Raton: CRC Press, 2018. – 467 p.
47. Khazaii J. Advanced Decision Making for HVAC Engineers: Creating Energy Efficient Smart Buildings. – Switzerland: Springer International Publishing, 2016. – 191 p.

Поступила: 30.01.2019 г.

Информация об авторах

Однокопылов Г.И., доктор технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Дементьев Ю.Н., кандидат технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Шевчук В.А., аспирант отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.313.33.004–027.45:51:622.371

APPLICATION OF SYSTEM ANALYSIS FOR PROVIDING RELIABILITY OF ELECTRICAL MACHINES IN DIAMOND INDUSTRY

Georgy I. Odnokopylov¹,

OGlz@yandex.ru

Yury N. Dementyev¹

Vladislav A. Shevchuk¹,

vashevchuk@tpu.ru

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

The relevance. Recently, the diamond mining industry has included a trend of mining using the mining method. In this regard, the drive based on DC motor and AC motor has become widespread. Unplanned shutdowns of mining machinery lead to economic recession and additional costs for repairs. Unplanned break of tunneling equipment leads to industrial disasters and jeopardize the safety of personnel. Therefore there is an urgent problem of providing adequate level reliability of mining machinery amongst other problems of diamond industry. Early diagnostics, repair using modern technologies and constant improvement of maintenance minimize downtime and eliminate sudden failure. Application of system analysis in reliability of electrical machines does not get necessary development. Paired comparisons applied in the system analysis allow analyzing the criteria reluctant to quantitative evaluation.

The main aim of the research is to determine the most effective ways to solve the problem of ensuring the proper level of operational reliability of electric machines of the cutting body of the AM-75 roadheader in the diamond industry by analyzing hierarchies.

Object of research is the electric drive of the cutting body of the AM-75 tunnel miner, operated under conditions of the diamond-mining complex.

Methods: system analysis, hierarchy method, expert evaluation method.

Results. Using the hierarchy analysis method the authors have determined the criterion which affects most of all the reliability of electrical machines of cutting unit of road header AM-75. The paper introduces in hierarchy the objective tree for the problem of providing reliability for electrical machines of road header.

Key words:

System analysis, hierarchy analysis method, goal tree, roadheader, electrical machines, operational reliability, diamond industry.

REFERENCES

1. Stekolnikov Yu.I. *Zhivuchest sistem* [System survivability]. St-Petersburg, Politekhnika Publ., 2002. 155 p.
2. Odnokopylov G.I., Bragin A.D. Fault tolerant vector control of induction. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2014, vol. 66, no. 1, pp. 1–6.
3. Odnokopylov G.I., Rozzaev I.A. Formation of failure matrix and failure-free control algorithm for multi-sectioned Switched-reluctance drive. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2014, vol. 66, no. 1, pp. 1–7.
4. Odnokopylov G.I., Bragin A.D. Mathematical model of brushless DC motor in phase loss operation mode. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 698, pp. 24–29.
5. Odnokopylov G.I., Bragin A.D. Algorithms of fault tolerant control of induction motor electric drive in phase loss operate mode. *2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON): Proc. Omsk, May 21–23, 2015.* pp. 1–5.
6. Odnokopylov G.I., Rozzaev I.A. Fault-tolerant control of switched-reluctance drive in emergency modes. *2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON): Proc. Omsk, May 21–23, 2015.* pp. 1–6.
7. Odnokopylov G.I., Rozzaev I.A. Fault-tolerant control algorithms of switched-reluctance motor drive in open-phase modes. *2016 The 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST): Proc. Novosibirsk, Jun 1–3, 2016.* pp. 140–144.
8. Tkachuk R.Y., Glazyrin A.S. Principle of building a fault-tolerant control system for asynchronous electric drive. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 5, pp. 105–109.
9. Almashakbeh A.S., Prus V., Zagirnyak M. Models for electric machine reliability prediction at variation of the condition of basic structural units. *Przeglad elektrotechniczny*, 2017, vol. 1, no. 93, pp. 117–120.
10. Muravleva O.O., Tyuteva P.V. Operation features of the improved induction motors in the variable speed drive of pump units. *EUROCON 2009*. St. Petersburg, May 18–23, 2009. pp. 703–708.
11. Muravleva O.O. Resource saving prospects based on accuracy theory. *EUROCON 2007 – The International Conference on Computer as a Tool*. Warsaw, Poland, September 9–12, 2007. pp. 1845–1850.
12. Glowacz A., Glowacz Z. Diagnostics of stator faults of the single-phase induction motor using thermal images, MoASoS and selected classifiers. *Measurement*, 2016. vol. 93, pp. 86–93.
13. Zappalá D., Sarma N., Djurović S., Crabtree C.J., Mohammad A., Taverner P.J. Electrical & mechanical diagnostic indicators of wind turbine induction generator rotor faults. *Renewable energy*, 2019, vol. 131, pp. 14–24.
14. Sakhara S., Saad S. Diagnosis and detection of short circuit in asynchronous motor using three-phase model. *International journal of system assurance engineering and management*, 2017, vol. 8, pp. 308–317.
15. Ma M., Wang R., Li F., Wang J., Yang S. A fault-tolerant control strategy for switched reluctance motor drive for electric vehicles under short-fault condition. *Microelectronics reliability*, 2018, vol. 88–90, pp. 1221–1225.
16. Tousizadeh M., Che H. S., Selvaraj J., Rahim N. A., Ooi B.-T. Performance comparison of fault-tolerant three-phase induction motor drives considering current and voltage limits. *IEEE Trans-*

- sactions on Industrial Electronics, 2019, vol. 66, no. 4, pp. 2639–2648.
17. Shevchuk V.A., Muravlev O.P. Analysis of failure-free operation probability for electrical machines in the diamond industry. *Mining equipment and electrical engineering*, 2018, vol. 4, no. 138, pp. 39–46. In Rus.
18. Zhiyong Z., Fei Z., Zhiqiang L., Xin Z. Brushless DC motor torque estimation based on nonlinear partial least square method. *Transactions of China electrotechnical society*, 2017, vol. 32, pp. 62–69.
19. Zeng G., Yang X., Zhao S., Yin H., Pei Y., Cao J. Analysis, design and dynamic simulation of novel limited swing angle torque permanent magnet motor for high voltage circuit breaker application. *Energyies*, 2018, vol. 11, no. 10, pp. 1–18.
20. Meng L., Liu Z. Fault simulation and diagnosis for vector control of AC motor drive. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2016, vol. 11, no. 5, pp. 618–623.
21. Zyuzev A.M., Bubnov M.V. Model for Sucker-Rod Pumping Unit Operating Modes Analysis Based on SimMechanics Library. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 944, pp. 1–7.
22. Zyuzev A.M., Metelkov V.P. Problem of induction motors rotor winding overheating in starting modes of high inertia electric drives of oil and mining industry. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 7, pp. 96–103. In Rus.
23. Zyuzev A.M., Metelkov V.P. Accounting temperature fluctuations in stator winding of induction motor when checking for heating in intermittent mode. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 4, pp. 146–153.
24. Zyuzev A.M., Kostylev A.V., Stepanyuk D.P. A soft-startup device for an induction motor with supply-network voltage control. *Russian Electrical Engineering*, 2014, vol. 85 (9), pp. 586–590.
25. Ruan L., Chen J., Gu G. Different Influence of Cooling Method to Stator Bar Insulation Characteristics in Pumped Storage Units. *Diangong Jishu Xuebao/Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, vol. 32, no. 14, pp. 246–251.
26. Shevchuk V.A., Muravlev O.P., Stolyarova O.O. Survival analysis of a.c. machines in the diamond industry using the Kaplan-Meier estimator. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 141, pp. 1–4.
27. Shevchuk V.A., Muravlev O.P., Stolyarova O.O., Shevchuk V.P. The use of a special software for induction motor diagnostics in the diamond industry. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 91, pp. 1–4.
28. Saaty T. *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. New York, McGraw-Hill Publ., 1993. 320 p.
29. Saaty T.L., Vargas L.G. *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process*. Boston, Springer US, 2001. 333 p.
30. Andreychikov A.V., Andreychikova O.N. *Analiz, sintez, planirovanie resheniy v ekonomike* [Analysis, synthesis, planning decisions in the economics]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2000. 368 p.
31. Peregudov F.I., Tarasenko F.P. *Osnovy sistemnogo analiza* [Basics of system analysis]. Toms, NTL Publ., 2001. 396 p.
32. Brunelli M. *Introduction to the Analytic Hierarchy Process*. New York, Springer, 2015. 83 p.
33. Antonov A.V. *Sistemny analiz* [System analysis]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2006. 454 p.
34. Tutygin A.G., Korobov V.B. Preimushchestva i nedostatki metoda analiza ierarkhiy [Advantages and disadvantages of the hierarchy analysis method]. *Izvestia: Herzen University Journal of Humanities & Sciences*, 2010, no. 122, pp. 108–115.
35. Deorditsa Yu.S. *Intellektualnye sistemy podderzhki prinyatiya resheniy* [Intelligent Decision Support Systems]. Lugansk, VNU Publ., 2005. 64 p.
36. Chernysheva T.Y., Korchuganova M.A., Borisov V.V., Min'kov S.L. Hierarchical model of assessing and selecting experts. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 127, pp. 1–6.
37. He M.X., An X. Information security risk assessment based on analytic hierarchy process. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 2016, vol. 1, no. 3, pp. 656–664.
38. Gusev V.V., Muravlev O.P., Shevchuk V.P. System analysis of the performance of electric machines in the mining complex. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 314, no. 4, pp. 74–78.
39. Fei S., Xiangdong L., Yali F. Safety evaluation for bridge crane based on FTA and AHP. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 207.
40. Makarova I.L. Analiz metodov opredeleniya vesovykh koefitsientov v integralnom pokazatele obshchestvennogo zdorovya [Analysis of methods for determining weights in the integral index of public health]. *Simvol nauki*, 2015, no. 7, pp. 87–95.
41. Emrouznejad A., Ho W. *Fuzzy Analytic Hierarchy Process*. Boca Raton, CRC Press Publ., 2018. 407 p.
42. Greco S., Ehrgott M., Figueira J.R. *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. New York, Springer Publ., 2016. 1346 p.
43. Kou G., Chao X., Peng Y., Xu L., Chen Y. Intelligent collaborative support system for AHP-group decision making. *Studies in Informatics and Control*, 2017, vol. 26, no. 2, pp. 131–142.
44. Ma X.D., Sun Q., Zhang J.M., He P. Research on comprehensive evaluation system of urban energy data based on AHP method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 382, no. 5, pp. 1–7.
45. Aşçilean I., Badea G., Giurca I., Naghiu G.S., Illoae F.G. Choosing the Optimal Technology to Rehabilitate the Pipes in Water Distribution Systems Using the AHP Method. *Energy Procedia*, 2017, vol. 112, pp. 19–26.
46. Evans G.W. *Multiple Criteria Decision Analysis for Industrial Engineering: Methodology and Applications*. Boca Raton, CRC Press Publ., 2018. 467 p.
47. Khazaii J. *Advanced Decision Making for HVAC Engineers: Creating Energy Efficient Smart Buildings*. Switzerland, Springer International Publ., 2016. 191 p.

Received: 30 January 2019.

Information about the authors

Georgy I. Odnokopylov, Dr. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Yury N. Dementyev, Cand. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Vladislav A. Shevchuk, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 621.926.55

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ

Данекер Валерий Аркадьевич,

vad@tpu.ru

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

Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью создания высокоэффективного ресурсосберегающего оборудования, применяемого при дроблении и измельчении рудного материала в горнодобывающей промышленности. Одним из путей создания такого оборудования является применение шаровых мельниц колебательного типа, в конструкции которых используется тяговый электромагнит переменного тока. Подключение тягового электромагнита к источнику напряжения переменной частоты позволяет регулировать режимы работы шаровой мельницы в широких пределах и обеспечивать её работу в квазирезонансных режимах. Математическое моделирование режимов работы шаровой мельницы колебательного типа позволяет определить требования к параметрам колебательной системы при варьировании частоты и величины питающего напряжения и разработать практические рекомендации, которые следует учитывать при проектировании промышленных образцов. Кроме этого, функционирование шаровой мельницы колебательного типа в квазирезонансных режимах сопровождается существенным сокращением энергозатрат при увеличении производительности.

Цель исследования: разработка математической модели шаровой мельницы колебательного типа при питании тягового электромагнита от источника напряжения переменной частоты; на основе разработанной математической модели провести расчёты режимов работы шаровой мельницы колебательного типа и сформулировать практические рекомендации для использования при проектировании шаровой мельницы.

Методы. Математическое моделирование режимов работы шаровой мельницы проводилось на основе численного решения системы дифференциальных уравнений движения элементов колебательной системы. Параметры колебательной системы определялись расчётным путём с учётом реальных технических характеристик выпускаемого аналогичного оборудования.

Результаты. Математическая модель шаровой мельницы колебательного типа позволяет определить диапазоны тяговых усилий и частот напряжения питания тягового электромагнита, соответствующие квазирезонансному режиму работы при изменении параметров колебательной системы. На основе установленного диапазона квазирезонансных частот и масс элементов колебательной системы могут быть определены параметры тягового электромагнита, конструкция и параметры пружинного подвеса шаровой мельницы.

Ключевые слова:

Руда, дробление, измельчение, шаровая мельница, вибрационная мельница, колебательная система, тяговый электромагнит, резонанс.

Введение

Дробление и измельчение являются одними из основных процессов при переработке руды в горнодобывающей и горно-перерабатывающей отраслях. На долю этих процессов, по некоторым данным, приходится до 70 % энергозатрат. Вследствие этого разработка нового и совершенствование существующего оборудования, применение новых подходов к данным процессам, решающих задачи снижения энергозатрат, материалоёмкости, повышения производительности являются своевременными и актуальными [1–5].

Значительную часть оборудования одного из этапов обработки руды составляют шаровые мельницы (ШМ). Разрушение конгломератов рудного материала (дробление, измельчение) в ШМ происходит за счёт их взаимодействия с мелющими телами (шарами), друг с другом и с элементами конструкций помольной камеры собственно ШМ. Затраты электроэнергии приводного двигателя ШМ составляют от 45,0 кВт·ч и выше на тонну готового продукта, что является достаточно энергозатратным процессом, требующим совершенствования [6–9].

Анализ технических характеристик имеющихся в настоящее время парка ШМ показывает, что

соотношение объёмов загружаемого материала с мелющими телами не превышает 50 % от общего объёма барабана, что свидетельствует о высокой материалоёмкости эксплуатируемых в настоящее время конструкций ШМ.

Одним из распространённых типов ШМ являются мельницы вибрационного типа. Исследование эксплуатационных характеристик ШМ вибрационного типа (ШМВТ) с циклической загрузкой и выгрузкой показывает, что их применение позволяет снизить затраты электроэнергии при увеличении производительности [10].

Вибрация ШМВТ возникает за счёт вращения дебаланса, создающего круговые колебания помольной камеры с размещенными в ней мелющими телами и рудным материалом. Амплитуды колебаний корпуса такой ШМ составляют несколько миллиметров. Для снижения вибрационной нагрузки на окружающее пространство корпус ШМВТ, как правило, размещают на пружинном подвесе [11, 12].

Центробежная сила круговых колебаний вызывает существенную паразитную механическую нагрузку на электродвигатель, корпусные элементы конструкции ШМВТ и на пружины подвеса. Вследствие этого ресурс и надёжность ШМВТ не

высоки, что особенно ограничивает перспективы производства крупногабаритных ШМВТ. Кроме этого, использование дебаланса для создания вибраций не позволяет реализовать раздельное регулирование значения вибрационной силы и частоты круговых колебаний. К тому же отсутствуют сведения о практическом использовании каких-либо принципов регулирования режимов работ ШМВТ.

Создание колебаний помольной камеры ШМ строго в одной плоскости позволяет избежать вышеперечисленных недостатков ШМВТ. Реализация колебаний строго по одной пространственной координате возможна при использовании тяговых электромагнитов (ТЭМ) переменного тока соленоидного или клапанного типов. Изменяя величину напряжения, подаваемого на обмотку ТЭМ, можно регулировать в широких пределах величину вынуждающей силы колебательной системы, влияющей на производительность и дисперсность выходного продукта ШМ такого принципа работы. Вторым самостоятельным каналом регулирования режимов работы электромагнитной ШМ колебательного типа (ЭШМКТ), не связанным с предыдущим вариантом, является возможность регулирования частоты возмущающей силы, которая пропорциональна частоте питающего напряжения. Несомненным достоинством ЭШМКТ является и то обстоятельство, что в отличие от ШМВТ с дебалансом в них появляется возможность реализовывать режимы работы, близкие к состоянию резонанса колебательной системы при отсутствии паразитных механических нагрузок. Амплитуды колебаний помольной камера ЭШМКТ и соответственно мелющих тел в режимах, близких к резонансу, могут достигать значительно больших значений, чем аналогичные параметры ШМВТ. Причём для получения больших амплитуд колебаний в таких режимах работы ЭШМКТ потребуется возмущающая сила значительно меньшей величины. Квазирезонансные режимы работы ЭШМКТ реализуются путём соответствующего подбора частоты возмущающей силы, согласующейся с резонансной частотой колебательной системы [13].

При работе ЭШМКТ в ходе разрушения и изменения крупности рудного материала неизбежно будут изменяться параметры колебательной системы, что повлечёт соответствующее изменение резонансной частоты и уменьшение амплитуд колебаний. Однако, при регулировании частоты подаваемого на обмотку ТЭМ напряжения появляется возможность постоянно поддерживать работу ЭШМКТ в режимах, близких к резонансу, что в свою очередь сопровождается максимальной производительностью.

При реализации работы ЭШМКТ в колебательном режиме по одной из пространственных координат появляется возможность моделирования работы такого устройства на основе решения системы дифференциальных уравнений движения отдельных элементов колебательной системы [14–19]. Математическое моделирование режимов

работы ЭШМКТ с приводом от ТЭМ позволит разработать практические рекомендации, относящиеся к конструкции такой ШМ, параметрам ТЭМ и системе его электропитания, характеристикам пружинного подвеса.

Экспериментальные исследования

Важным аспектом математического моделирования является определение адекватных параметров (коэффициентов) дифференциальных уравнений движения элементов колебательной системы. Одним из основных параметров уравнений движения являются массы отдельных элементов. Для выбора значений масс элементов колебательной системы ЭШМКТ воспользуемся техническими характеристиками одного из аналогов ШМ, имеющего следующие параметры:

| | |
|--|------|
| • Диаметр барабана, мм | 900 |
| • Длина барабана, мм | 1800 |
| • Рабочий объём барабана, м ³ | 1,14 |
| • Масса мельницы, кг | 5700 |
| • Мощность электродвигателя, кВт | 22,0 |

Для указанной ШМ по принятым методикам проектирования определены следующие расчётные параметры:

| | |
|---|-------|
| • Диаметр шаров, мм | 60 |
| • Количество шаров, шт. | 1730 |
| • Объём, занимаемый шарами, м ³ | 0,26 |
| • Объём, занимаемый рудным материалом, м ³ | 0,26 |
| • Масса одного шара, кг | 0,848 |
| • Масса всех шаров, кг | 1467 |
| • Количество слоёв из шаров, шт. | 4 |
| • Плотность рудного материала, кг/м ³ | 4000 |
| • Масса рудного материала, кг | 1040 |
| • Коэффициент использования рабочего объёма помольной камеры, от. ед. | 0,45 |

Используя приведённые выше параметры для выбранного аналога, принимаем следующие показатели для экспериментального расчётного варианта ЭШМКТ:

| | |
|--------------------------------|------|
| • Диаметр шаров, мм | 60 |
| • Диаметр помольной камеры, мм | 900 |
| • Количество шаров, шт. | 1730 |

Из соображений оптимальности организации процесса колебаний принимаем вертикальное исполнение ЭШМКТ. Учитывая приведённые показатели экспериментального варианта мельницы и особенности такого исполнения ЭШМКТ при циклической выгрузке готового продукта через дно можно определить другие характеристики конструкции экспериментального образца ЭШМКТ, которые потребуются для определения коэффициентов дифференциальных уравнений движения:

| | |
|--|------|
| • Высота помольной камеры, м, не менее | 1,02 |
| • Количество слоёв мелющих тел, шт. | 10 |
| • Рабочий объём камеры, м ³ | 0,66 |
| • Масса мельницы, кг, не более (эскизная) | 2500 |
| • Количество мелющих тел в одном слое, шт. | 173 |

Комплекс определённых таким образом показателей ЭШМКТ позволяет разработать общее кон-

структурное решение ШМ, которое приведено на рис. 1. Распределение шаров и рудного материала по объёму помольной камеры на рис. 1 показано условно.

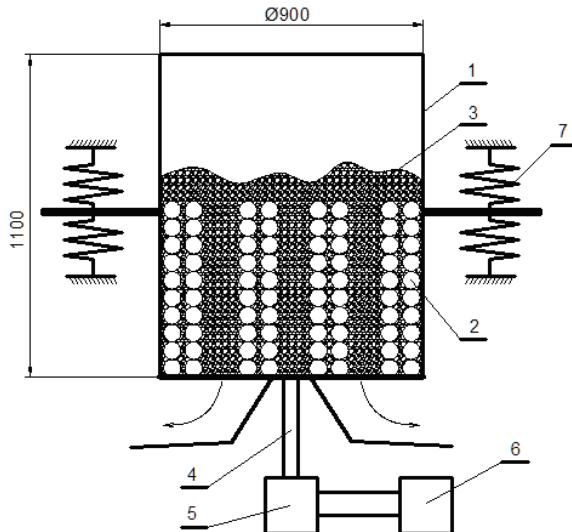


Рис. 1. Общая конструктивная схема ЭШМКТ: 1 – корпус помольной камеры; 2 – мелющие тела (шары); 3 – рудный материал; 4 – шток; 5 – ТЭМ; 6 – блок питания; 7 – пружинный подвес

Fig. 1. General construction diagram of an electro-magnetic ball mill of a vibrating type: 1 is the grinding chamber frame; 2 are the grinding bodies (balls); 3 is the ore; 4 is the shaft; 5 is the tractive electromagnet; 6 is the power unit; 7 is the spring suspension

Как следует из рис. 1, корпус помольной камеры – 1 ЭШМКТ с заполненными шарами – 2 и кусками – 3 конгломерата рудного материала совершают колебания в вертикальной плоскости под действием возмущающей силы, передаваемой на корпус через шток – 4 от ТЭМ – 5. От блока питания – 6 на ТЭМ – 5 подаётся переменное напряжение, которое регулируется по величине и частоте. Для пружинного подвешивания помольной камеры ЭШМКТ могут быть использованы цилиндрические пружины сжатия – 7.

Важнейшим позитивным показателем разработанной общей схемы ЭШМКТ является повышенное значение коэффициента использования рабочего объёма, который может быть равен от 0,7 до 0,8.

Колебательная система с общей массой, равной сумме масс помольной камеры, всех шаров и общей массе рудного материала, имеет собственную частоту, равную

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{C}{M}}, \quad (1)$$

где C – суммарная жёсткость пружинного подвешивания; M – общая масса всех совершающих колебания элементов.

Можно предположить, что при определённых параметрах колебаний помольной камеры ЭШМКТ будет происходить отрыв шаров нижнего

слоя от дна помольной камеры. Также возможно образование разрывов между слоями шаров и кусками рудного материала. Такое движение отдельных элементов колебательной системы будет сопровождаться ударами кусков рудного материала с мелющими телами друг с другом и с элементами конструкции помольной камеры. Многочисленно повторяющиеся удары будут приводить к разрушению кусков рудного материала [20]. Регулированием величины и частоты напряжения, подаваемого на ТЭМ, можно поддерживать режим работы ЭШМКТ, близкий к резонансному, с амплитудой колебаний корпуса помольной камеры, обеспечивающей получение требуемой крупности рудного материала с высокой производительностью при меньших энергозатратах.

Объективное моделирование работы сложной механической системы с очень большим количеством не связанных друг с другом отдельных элементов, что и представляет собой конструкция ЭШМКТ, является практически неразрешимой задачей. Однако на основе некоторых корректных допущений, относящихся к механике движения элементов ШМ, при математическом моделировании можно получить отдельные и важные практические рекомендации по разработке ЭШМКТ и режимам её работы.

В общем объёме помольной камеры ЭШМКТ можно выделить вертикальный столбец мелющих тел и рудного материала, ограниченный цилиндрическим пространством и представленный на рис. 2.

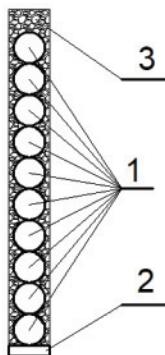


Рис. 2. Цилиндрический элемент ЭШМКТ: 1 – мелющие тела (шары) в количестве 10 шт.; 2 – часть конструкции помольной камеры, соответствующая проекции шара на днище; 3 – рудный материал, прилегающий к мелющим телам

Fig. 2. Tubular element of an electro-magnetic ball mill of a vibrating type: 1 is the grinding bodies (balls) (10 items); 2 is the section of a grinding chamber frame, conforming with the ball projection to the bottom; 3 is the ore adjacent to grinding bodies

При математическом моделировании движения составных частей механической системы, представленной на рис. 2, заменим массу десяти отдельных шаров одной массой, равной сумме масс всех этих шаров. Массу рудного материала, связанную с шарами, можно определить из условия

равенства объёмов всех мелющих тел ЭШМ и загружаемого рудного материала. Тогда общая масса одного из элементов колебательной системы будет складываться из массы десяти шаров и массы рудного материала, соответствующей указанному числу шаров. Изложенные выше преобразования позволяют разработать расчётную модель колебательной системы, представленной на рис. 3.

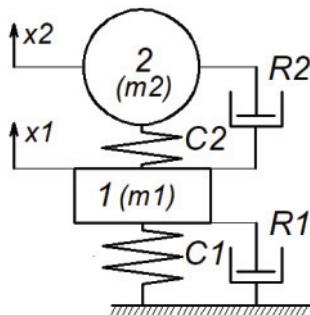


Рис. 3. Расчёчная схема двухмассовой колебательной системы ЭШМКТ

Fig. 3. Design model of a dual-mass vibration system of an electromagnetic ball mill of a vibrating type

На рис. 3 приняты следующие обозначения: m_2 – общая масса всех элементов, образующих тело 2 внутри помольной камеры (шары с рудным материалом); m_1 – масса тела 1, соответствующая определённой части общей массы помольной камеры ЭШМКТ; C_1 – жёсткость взаимодействия тела 1 с основанием установки ЭШМКТ; C_2 – жёсткость взаимодействия между телами 1 и 2; R_1 – коэффициент вязких потерь в пружинном подвесе ЭШМКТ; R_2 – коэффициент вязких потерь при колебаниях тела 2 относительно тела 1.

Согласно описанию рис. 2,

$$m_2 = m_{\text{ш}} + m_{\text{pm}} = 12,21 \text{ кг},$$

где $m_{\text{ш}}=8,82$ кг, масса 10 шаров; $m_{\text{pm}}=3,39$ кг, масса рудного материала.

Массу части общей массы помольной камеры m_1 определим из условия обеспечения прочности днища при её толщине не менее 30 мм. Для условий, изложенных в комментариях к рис. 2, масса m_1 может составлять расчётную величину не менее 4,0 кг.

Жёсткость взаимодействия между днищем помольной камеры и мелющими телами C_2 является переменной величиной, изменяющейся скачком. При колебаниях тел 1 и 2 и отсутствии зазора между ними, что практически соответствует условиям удара этих тел, и при движении m_1 вверх жёсткость C_2 можно определить, используя известное значение модуля упругости для стали $E=2 \cdot 10^{11}$ Па. Значение C_2 для этого случая и для принятых размеров элементов корпуса рабочей камеры и мелющих тел при математическом моделировании может быть принято равным величине в пределах от 10^7 до 10^9 Н/м. Во всех других случаях движения тел 1 и 2 значение C_2 можно принять равным нулю.

Жёсткость C_1 при известных массах m_1 и m_2 для условий резонанса можно определить расчётным путём по выражению (1). Следует обратить внимание на тот факт, что существуют два крайних расчётных значения C_1 : жёсткость C_{1_1} – соответствующая колебаниям только тела 1, и жёсткость $C_{1_{-2}}$ – соответствующая совместным колебаниям обоих тел 1 и 2 при их соприкосновении. Для определения расчётного численного значения C_1 первоначально примем величину собственной частоты колебательной системы, равную 25 Гц. Значения указанных жёсткостей при такой частоте: $C_{1_1}=103,5 \cdot 10^3$ Н/м; $C_{1_{-2}}=404,2 \cdot 10^3$ Н/м. В пересчёте значения общей жёсткости подвеса помольной камеры с рудным материалом эти жёсткости составляют соответственно: $17,25 \cdot 10^6$ и $78,87 \cdot 10^6$ Н/м. Изготовление цилиндрических пружин с указанными значениями жёсткости является практически не разрешимой задачей. Реально достижимым значением жёсткости пружины при её удовлетворительной долговечности является величина, не превышающая 10^5 Н/м. Учитывая это обстоятельство, следует принять пониженную частоту работы ЭШМКТ уровня не более 15 Гц. В этом случае значение жёсткости C_{1_1} , обеспечить которое можно путём параллельной установки нескольких пружин, составит $6,2 \cdot 10^6$ Н/м. Принимая во внимание это и то, что важным обстоятельством, влияющим на процессы разрушения рудного материала, являются параметры колебаний мелющих тел и конгломератов руды, в дальнейшем при моделировании будем ориентироваться на значение жёсткости подвеса помольной камеры, соответствующее расчётной схеме рис. 3, равное 10^5 Н/м.

Математическое моделирование режимов работы ЭШМКТ, представленной на расчётной схеме колебательной системы рис. 3, целесообразно провести для определения возможности и создания необходимых условий, обеспечивающих образование относительных колебаний между массами m_2 и m_1 с образованием зазоров, приводящих к взаимным ударам.

Колебания тел в схеме рис. 3 совершаются под действием возмущающей силы $F(t)$, создаваемой ТЭМ. Уравнение движения тела 1 с учётом всех сил, действующих на него, выглядит следующим образом:

$$m_{12} \frac{d^2 x_1}{dt^2} + R_1 \frac{dx_1}{dt} - R_2 \left(\frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_1}{dt} \right) +$$

$$+ C_1 x_1 - C_2 (x_2 - x_1) + P_1 + P_{21} = F(t) + F_{21}(t), \quad (2)$$

где m_{12} – суммарная масса тел 1 и 2 при условии $x_1 > x_2$; x_1 – смещение тела 1; x_2 – смещение тела 2; P_1 – сила тяжести тела 1; P_{21} – сила тяжести тела 2, действующая на тело 1 при $x_1 > x_2$; $F_{21}(t)$ – сила инерции тела 2, действующая на тело 1 при условии $x_1 > x_2$ и при движении тела 2 вниз.

Уравнение движения тела 2 с учётом всех сил, действующих на него, выглядит следующим образом:

$$m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + R_2 \left(\frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_1}{dt} \right) + C_2(x_2 - x_1) + P_2 = F_{12}(t) + F_2(t), \quad (3)$$

где P_2 – сила тяжести тела 2; $F_{12}(t)$ – сила инерции тела 1, действующая на тело 2 при условии $x_1 > x_2$ и движения тела 1 вверх; $F_2(t)$ – возмущающая сила $F(t)$, действующая на тело 2 при условии $x_1 > x_2$ и движения тела 1 вверх.

После преобразований уравнений (2) и (3) и при указанных выше корректных допущениях система дифференциальных уравнений, позволяющая моделировать режимы работы ЭШМКТ, выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{dy_1}{dt} = \frac{\left[F(t) - P_1 - P_{21} + F_{21}(t) - R_1 y_1 - C_1 x_1 + R_2(y_2 - y_1) + C_2(x_2 - x_1) \right]}{m_{12}(t)}; \\ \frac{dy_2}{dt} = \frac{\left[F_2(t) + F_{12}(t) - P_2 - R_2(y_2 - y_1) - C_2(x_2 - x_1) \right]}{m_2}. \end{cases} \quad (4)$$

Согласно (4), y_1 и y_2 соответствуют скоростям движения тел 1 и 2, а их производные – соответственно ускорениям этих тел. Масса $m_{12}(t)$ является переменной величиной, изменение которой можно учесть следующим образом: при $x_1 > x_2$ $m_{12}(t) = m_1 + m_2$, в противном случае $m_{12}(t) = m_1$.

Особое внимание при решении системы дифференциальных уравнений (4) следует обратить на соблюдение условий взаимодействия двух практически механически не связанных колеблющихся тел 1 и 2.

Знакопеременную возмущающую силу $F(t)$, создаваемую ТЭМ, при моделировании задаём в соответствие с выражением

$$F(t) = \pm F_m \cos\left(2\pi f t + \frac{\pi}{2}\right), \quad (5)$$

где F_m – амплитуда возмущающей силы; f – частота питающего напряжения ТЭМ.

Частота возмущающей силы, действующей на помольную камеру ЭШМКТ и определяемой по выражению (5), в этом случае будет соответствовать двойному значению f . Знаки «+» или «-» определяют начальное направление действия возмущающей силы ТЭМ.

Не меньший интерес при анализе режимов работы ЭШМКТ представляют процессы, сопровождающиеся относительными колебаниями отдельных слоёв мелющих тел. Данные процессы можно рассмотреть на основе трёхмассовой колебательной системы, приведённой на рис. 4.

На данной схеме в отличие от рис. 3 представлены два слоя мелющих тел 2 и 3, взаимодействие которых характеризуется дополнительными параметрами: смещение – x_3 ; жёсткость – C_3 ; коэффициент вязких потерь – R_3 . Значения жёсткости C_3 принимаем аналогичными C_2 . Коэффициент вязких потерь R_3 определяется потерями на трение между телами 3 и 1.

Используя аналогичные предыдущему случаю подходы к анализу взаимодействия элементов колебательной системы рис. 4, получим систему дифференциальных уравнений (6), решая которую можно анализировать более сложные режимы работы ЭШМКТ. Главной особенностью системы уравнений (6) является наличие возможности проведения анализа процессов, связанных с образованием зазоров между мелющими телами 2 и 3.

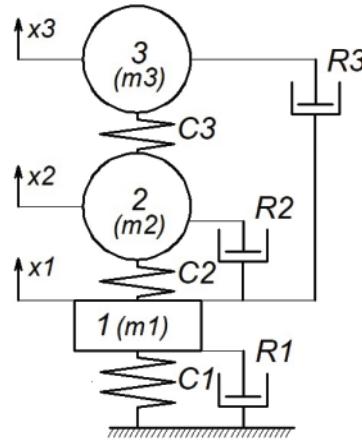


Рис. 4. Расчётная схема трёхмассовой колебательной системы ЭШМКТ

Fig. 4. Design model of a three-mass vibration system of an electromagnetic ball mill of a vibrating type

$$\begin{cases} \frac{dy_1}{dt} = \frac{\left[F(t) - P_1 - P_{21} - P_{31} + F_{21}(t) + F_{31}(t) - R_1 y_1 - C_1 x_1 + R_2(y_2 - y_1) + C_2(x_2 - x_1) \right]}{m_{123}(t)}; \\ \frac{dy_2}{dt} = \frac{\left[F_2(t) - P_2 - P_{32} + F_{12}(t) + F_{32}(t) - R_2(y_2 - y_1) - C_2(x_2 - x_1) - C_3(x_2 - x_3) - R_3(y_2 - y_3) \right]}{m_{23}(t)}; \\ \frac{dy_3}{dt} = \frac{\left[F_3(t) - P_3 + F_{13}(t) + F_{23}(t) - R_3(y_3 - y_2) - C_2(x_3 - x_2) \right]}{m_3}. \end{cases} \quad (6)$$

Система (6) содержит дополнительные переменные: y_3 – скорость движения тела 3; P_{31} – сила тяжести тела 3, действующая на тело 1 при $x_1 > x_2 > x_3$; $F_{31}(t)$ – сила инерции тела 3, действующая на тело 1 при $x_1 > x_2 > x_3$ и $y_2 < y_3 < 0$; m_3 – масса тела 3; $m_{123}(t)$ – масса тела 1 с присоединёнными в определённых моментах массами тел 2 и 3; $m_{23}(t)$ – масса тела 2 с присоединённой в определённых моментах массой тела 3; P_{32} – сила тяжести тела 3, действующая на тело 2 при $x_2 > x_3$; $F_{32}(t)$ – сила инерции тела 3, действующая на тело 2 при $x_2 > x_3$ и $y_3 < 0$; $F_3(t)$ – возмущающая сила, действующая на тело 3 при условии $x_1 > x_2 > x_3$ и $y_1 > y_2 > 0$; $F_{13}(t)$ – сила инерции тела 1, действующая на тело 3 при $x_1 > x_2 > x_3$ и $y_1 > y_2 > 0$; $F_{23}(t)$ – сила инерции тела 2, действующая на тело 3 при $x_2 > x_3$ и $y_2 > 0$.

Системы дифференциальных уравнений (4) и (6) решаются численным методом Рунге–Кутты. Входными изменяющимися параметрами, влияющими на решения, являются: амплитуда возмущающей силы, значение частоты возмущающей силы, масса помольной камеры ЭШМКТ и суммарная масса мелющих тел и рудного материала. В результате решений систем уравнений (4) и (6) могут быть получены информативные данные об изменениях во времени смещений, скоростей и ускорений тел 1, 2 и 3. Действующее значение мощности, требуемой от ТЭМ, в различных режимах работы ЭШМКТ при математическом моделировании рассчитывается по следующей формуле

$$P_{\text{действ}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{\frac{T_{\text{расч}}}{h}(N-n)T_{\text{пер}}} P_i^2 h}{nT_{\text{пер}}}}, \quad (7)$$

где P_i – мгновенное значение мощности, затрачиваемой на колебания тела 1; N – количество точек расчёта; n – количество точек расчёта для установившегося режима; $T_{\text{расч}}$ – время расчёта; $T_{\text{пер}}$ – период колебаний; h – шаг расчёта.

Результаты

Для моделирования режимов работы ЭШМКТ по уравнениям (4) необходимо определиться с коэффициентами вязких потерь $R1$, $R2$. Потери в пружинном подвесе, определяющие величину $R1$, при небольших амплитудах колебаний тела 1 составляют достаточно небольшую величину. Имеющаяся информация о работе реальных пружинных подвесов с массами, аналогичными массам тел 1 и 2, позволяет принять значение $R1$, не превышающее величину 10 кг/с. Потери на вязкое трение при колебаниях тела 2 будут, естественно, больше, чем $R1$. Данные потери возникают при точечных соприкосновениях мелющих тел, представленных на рис. 2, с рядом расположенныхми мелющими телами, кусками рудного материала и элементами конструкции помольной камеры. Реально возможные значения сопротивления $R2$, предположительно, могут составлять не менее 200 кг/с.

Таким образом, нами определены основные данные, необходимые для моделирования различных режимов работы ЭШМКТ по уравнениям (4) и (6).

Первоначально решим задачу определения условий, при которых могут возникать значимые зазоры между телами 1 и 2 в системе рис. 3. Графики изменения $x1$ и $x2$ во времени при $Fm=150$ Н, $m1=4,21$ кг, $m2=12,21$ кг, $C1=100 \cdot 10^3$ Н/м, $C2=10^8$ Н/м, $R1=10$ кг/с, $R2=400$ кг/с, $f_{\text{пер}}=16,4$ Гц приведены на рис. 5. Частота колебаний 16,4 Гц была определена расчётами и соответствует резонансу, что иллюстрируется рис. 6.

Как видно из рис. 5 для приведённых выше данных при работе ЭШМКТ в режиме резонанса между днищем помольной камеры и мелющими телами возникают существенные зазоры (до 5 мм), чередующиеся со столкновениями этих тел, при-

чём столкновения происходят на каждом периоде колебаний помольной камеры. Амплитудно-частотные характеристики рис. 6 свидетельствуют о наличии резонанса на частоте 16,4 Гц.

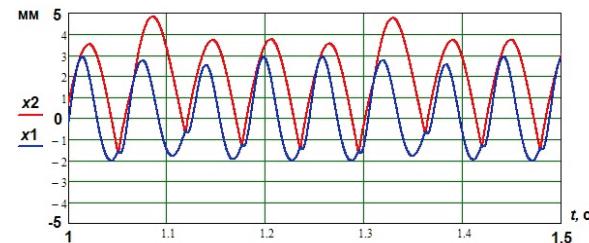


Рис. 5. Смещение тел 1 и 2 при частоте $f=16,4$ Гц

Fig. 5. 1 and 2 bodies shift on a frequency of $f=16,4$ Hz

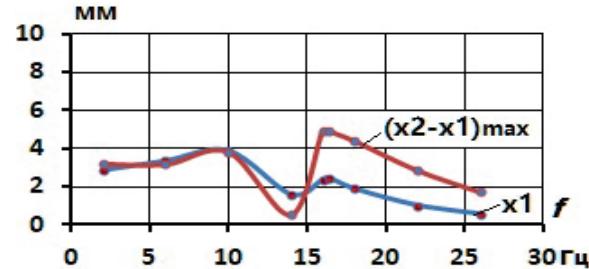


Рис. 6. Амплитудно-частотные характеристики ЭШМКТ (рис. 3)

Fig. 6. Amplitude-frequency response of an electro-magnetic ball mill of a vibrating type (Fig. 3)

Для сравнения на рис. 7 приведены аналогичные зависимости при частоте возмущающей силы 40 Гц. На данной частоте возмущающей силы амплитуда колебаний тела 2 резко уменьшается, что приводит к значительному уменьшению максимального зазора между телами 1 и 2, который не превышает 1,0 мм.

На рис. 8 приведено изменение величины данного зазора, соответствующее разности в мгновенных значениях $x2$ и $x1$. Максимальное расчётное значение образующегося зазора между нижним слоем шаров и днищем помольной камеры при работе ЭШМКТ с указанными выше параметрами составляет порядка 5,0 мм при необходимой мощности, рассчитываемой по формуле (7), равной 2,18 кВт.

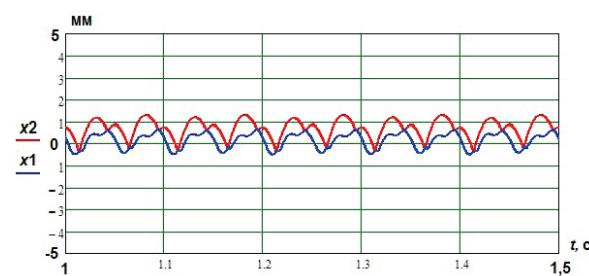


Рис. 7. Смещение тел 1 и 2 при $f=40$ Гц

Fig. 7. 1 and 2 bodies shift with $f=40$ Hz

Далее расчёты показывают, что изменения величины амплитуды возмущающей силы Fm , можно менять режимы работы ЭШМКТ, тем самым прог-

нозировать условия, при которых возникает и устанавливается определённый зазор между телами 1 и 2. На рис. 9 приведен график изменения $\Delta x_{\max} = x_2(t) - x_1(t)$ при варьировании амплитуды возмущающей силы F_m на частоте 16,4 Гц.

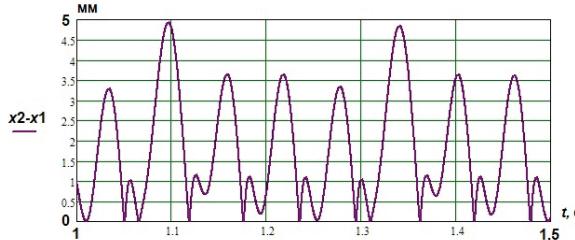


Рис. 8. Изменение зазора между телами 2 и 1

Fig. 8. Clearance modification between bodies 2 and 1

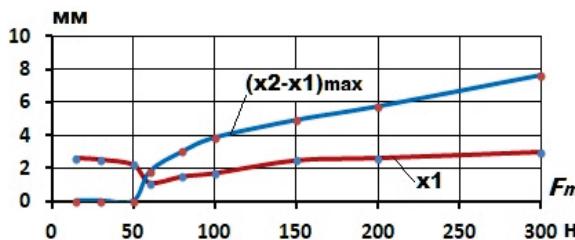


Рис. 9. Зависимость Δx_{\max} от F_m

Fig. 9. Dependence of Δx_{\max} on F_m

Как следует из данного рисунка, при $F_m < 50$ Н тела 1 и 2 совершают колебания практически без образования зазоров между ними. Далее при увеличении F_m образующийся зазор Δx_{\max} возрастает практически по линейному закону. Следовательно, режимы работы ЭШМКТ при постоянной частоте можно регулировать изменение F_m , добиваясь определённых значений зазора между телами 1 и 2, от величины которого зависит производительность мельницы. При $F_m > 150$ Н величина Δx_{\max} становится достаточно большой, что позволяет принять данное значение F_m для рассматриваемого варианта ЭШМКТ как основное рабочее, для которого максимальный зазор между днищем помольной камеры и нижним слоем мелющих тел составляет не менее 5,0 мм при подводимой мощности, определяемой по выражению (7) и равной 2,18 кВт.

На рис. 10 представлены результаты расчётов режимов работы ЭШМКТ при изменении механического сопротивления R_2 . При незначительных величинах R_2 зазор между мелющими телами и днищем помольной камеры ЭШМКТ может возрасти до нескольких десятков миллиметров. Надо отметить, что эти данные при отмеченных выше ограничениях носят чисто теоретический характер. Практически величина сопротивления R_2 в реальных условиях, вероятнее всего, составляет не менее 200 кг/с и выше.

На рис. 11 приведен график изменения величины Δx_{\max} от изменения массы помольной камеры, свидетельствующий о некотором увеличении зазоров между мелющими телами и днищем помоль-

ной камеры при увеличении массы m_1 , однако это наблюдается до определённого предела. Для рассмотренного случая масса m_1 не должна превышать 7,2 кг, что соответствует общей массе помольной камеры в 1250 кг.

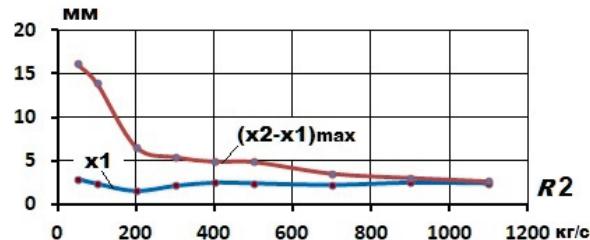


Рис. 10. Зависимость Δx_{\max} от R_2 при $F_m=150$ Н

Fig. 10. Dependence of Δx_{\max} on R_2 with $F_m=150$ N

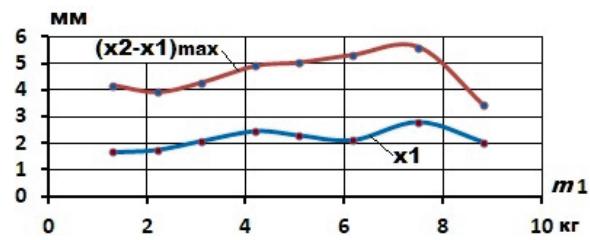


Рис. 11. Зависимость Δx_{\max} от m_1 при $F_m=150$ Н

Fig. 11. Dependence of Δx_{\max} on m_1 with $F_m=150$ N

Особый интерес представляет математическое моделирование режимов работы трёхмассовой колебательной системы ЭШМКТ (рис. 4) с позиций определения условий образования зазоров между днищем помольной камеры и нижним слоем мелющих тел, а также между отдельными слоями мелющих тел.

На рис. 12 приведены графики изменения x_1 , x_2 и x_3 при следующих параметрах: $F_m=150$ Н, $m_1=4,21$ кг, $m_2=1,21$ кг, $m_3=11,0$ кг, $C_1=100 \cdot 10^3$ Н/м, $R_1=10$ кг/с, $R_2=40$ кг/с, $C_2=C_3=10^8$ Н/м, $R_3=360$ кг/с, $f_{\text{pea}}=20,4$ Гц. При этом тело 2 образует один нижний слой мелющих тел с соответствующим количеством рудного материала, а тело 3 – все остальные девять слоёв мелющих тел и соответствующий им рудный материал. Частота $f=20,4$ Гц соответствует квазирезонансному режиму работы ЭШМКТ по рис. 4.

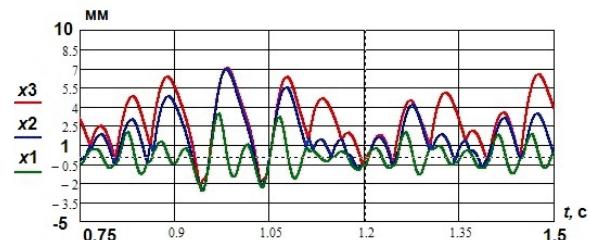


Рис. 12. Смещение x_1 , x_2 , x_3 при $f=20,4$ Гц

Fig. 12. x_1 , x_2 , x_3 shift with $f=20,4$ Hz

На рис. 13, 14 приведены соответствующие изменения зазоров между телами 1, 2 и 3. Как видно из представленных рисунков, величины зазоров между

телами 1, 2 и 3 для рассматриваемой трёхмассовой системы превышают зазоры, образующиеся в двухмассовой системе. При этом наблюдается некоторая нестабильность циклов для обоих случаев.

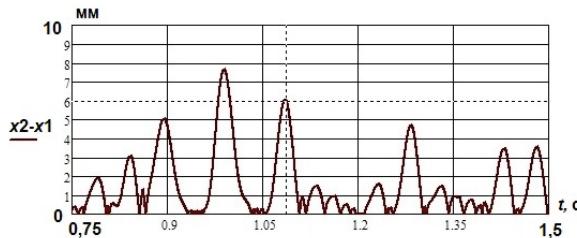


Рис. 13. Изменение зазора между телами 2 и 1

Fig. 13. Clearance modification between bodies 2 and 1

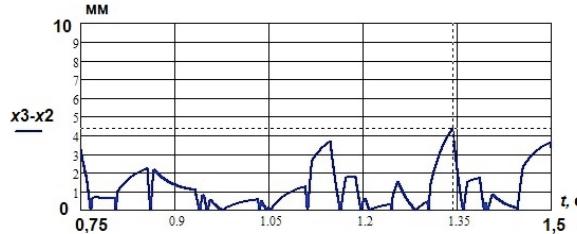


Рис. 14. Изменение зазора между телами 3 и 2

Fig. 14. Clearance modification between bodies 3 and 2

Проведённые расчёты при изменении частоты питающего напряжения выявили ещё одну особенность трёхмассовой системы. В данной системе по отношению к двухмассовой системе резонанс смещается в сторону большей частоты, равной 20,4 Гц, что иллюстрируется рис. 15.

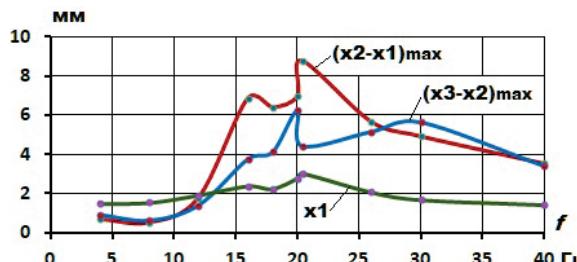


Рис. 15. Амплитудно-частотные характеристики ЭШМКТ (рис. 4)

Fig. 15. Amplitude-frequency response of an electro-magnetic ball mill of a vibrating type (Fig. 4)

Как следует из представленных графиков на рис. 5, 7, 11, в определённые моменты происходит соударение между мелющими телами друг с другом и с днищем помольной камеры. На рис. 14, 15 приведены графики изменения взаимных скоростей y_1 , y_2 и y_3 . В квазирезонансных режимах максимальная скорость соударений днища помольной камеры и нижнего слоя шаров составляет порядка 1,2 м/с, а скорость соударений между слоями шаров – не менее 1,8 м/с.

Указанные значения скоростей соударений в ЭШМКТ превышают значения относительных скоростей, имеющих место в барабанных ШМ: скорость подъёма шаров по ободу барабана ШМ не

превышает 1,0 м/с, скорость падения шаров не превышает 1,5 м/с. Однако конструкция традиционной барабанной ШМ не предполагает встречного движения мелющих тел с приведёнными скоростями и к тому же количество шаров, обладающих такими скоростями существенно ограничено и не превышает 10–15 % [21]. Для рассматриваемой конструкции ЭШМКТ приведённые значения скорости соударений характерны для всех мелющих тел по всему объёму, что свидетельствует о её более высокой эффективности.

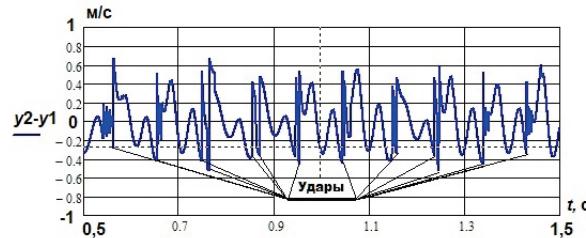


Рис. 16. Относительная скорость тел 2 и 1

Fig. 16. Relative velocity of bodies 2 and 1

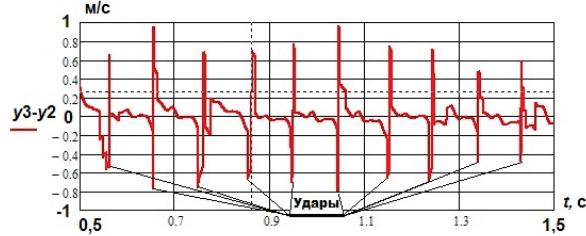


Рис. 17. Относительная скорость тел 3 и 2

Fig. 17. Relative velocity of bodies 3 and 2

Как было отмечено ранее при амплитуде возмущающей силы F_m не менее 150 Н формирующиеся в процессе работы ЭШМКТ зазоры между телами 1, 2 и 3 являются достаточными для эффективной работы. Мощность ТЭМ, создающего требуемую возмущающую силу, при этом составляет не более 4,0 кВт, что в пять раз меньше, чем для выбранного ранее аналога ШМ.

Следовательно, принимая во внимание приведённые результаты математического моделирования, вполне логичным и достоверным является предположение о более высокой эффективности рассмотренной конструкции ЭШМКТ по сравнению с барабанными ШМ.

Выходы

1. Разработанная математическая модель позволяет осуществлять анализ работы ЭШМКТ в широком диапазоне изменения амплитуды и частоты возмущающей силы с целью определения условий создания квазирезонансного режима при различных параметрах колебательной системы. Квазирезонансный режим работы ЭШМКТ характеризуется высокими скоростями соударений мелющих тел друг с другом и с элементами помольной камеры, что предопределяет более высокую эффективность процес-

- сов измельчения рудного материала. Регулирование амплитуды и частоты возмущающей силы позволяет оптимизировать процесс получения конечного продукта требуемой крупности с наименьшими затратами энергии.
2. Коэффициент использования рабочего объёма помольной камеры ЭШМКТ практически в два раза превышает аналогичное значение для барабанной ШМ при значительном сокращении затрат электроэнергии. Прогнозируемый расход электроэнергии ЭШМКТ составляет не более 15,0 кВт на тонну готовой продукции. Зна-

чения тяговых усилий, создаваемых ТЭМ, при этом должны быть не менее 5,0 Н на один килограмм общей загрузки помольной камеры.

3. Рекомендуемое значение частоты возмущающей силы, зависящей от частоты питающего напряжения ТЭМ, определяется соотношением масс незаполненной помольной камеры, массой её технологической загрузки с мелющими телами и жёсткостью пружинного подвеса камеры. По техническим и технологическим характеристикам оптимальная частота работы ЭШМКТ находится в диапазоне от 10 до 20 Гц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вопросы оптимизации процесса дробления упорных руд / В.С. Портнов, В.М. Юров, А.К. Турсунбаева, Р.К. Камаров, А.Д. Мехтиев, С.Е. Орынгожина // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 9. – С. 167–170.
2. Ханин С.И. Разработка научных основ проектирования шаровых мельниц с энергообменными и классифицирующими устройствами: дис. ... д-ра техн. наук. – Белгород, 2016. – 483 с.
3. Багдасарян М.К. К определению полезной мощности усовершенствованной конструкции барабанной мельницы // Горное оборудование и электромеханика. – 2010. – № 11. – С. 45–48.
4. Copper ore grinding in a mobile vertical roller mill pilot plant / D. Altun, C. Gerold, H. Benzer, O. Altun, N. Aydogan // International Journal of Mineral Processing. – 10 March 2015. – V. 136. – P. 32–36.
5. Effect of different grinding media composition on the flotation of a PGM ore / Z.G. Song, K.C. Corin, J.G. Wiese, C.T. O'Connor // Minerals Engineering. – 1 August 2018. – V. 124. – P. 74–76.
6. Friction and wear of liner and grinding ball in iron ore ball mill / Yu-xing Peng, Xu Ni, Zhen-cai Zhu, Zhang-fa Yu, Jie Xu // Tribology International. – November 2017. – V. 115. – P. 506–517.
7. De Oliveira Alessandro L.R., Tavares L.M. Modeling and simulation of continuous open circuit dry grinding in a pilot-scale ball mill using Austin's and Nomura's models // Powder Technology. – December 2018. – V. 340. – P. 77–87.
8. Quantifying variability of ore breakage by impact – Implications for SAG mill performance / F. Faramarzi, V. Jokovic, R. Morrison, S.S. Kanchibotla // Minerals Engineering. – October 2018. – V. 127. – P. 81–89.
9. Fengnian Shi, Weiguo Xie. A specific energy-based ball mill model: From batch grinding to continuous operation // Minerals Engineering. – February 2016. – V. 86. – P. 66–74.
10. Оценка эффективности виброзмельчения минеральных материалов применительно к твёрдым отходам фтороводородного производства / Ю. М. Федорчук, В.А. Данекер, А.А. Волков, А.М. Адам, Л.А. Аниканова // Международный журнал при-
кладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 1. – С. 325–330.
11. Булгаков Е.Б. Вертикальная вибрационная мельница: дис. ... канд. техн. наук. – Белгород, 2008. – 166 с.
12. Operational parameters affecting the vertical roller mill performance / D. Altun, H. Benzer, N. Aydogan, C. Gerold // Minerals Engineering. – April 2017. – V. 103–104. – P. 67–71.
13. Данекер В.А., Рикконен С.В. Приготовление и коррекция показателей бурового раствора технологией и оборудованием ВСМА // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 7. – С. 86–92.
14. Быховский И.И. Основы теории вибрационной техники. – М.: Машиностроение, 1969. – 363 с.
15. Ханин С.И. Математическая модель процесса движения мелющих тел в трубной мельнице с винтовыми устройствами // Вестник Белгородского государственного технического университета имени В.Г. Шухова. – 2009. – № 3. – С. 127–130.
16. Мейсснер П., Плохбергер Т., Бем А. Определение параметров помола в вертикальных мельницах // Цемент и его применение. – 2012. – № 6. – С. 104–110.
17. Пелевин А.Е., Мушкетов Ант.Анд. Кинетика измельчения классов крупности титаномагнетитовой руды // Известия вузов. Горный журнал. – 2014. – № 3. – С. 91–96.
18. Quantifying variability of ore breakage by impact – Implications for SAG mill performance / F. Faramarzi, V. Jokovic, R. Morrison, S.S. Kanchibotla // Minerals Engineering. – October 2018. – V. 127. – P. 81–89.
19. Влияние структуры системы измельчения шаровой мельницей на ее производительность / С.И. Шувалов, Г.Г. Михеев, А.А. Веренин, Н.С. Асташов // Цемент и его применение. – 2011. – № 5. – С. 22–24.
20. Ханин С.И. Характеристики процесса движения мелющих тел в цилиндрическом корпусе шаровой барабанной мельницы // Вестник Белгородского государственного технического университета имени В.Г. Шухова – 2012. – № 3. – С. 91–94.

Поступила 28.02.2019 г.

Информация об авторах

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

UDC 621.926.55

MATHEMATICAL SIMULATION OF OPERATIONAL MODES OF A VIBRATING BALL MILL

Valery A. Danecker,

vad@tpu.ru

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

The relevance of the research is caused by the need to develop highly-efficient resource-saving equipment, used for kibbling and grinding ore in mining industry. One of the possible solution is the development of ball mills of a vibrating type with AC tractive electromagnet. Connecting a tractive electromagnet to AC voltage source enables a long-range adjustment of operational mode of a ball mill and ensures its operation in quasi-resonant regimes. Mathematical simulation of operational modes of a ball mill of a vibrating type allows determining standards for a vibratory system when changing frequency and value of power supply and generating guidelines to be considered in production prototypes design. Additionally, operation of a ball mill of a vibrating type in quasi-resonant regimes is followed by significant reduction of energy consumption along with productivity gain.

The aim of the research is to develop a mathematical model of operation of a ball mill of a vibrating type with a tractive electromagnet powered by a variable frequency power supply; in terms of the developed mathematical model to calculate the operational modes of a ball mill of a vibrating type and generate the guidelines for use in developing a ball mill.

Methods. Mathematical simulation of operational modes of a ball mill was carried out by a numerical solution of a differential system of elements movement in a vibratory system. Vibratory system parameters were calculated with regard to objective technical data of the similar equipment produced.

Results. The mathematical model of a ball mill of a vibrating type allows determining a range of effective tractive efforts and power supply frequencies of a tractive electromagnet, relevant to a quasi-resonant operation mode when changing vibratory system parameters. With the appropriate quasi-resonant frequency span and masses of elements of a vibratory system we can determine tractive electromagnet parameters, design and specification of a spring suspension of a ball mill.

Key words:

Ore, kibbling, grinding, ball mill, vibratory mill, vibratory system, tractive electromagnet, resonance.

REFERENCES

1. Portnov V.S., Yurov V.M., Tursunbaeva A.K., Kamarov R.K., Mekhtiev A.D., Oryngozhina S.E. Optimization of refractory ores breaking. *Fundamental studies*, 2012, no. 9, pp. 167–170. In Rus.
2. Khanin S.I. *Razrabotka nauchnykh osnov proektirovaniya sharykh melnits s energoobmennymi i klassifitsiruyushchimi ustroystvami*. Dis. Kand. nauk [Development of scientific basics for designing ball mills with energy-exchanged devices and circuit guards]. Cand. Diss.]. Belgorod, 2016. 483 p.
3. Bagdasaryan M.K. On determining useful power of a drum mill of an improved design. *Mining equipment and electromechanics*, 2010, no.11, pp. 45–48. In Rus.
4. Altun D., Gerold C., Benzer H., Altun O., Aydogan N. Copper ore grinding in a mobile vertical roller mill pilot plant. *International Journal of Mineral Processing*, 10 March 2015, vol. 136, pp. 32–36.
5. Song Z.G., Corin K.C., Wiese J.G., O'Connor C.T. Effect of different grinding media composition on the flotation of a PGM ore. *Minerals Engineering*, 1 August 2018, vol. 124, pp. 74–76.
6. Yu-xing Peng, Xu Ni, Zhen-cai Zhu, Zhang-fa Yu, Jie Xu. Friction and wear of liner and grinding ball in iron ore ball mill. *Triboology International*, November 2017, vol. 115, pp. 506–517.
7. De Oliveira Alessandro L.R., Tavares L.M. Modeling and simulation of continuous open circuit dry grinding in a pilot-scale ball mill using Austin's and Nomura's models. *Powder Technology*, December 2018, vol. 340, pp. 77–87.
8. Faramarzi F., Jokovic V., Morrison R., Kanchibotla S.S. Quantifying variability of ore breakage by impact – Implications for SAG mill performance. *Minerals Engineering*, October 2018, vol. 127, pp. 81–89.
9. Fengnian Shi, Weiguo Xie. A specific energy-based ball mill model: from batch grinding to continuous operation. *Minerals Engineering*, February 2016, vol. 86, pp. 66–74.
10. Fedorchuk Yu.M. Evaluating the effectiveness of vibroizmelcheniya mineral materials applied to solid waste production of hydrogen fluoride. *Mezhdunarodny zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovanii*, 2016, no. 1, P. 3, pp. 325–330. In Rus.
11. Bulgakov E.B. *Vertikalnaya vibratsionnaya melnitsa*. Dis. Kand. nauk [A vertical jar mill. Cand. Diss.]. Belgorod, 2008. 166 p.
12. Altun D., Benzer H., Aydogan N., Gerold C. Operational parameters affecting the vertical roller mill performance. *Minerals Engineering*, April 2017, vol. 103–104, pp. 67–71.
13. Danecker V.A., Rikkonen S.V. Preparation and correction of drilling mud by technology and equipment of vibro-jet-magnetic activation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 7 pp. 86–92. In Rus.
14. Bykhovskiy I.I. *Osnovy teorii vibratsionnoy tekhniki* [Fundamentals of vibration engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1969. 363 p.
15. Khanin S.I. Mathematical model of driving grinding bodies in tubular mills with screwdowns. *Bulletin of Belgorod state engineering university named after V.G. Shukhov*, 2009, no. 3, pp. 127–130. In Rus.
16. Meissner P., Plokberger T., Bem A. Opredelenie parametrov pomola v vertikalnykh melnitsakh [Determining grinding properties in vertical jar mills]. *Concrete and its use*, 2012, no. 6, pp. 104–110.
17. Pelevin A.E., Mushketov A.A. Grinding kinetics of grain-size classes of titanium magnetite ore. *News of Higher Educational Institutions. Journal of mining*, 2014, no. 3, pp. 91–96. In Rus.
18. Faramarzi F., Jokovic V., Morrison R., Kanchibotla S.S. Quantifying variability of ore breakage by impact – Implications for SAG mill performance. *Minerals Engineering*, October 2018, vol. 127, pp. 81–89.
19. Shuvalov S.I., Mikheev G.G., Verenin A.A., Astashov N.S. Vliyanie struktury sistemy izmelcheniya sharovoy melnitsy na ee proizvoditelnost [Influence of a grinding system structure with a ball

- mill on its productivity]. *Concrete and its use*, 2011, no. 5, pp. 22–24.
20. Khanin S.I Kharakteristiki protsessa dvizheniya melyushchikh tel v tsilindricheskem korpusе sharovoy barabannoy melnitsy [Characteristics of driving grinding bodies in a cylindrical body of a ball tube mill]. *Bulletin of Belgorod state engineering university named after V.G. Shukhov*, 2012, no. 3, pp. 91–94.

Received: 28 February 2019.

Information about the authors

Valery A. Daneker, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 665.613: 543.57

ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ МАСЕЛ ПРИРОДНЫХ БИТУМОВ И НЕФЕЙ

Антипенко Владимир Родионович¹,
avr@ipc.tsc.ru

Баканова Ольга Сергеевна¹,
olgapushkar@mail.ru

Кашапов Роман Сергеевич²,
KashapovRS@tomsknipi.ru

¹ Институт химии нефти СО РАН,
Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 4.

² ОАО «ТомскНИПИнефть»,
Россия, 634027, Томск, пр. Мира, 72.

Актуальность исследования обусловлена тем, что термическая деструкция является одним из самых распространенных процессов переработки нефтяных остатков, тяжелых нефтей и природных битумов. Термические и термокатализитические процессы конверсии перечисленного углеводородного сырья сопровождаются образованием при термодеструкции смолисто-асфальтеновых веществ исходных объектов дополнительного количества дистиллятных фракций («вторичных» масел). Одновременно происходят процессы превращения масел исходного объекта и «вторичных» масел при температурах, соответствующих термической деструкции «слабых» и «прочных» связей в соединениях, входящих в их состав. При выборе оптимальных режимов термической и термокатализитической переработки тяжелого нефтяного сырья должны учитываться результаты оценки термической устойчивости содержащихся в них компонентов. Одним из методов изучения термической стабильности органического вещества осадочных пород является пиролитический анализ в варианте Rock-Eval. Сведения о возможностях этого метода для анализа масел весьма ограничены. В то же время из программы масел можно получить информацию об их термической устойчивости и характеристических температурах деструкции содержащихся в них компонентов. А также получить информацию о различии этих параметров для масел, выделенных из нефтей и природных битумов, отобранных в различных нефтегазоносных провинциях и существенно отличающихся своим компонентным составом.

Цель: сравнительный анализ с использованием метода Rock-Eval параметров термической устойчивости масел, выделенных из природных битумов и нефей, отличающихся суммарным содержанием смолисто-асфальтеновых веществ, а также продуктов их лабораторной биодеградации и конверсии в сверхкритической воде.

Объекты: масла, выделенные из 18 образцов нефтей и природных битумов, продуктов их лабораторной биодеградации и конверсии в сверхкритической воде.

Методы: анализ элементного состава, ЯМР ¹H-спектроскопия, пиролитический анализ в варианте Rock-Eval.

Результаты. Показано, что методом Rock-Eval можно получить информацию о термической устойчивости масел, выделенных из нефтей и природных битумов, отобранных в различных нефтегазоносных провинциях и отличающихся компонентным составом. Программы масел содержат три пика, проявляющиеся в различных интервалах температур. Пик S1 (изотерма 180 °C) соответствует процессу испарения бензиновой фракции (НК..180 °C). Пик S2a (180...350 °C) соответствует наложению процесса испарения «средних» фракций масел и деструкции «слабых» C-S, C-O связей в структурных фрагментах их компонентов. Пик S2b (350...550 °C) соответствует наложению испарения «высококипящих» компонентов масел и деструкции «прочных» C-O, C-C связей в их структурных фрагментах. Изученные образцы более чем на порядок (от 0,32 до 3,91) отличаются отношением выхода летучих продуктов при 350...550 и 180...350 °C (S_{2b}/S_{2a}), а также отношением выхода бензиновой фракции масел – S₁ и ($S_{2b}+S_{2a}$) (от 0,044 до 0,518). Изученные образцы масел также отличаются температурой максимальной скорости выхода углеводородов в процессе пиролиза в области пика S2b (от 445 до 466 °C) и более существенно в области пика S2a (от 292 до 350 °C).

Ключевые слова:

Нефти, природные битумы, масла, выделение, состав, Rock-Eval-анализ, термическая устойчивость.

Введение

Промышленные процессы термической и термокатализитической конверсии тяжелых нефтей, природных битумов и их остаточных фракций [1, 2] сопровождаются образованием при термодеструкции смолисто-асфальтеновых веществ (САВ) исходных объектов дополнительного количества дистиллятных фракций («вторичных» масел). Одновременно происходят процессы превращения масел исходного объекта и «вторичных» масел при температурах, соответствующих термической деструкции «слабых» и «прочных» связей в соединениях, входящих в их состав. В [3, 4] выявлено за-

метное изменение относительного содержания и состава гопанов, алкилбензолов, нафтилов, ди-бензотиофенов в летучих продуктах фланш-пиролиза масел нефтей и природного асфальтита при изменении температуры от 300...400 до 650 °C. Эти результаты свидетельствуют о наличии в маслах высокомолекулярных образований, в которых перечисленные соединения находятся в виде ковалентно связанных структурных фрагментов. Дополнительные аргументы в пользу этого вывода были получены в [5, 6] при использовании селективных химических реакций для разрыва сульфидных и эфирных мостиков в компонентах масел

природного битума (мальты) Ашальчинского месторождения. Анализ полученных продуктов методом хроматомасс-спектрометрии позволил установить, что алкилтриметилбензолы, алкилциклогексаны, хейлантаны, гопаны и фенантрены присутствуют в маслах этого битума не только в молекулярной форме, но частично в виде химически связанных структурных фрагментов в составе сложных высокомолекулярных образований. Структурные фрагменты в таких образованиях, по-видимому, могут быть связаны не только через сульфидные и эфирные мостики, но и полиметиленовыми цепочками.

Учитывая различия в энергии разрыва соответствующих связей: для S-S и C-S связей – 226 и 272 кДж/моль, соответственно, для C-C и C-O связей – 348 и 358 кДж/моль, соответственно [7], можно предполагать, что при термическом воздействии их разрыв будет происходить при различных температурах. Одним из методов изучения термической стабильности органических веществ является пиролитический анализ.

Пиролитический анализ в варианте Rock-Eval, впервые предложенный в [8], широко применяется для оценки нефтегазогенерационного потенциала осадочных пород, характеристики термической устойчивости нерастворимого органического вещества пород (керогена), а также битумоидов и выделенных из них САВ [9–17]. Сущность этого метода – фиксация с использованием пламенно-ионизационного детектора количества летучих органических веществ (углеводородов), образующихся из исследуемого образца при его нагреве в токе инертного газа (гелия или азота) в открытой пиролитической системе. В зависимости от целей и исходных образцов, Rock-Eval анализ проводят в различных температурных программах (циклах).

При исследовании осадочных пород считается, что при нагреве до температуры 300 °C происходит термическая десорбция органических соединений, присутствующих в образце в свободном, адсорбированном или связанном лабильными химическими связями состоянии (пик S1). При температурах от 300 до 650 °C совместно происходит испарение летучих более высокомолекулярных органических соединений и термическая деструкция смол, асфальтенов и керогена (нерастворимого органического вещества) с образованием летучих органических веществ (углеводородов), что отражается на пирограмме в виде одного (пик S2) или двух пиков (пики S2a и S2b). Кроме выхода углеводородов в области перечисленных пиков, важной характеристикой образцов является температура максимальной скорости выхода углеводородов в процессе пиролиза (T_{pS2} или T_{max}), соответствующая максимуму пика S2 (S2b) [16]. Применительно к керогену осадочных пород она характеризует степень его термической зрелости. Оценка термической зрелости ОВ пород также может быть проведена по значению этого параметра у асфальтенов, выделенных из битумоидов или нефтей [17].

Сведения о возможностях метода Rock-Eval для анализа масел весьма ограничены [3, 4]. В частности, показано, что пирограммы масел похожи на пирограммы смол, а именно, содержат три пика: пик S1 и два пика S2a и S2b с максимумами в области ~350 и ~450 °C, соответственно. Так же как в случае керогена и САВ, появление первого пика S1 на пирограмме масел соответствует испарению легких углеводородов при изотермическом режиме (~150...200 °C). Появление двух других пиков при дальнейшем нагреве масел обусловлено образованием дополнительного количества летучих органических веществ при деструкции некоторых компонентов, содержащихся в них.

Можно считать, что положение максимумов пиков S2a и S2b на шкале температуры (T_{pS2a} , T_{pS2b}) в пирограмме отражает энергию разрыва «слабых» и «прочных» связей в компонентах масел, а интенсивность пиков характеризует относительное содержание соответствующих компонентов. Другими словами, из пирограммы масел можно получить информацию об их термической устойчивости и характеристических температурах деструкции содержащихся в них компонентов.

Цель настоящей работы – сравнительный анализ с использованием метода Rock-Eval термической устойчивости масел, выделенных из природных битумов и нефтей, отличающихся суммарным содержанием САВ, а также продуктов их лабораторной биодеградации и конверсии в сверхкритической воде.

Экспериментальная часть

В качестве объектов исследования были выбраны масла, выделенные из природных битумов и нефтей, отобранных в различных нефтегазодобывающих областях и провинциях (табл. 1). Были изучены также масла продуктов биодеградации ашальчинской мальты в лабораторных условиях [18] и конверсии Ивановского асфальтита в сверхкритической воде (СКВ) [19]. Масла выделены из исходных объектов по методике, представленной в [20]. Методика включает осаждение асфальтенов 40-кратным избыtkом гексана, последующее разделение деасфальтената адсорбционной хроматографией на силикагеле на масла, элюированные смесью гексана и бензола (70:30 по объему) и этиanol-бензольные смолы, элюированные смесью этинала и бензола (50:50 по объему).

Выделенные из перечисленных исходных объектов масла были охарактеризованы методами элементного анализа, ЯМР 1H -спектроскопии, пиролитического анализа в варианте Rock-Eval.

Спектры ЯМР 1H регистрировали с помощью ЯМР-Фурье спектрометра AVANCE AV 300 фирмы «Bruker» при 300 МГц в растворах $CDCl_3$, химические сдвиги сигналов приведены относительно тетраметилсилина. Относительное содержание атомов водорода в различных структурных фрагментах определяли исходя из площадей сигналов в соответствующих областях спектра [21]. $H_{ar}(8,3\ldots 6,6)$,

H_{ol} (6,6...4,5), H_{α} (4,1...2,1), H_{β} (2,1...1,1), H_{γ} (1,1...0,3) м. д., где H_{ar} – доля протонов у ароматических атомов углерода; H_{ol} – доля олефиновых протонов в алифатических фрагментах молекул; H_{α} – доля протонов у атома углерода в α -положении алифатических заместителей ароматических структур; H_{β} – доля протонов в метиленовых группах алифатических фрагментов молекул; H_{γ} – доля протонов в терминальных метильных группах алифатических фрагментов молекул.

Таблица 1. Наименование и районы отбора нефтей и природных битумов

Table 1. Regions of sampling of crude oils and natural bitumens

| Образец Sample | НГО, НГП Oil-and-gas region or province | Образец Sample | НГО, НГП Oil-and-gas region or province |
|---|---|--|---|
| Оленекский асфальт Oleneksky asphalt | Лено-Вилуйская Lena-Vilyusk | Русская нефть Russkaya oil | Западно-Сибирская West Siberian |
| Ивановский асфальтит Ivanovsky asphaltite | Волго-Уральская Volga-Ural | Нафталанская нефть Naftalan oil | Закавказская Transcaucasian |
| Усинская нефть Usinskaya oil | Тимано-Печорская Timan-Pechora | ЖП-1 LP-1 | – |
| Нефть Ляохэ | Liaohai oil Bohai Gulf | ЖП-2 LP-2 | – |
| Нефть Хаудаг Haudag oil | Таджикская депрессия Tajik Depression | ЖП-3 LP-3 | – |
| Ай-Яунская нефть Ai-Yaunskaya oil | Западно-Сибирская West Siberian | Северная нефть (скв. 564) Severnaya oil (well 564) | Западно-Сибирская West Siberian |
| Ашальчинская мальта Ashalchinskaya malta | Волго-Уральская Volga-Ural | Северная нефть (скв. 389) Severnaya oil (well 389) | |
| Биодеградированная ашальчинская мальта Biodegraded Ashalchinskaya malta | – | Северная нефть (скв. 254) Severnaya oil (well 254) | |
| Ван-Еганская нефть Van-Egan oil | Западно-Сибирская West Siberian | Самотлорская нефть Samotlorskaya oil | Западно-Сибирская West Siberian |

НГО – нефтегазоносная область; НГП – нефтегазоносная провинция; ЖП-1, 2, 3 – жидкие продукты СКВ конверсии Ивановского асфальтита.

НГО – Oil-and-gas region; НГП – Oil-and-gas province; LP-1, 2, 3 – liquid products of SCW conversion of Ivanovsky asphaltite.

Пиролитический анализ образцов был выполнен на установке «Rock-Eval 6 Turbo» [16] французской фирмы VINCI Technologies. Образцы в количестве 10–15 мг наносили на прокаленный при 800 °C песчаник и анализировали с использованием стадии «пиролиз» в цикле «Reservoir». Особенность этого цикла заключается в низкой начальной температуре пиролиза (180 °C). Образец выдерживали при начальной температуре 10 минут.

В течение этого времени формируется пик S1. Дальнейший нагрев от 180 до 650 °C со скоростью 25 °C/мин позволяет получить пики S2a и S2b. В процессе анализа определяли количество органических соединений, выделившихся в области соответствующих пиков (S_1 , S_{2a} , S_{2b}), а также температуры максимальной скорости выхода углеводородов (T_{pS2a} , T_{pS2b}) в пиках $S2a$ и $S2b$.

Результаты и их обсуждение

Как следует из табл. 2, выбранные объекты существенно отличаются по компонентному составу. Суммарное содержание САВ в них варьирует в пределах 9,08...81,84 %. Наибольшим суммарным содержанием САВ характеризуются твердые разновидности природных битумов: Ивановский асфальтит (81,84 %) и Оленекский асфальт (63,76 %). Промежуточное положение по содержанию САВ занимают тяжелые высоковязкие нефти Ляохэ (46,19 %), Хаудаг (35,60 %), Усинского (30,40 %), Ай-Яунского (27,24 %), месторождений и мальта Ашальчинского месторождения (36,90 %). Остальные нефти и продукты СКВ конверсии ивановского асфальтита характеризуются гораздо более низким суммарным содержанием САВ (5,90...15,43 %).

Из табл. 2 также следует, что содержание серы в изученных образцах варьирует в широких пределах: от 0,37 до 6,23 %, что охватывает все четыре класса нефти согласно классификации, приведенной в [22], а именно малосернистая, сернистая, высокосернистая и особо высокосернистая. Для всех образцов масел не исключено наличие среди структурных фрагментов алифатических сульфидных мостиков. Масла также заметно отличаются атомным отношением Н/С (1,45...1,75), которое характеризует относительное содержание в них алифатических, нафтеновых и ароматических соединений.

Результаты определения относительного содержания протонов в различных структурных фрагментах масел нефтей и природных битумов (табл. 3) свидетельствуют о том, что их доля в ароматических циклах молекул масел сравнительно невелика (4,00...5,94 %). Для масел биодеградированной в лабораторных условиях Ашальчинской мальты она еще меньше – 3,87 %. Для масел, выделенных из продуктов СКВ-конверсии Ивановского асфальтита (МЖП-1, 2, 3) [19], характерно явно более высокое содержание протонов в ароматических циклах (7,6...10,0 %) и появление небольшого количества (0,1...0,2 %) олефинов.

Отношение H_{β}/H_{γ} , которое может отражать длину алкильных заместителей или степень их разветвленности, у изученных образцов природного происхождения отличается почти в 1,5 раза (от 1,68 до 3,05). Отношение H_{α}/H_{ar} , которое при прочих равных условиях должно возрастать при увеличении числа заместителей в ароматических циклах и снижаться при увеличении их конденсированности, отличается почти в 2 раза (от 1,60 до 2,98).

Таблица 2. Состав изученных нефей, природных битумов и масел
Table 2. Composition of crude oils, natural bitumens and their oils

| Образец Sample | Содержание компонентов, % Component percentage, % | | | Содержание элементов в маслах, % Percentage of elements in oils, % | | $(H/C)_{ar}$ $(H/C)_{at}$ |
|--|--|------------|--------|---|------|------------------------------|
| | A A | СЭБ EBR | M O | N | S | |
| Ивановский асфальтит Ivanovsky asphaltite | 69,15 | 12,69 | 18,16 | 0,46 | 6,23 | 1,47 |
| Ай-Яунская нефть Ai-Yaunskaya oil | 3,96 | 23,28 | 72,76 | 0,06 | 1,38 | 1,64 |
| Ашальчинская мальта Ashalchinskaya malta | 6,20 | 26,20 | 67,20 | 0,07 | 3,83 | 1,61 |
| Нефть Хаудаг Haudag oil | 6,60 | 29,00 | 64,40 | Н.д. | Н.д. | Н.д. |
| Нефть Ляохэ Liaohe oil | 11,37 | 34,82 | 53,81 | 0,39 | 0,37 | 1,64 |
| Ван-Еганская нефть Van-Egan oil | 0,11 | 14,63 | 85,26 | 0,11 | 1,08 | 1,58 |
| Биодеградированная ашальчинская мальта Biodegraded Ashalchinskaya malta | Н.д. | Н.д. | Н.д. | 0,43 | 1,50 | 1,55 |
| Усинская нефть Usinskaya oil | 11,22 | 19,14 | 69,64 | 0,34 | 1,85 | 1,62 |
| Оленекский асфальт Oleneksky asphalt | 31,68 | 32,08 | 36,24 | 0,43 | 2,45 | 1,55 |
| Русская нефть Russkaya oil | 2,07 | 12,71 | 85,22 | 0,06 | 0,68 | 1,62 |
| Нафтalanская нефть Naftalan oil | 0,43 | 8,65 | 90,92 | 0,05 | 0,54 | 1,61 |
| ЖП-1 LP-1 | 14,2 | 19,8 | 66,0 | 0,80 | 5,04 | 1,49 |
| ЖП-3 LP-3 | 5,80 | 9,90 | 84,3 | 0,60 | 4,07 | 1,46 |
| ЖП-2 LP-2 | 5,10 | 11,00 | 83,9 | 0,62 | 4,80 | 1,45 |
| Северная нефть (скв. 389) Severnaya oil (well 389) | 0,42 | 9,06 | 90,52 | 0,29 | 0,55 | 1,68 |
| Северная нефть (скв. 254) Severnaya oil (well 254) | 1,00 | 8,86 | 90,14 | 0,30 | 0,50 | 1,73 |
| Северная нефть (скв. 564) Severnaya oil (well 564) | 0,33 | 12,48 | 87,19 | 0,34 | 0,50 | 1,75 |
| Самотлорская нефть Samotlorskaya oil | 0,70 | 5,20 | 94,10 | 0,30 | 0,61 | 1,60 |

А – асфальты, СЭБ – смолы этианол-бензольные, М – масла.
Н.д. – нет данных.

A – asphaltenes, EBR – ethanol-benzene resins, O – oils. H.д. – No Data Available.

Таким образом, представленные результаты, в какой-то мере характеризующие состав изученных образцов масел, свидетельствуют о его различии. Можно было ожидать, что это различие найдет отражение в параметрах их термической устойчивости, которые определяются при пиролитическом анализе методом Rock-Eval. Полученные результаты представлены в табл. 4 и на рис. 1–4.

Программы изученных образцов масел содержат три пика: S1, S2a и S2b, проявляющиеся в различных температурных пределах (рис. 1). Пик S1 (изотерма 180 °C) соответствует процессу испарения легких компонентов (бензиновой фракции НК–180 °C). Выход бензиновой фракции масел (S_1) у изученных образцов варьирует в интервале

42,1...341,2 мг/г. Пик S2a (180...350 °C), исходя из сущности метода Rock-Eval, соответствует наложению процесса испарения «средних» фракций масел и деструкции «слабых» C–S, C–O связей в структурных фрагментах компонентов масел.

Таблица 3. Относительное содержание протонов в различных структурных фрагментах масел
Table 3. Relative content of protons in different structural fragments of oils

| Образец Sample | Содержание, % отн./Percentage, % rel. | | | | H_{α}/H_{ar} | H_{β}/H_{γ} |
|--------------------|---------------------------------------|--------------|-------------|--------------|---------------------|------------------------|
| | H_{ar} | H_{α} | H_{β} | H_{γ} | | |
| МИА OIA | 5,50 | 15,50 | 58,00 | 21,00 | 2,82 | 2,76 |
| МАЯН OAYO | 4,74 | 9,15 | 62,02 | 24,08 | 1,93 | 2,58 |
| МАМ OAM | 4,47 | 13,32 | 59,43 | 22,78 | 2,98 | 2,61 |
| МНХ OHO | 4,18 | 10,39 | 64,32 | 21,10 | 2,10 | 3,05 |
| МНЛ OLO | 4,18 | 9,16 | 54,33 | 32,33 | 2,19 | 1,68 |
| МВЕН OVEO | 5,11 | 10,55 | 59,65 | 24,69 | 2,07 | 2,42 |
| МАМ-БИО OAM-BIO | 3,87 | 8,11 | 61,30 | 26,66 | 2,10 | 2,30 |
| МУН OUO | 4,89 | 10,71 | 56,82 | 27,58 | 2,19 | 2,06 |
| МОА OOA | 5,94 | 11,82 | 53,15 | 29,09 | 1,99 | 1,83 |
| MPH ORO | 4,00 | 8,84 | 60,82 | 26,34 | 2,21 | 2,31 |
| МНН ONO | 4,11 | 8,14 | 61,31 | 26,44 | 1,98 | 2,32 |
| МЖП-1 OLP-1 | 7,60 | 15,6 | 58,90 | 17,8 | 2,05 | 3,31 |
| МЖП-3 OLP-3 | 9,20 | 16,2 | 55,40 | 19,2 | 1,76 | 2,89 |
| МЖП-2 OLP-2 | 10,00 | 15,9 | 57,00 | 17,0 | 1,59 | 3,35 |
| МЧН-389 OSO-389 | 5,41 | 9,30 | 60,38 | 24,91 | 1,72 | 2,42 |
| МЧН-254 OSO-254 | 5,28 | 9,26 | 59,68 | 25,77 | 1,75 | 2,32 |
| МЧН-564 OSO-564 | 4,89 | 8,53 | 62,91 | 23,64 | 1,74 | 2,66 |
| МСамН OSamO | 5,06 | 8,08 | 62,15 | 24,71 | 1,60 | 2,52 |

МИА – масла Ивановского асфальтита; МАЯН – масла Ай-Яунской нефти; МАМ, МАМ-БИО – масла исходной и биодеградированной Ашальчинской мальты; МНХ – масла нефти Хаудаг; МНЛ – масла нефти Ляохэ; МВЕН – масла Ван-Еганской нефти; МУН – масла Усинской нефти; МОА – масла Оленекского асфальтита; MPH – масла Русской нефти; МНН – масла Нафтalanской нефти; МЖП-1, 2, 3 – масла жидких продуктов СКВ конверсии Ивановского асфальтита; МЧН-389, 254, 564 – масла Северной нефти (цифры соответствуют номеру скважин); МСамН – масла Самотлорской нефти.

OIA – Oils of Ivanovsky asphaltite; OAYO – Oils of Ai-Yaunskaya oil; OAM, OAM-BIO – Oils of initial and biodegraded Ashalchinskaya malta; OHO – Oils of Haudag oil; OLO – Oils of Liaohe oil; OVEO – Oils of Van-Egan oil; OUO – Oils of Usinskaya oil; OOA – Oils of Oleneksky asphalt; ORO – Oils of Russkaya oil; ONO – Oils of Naftalan oil; OLP-1, 2, 3 – Oils of liquid products of SCW conversion of Ivanovsky asphaltite; OSO-389, 254, 564 – Oils of Severnaya oil (wells 389, 254, 564); OSamO – Oils of Samotlorskaya oil.

Таблица 4. Результаты Rock-Eval анализа масел

Table 4. Data of Rock-Eval analysis of oils

| Образец Sample | S_1 | S_{2a} | S_{2b} | $TpS2a$ | $TpS2b$ | $S_{2a}+S_{2b}$, мг/г | S_{2b}/S_{2a} | $S_1/(S_{2a}+S_{2b})$ |
|---|-------------|----------|----------|---------|---------|---------------------------|-----------------|-----------------------|
| | мг/г (mg/g) | | | °C | (mg/g) | | | |
| Группа I/Group I: ($S_{2b}/S_{2a} > 1,0$) | | | | | | | | |
| МИА OIA | 62,1 | 191,2 | 746,7 | 350 | 466 | 937,9 | 3,91 | 0,066 |
| МАЯН OAYO | 77,8 | 332,5 | 589,6 | 350 | 461 | 922,2 | 1,77 | 0,084 |
| МАМ OAM | 135,6 | 330,3 | 534,1 | 350 | 454 | 864,4 | 1,62 | 0,157 |
| МХХ OHO | 154,4 | 325,6 | 520,0 | 350 | 462 | 845,6 | 1,60 | 0,183 |
| МНЛ OLO | 84,6 | 366,1 | 549,2 | 350 | 456 | 915,4 | 1,50 | 0,092 |
| МВЕН OVEO | 83,8 | 390,9 | 525,3 | 350 | 456 | 916,2 | 1,34 | 0,091 |
| МАМ-БИО OAM-BIO | 42,1 | 428,5 | 529,5 | 350 | 450 | 957,9 | 1,24 | 0,044 |
| МУН OUO | 170,5 | 382,2 | 447,4 | 340 | 449 | 829,5 | 1,17 | 0,205 |
| МОА OOA | 126,5 | 509,5 | 364,0 | 342 | 445 | 873,5 | 1,17 | 0,145 |
| МРН ORO | 71,3 | 441,4 | 487,3 | 343 | 450 | 928,7 | 1,10 | 0,077 |
| Группа II/Group II: ($S_{2b}/S_{2a} = (0,5...1,0)$) | | | | | | | | |
| МНН ONO | 90,7 | 467,5 | 441,8 | 334 | 460 | 909,3 | 0,95 | 0,100 |
| МЖП-1 OLP-1 | 163,6 | 443,1 | 393,3 | 328 | 450 | 836,4 | 0,89 | 0,196 |
| МЖП-3 OLP-3 | 175,7 | 526,5 | 297,8 | 328 | 450 | 824,3 | 0,57 | 0,213 |
| Группа III/Group III: ($S_{2b}/S_{2a} < 0,5$) | | | | | | | | |
| МЖП-2 OLP-2 | 159,6 | 570,8 | 269,6 | 318 | 450 | 840,4 | 0,47 | 0,190 |
| МЧ-389 OSO-389 | 278,2 | 494,1 | 227,8 | 314 | 450 | 721,8 | 0,46 | 0,385 |
| МЧ-254 OSO-254 | 291,6 | 487,1 | 221,3 | 302 | 450 | 708,4 | 0,45 | 0,412 |
| МЧ-564 OSO-564 | 326,1 | 494,7 | 179,2 | 292 | 450 | 673,9 | 0,36 | 0,484 |
| МСамН OSamO | 341,2 | 499,6 | 159,2 | 294 | 450 | 658,8 | 0,32 | 0,518 |
| Влияние биодеградации/Effect of biodegradation | | | | | | | | |
| МАМ OAM | 135,6 | 330,3 | 534,1 | 350 | 454 | 864,4 | 1,62 | 0,157 |
| МАМ-БИО OAM-BIO | 42,1 | 428,5 | 529,5 | 350 | 450 | 957,9 | 1,24 | 0,044 |
| Влияние конверсии в СКВ/Effect of SCW conversion | | | | | | | | |
| МИА OIA | 62,1 | 191,2 | 746,7 | 350 | 466 | 937,9 | 3,91 | 0,066 |
| МЖП-1 OLP-1 | 163,6 | 443,1 | 393,3 | 328 | 450 | 836,4 | 0,89 | 0,196 |
| МЖП-3 OLP-3 | 175,7 | 526,5 | 297,8 | 328 | 450 | 824,3 | 0,57 | 0,213 |
| МЖП-2 OLP-2 | 159,6 | 570,8 | 269,6 | 318 | 450 | 840,4 | 0,47 | 0,190 |

S_1 – выход бензиновой фракции (ИК-180 °C) масел; S_{2a} и S_{2b} – выход летучих продуктов термической деструкции образца при 180...350 и 350...550 °C, соответственно; ($TpS2a$, $TpS2b$) – температуры максимальной скорости выхода углеводородов в пиках $S2a$ и $S2b$.

S_1 is the yield of gasoline fraction of oils (IBP – 180 °C); S_{2a} and S_{2b} is the yield in volatile products of thermal destruction of the sample at 180...350 and 350...650 °C, respectively; ($TpS2a$, $TpS2b$) are the temperatures of maximum rate of release of hydrocarbon for $S2a$ and $S2b$ peaks.

Выход летучих продуктов из масел в области этого пика (S_{2a}) у изученных образцов варьирует в интервале 191,2...570,8 мг/г. Пик $S2b$ (350...550 °C) соответствует наложению испарения «высококипящих» компонентов масел и деструкции «прочных» C–O, C–C связей в их структурных фрагментах. Выход летучих продуктов из масел в области этого пика (S_{2b}) у изученных образцов варьирует в интервале 159,2...746,7 мг/г.

Из характера пирограмм, представленных на рис. 1, следует, что для всех образцов полная деструкция достигается при 550 °C. Из табл. 4 видно, что отношение выхода летучих продуктов в области пиков $S2b$ и $S2a$ (S_{2b}/S_{2a}) для изученных образцов отличается более чем на порядок и варьирует от 0,32 до 3,91. По этому показателю изученные образцы могут быть разделены условно на группы I–III: $>1,0$; $0,5...1,0$; $<0,5$. Их типичные пирограммы представлены на рис. 1. Минимальное значение S_1 и S_{2a} характерно для образцов группы I, а максимальное – для образцов группы III. Для пика $S2b$ все наоборот: минимальное значение S_{2b} наблюдается у образцов группы III, а максимальное – у образцов группы I. Как видно на рис. 2, наблюдается функциональная связь отношения S_{2b}/S_{2a} с выходом бензиновой фракции масел (S_1): чем выше S_{2b}/S_{2a} , тем ниже S_1 .

При биодеградации отношение $S_1/(S_{2a}+S_{2b})$ резко снижается, а при СКВ конверсии резко возрастает, что вполне объяснимо. При биодеградации в первую очередь ассимилируются низкомолекулярные алканы состава C_{12} – C_{20} [23]. А при СКВ конверсии асфальтита их доля в составе масел, напротив, возрастает [19].

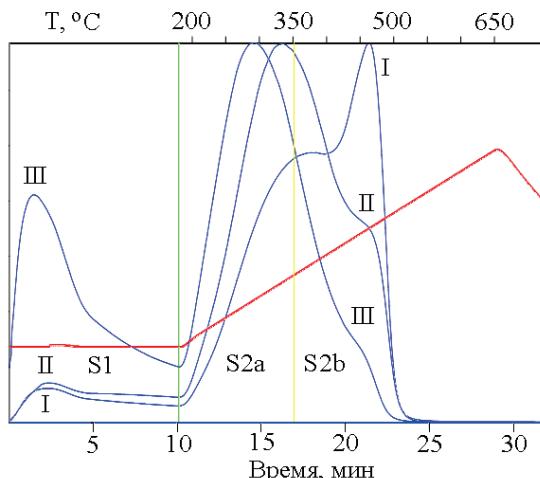


Рис. 1. Типичные пирограммы для масел с различным отношением S_{2b}/S_{2a} . I – $>1,0$; II – $0,5...1,0$; III – $<0,5$. Красным – температурная кривая

Fig. 1. Typical pyrograms for oils with different S_{2b}/S_{2a} ratios. I – $>1,0$; II – $0,5...1,0$; III – $<0,5$. Temperature curve is highlighted in red

Температура максимальной скорости выхода углеводородов в области пика $S2b$ ($TpS2b$), по-нашему мнению, отражающая энергию разрыва

«прочных» связей, варьирует для всей совокупности образцов от 445 до 466 °C, причем, как следует из табл. 4, это различие характерно, главным образом, для образцов группы I. Для большинства образцов группы II и для группы III в целом она одинакова (450 °C).

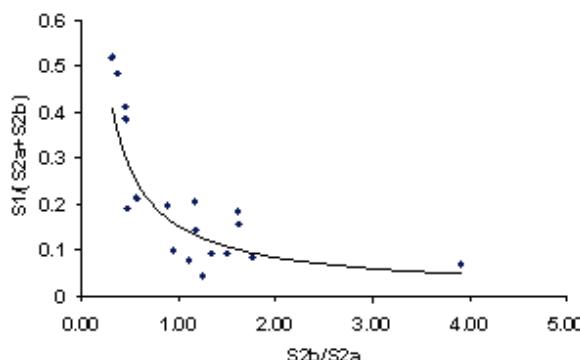


Рис. 2. Зависимость выхода бензиновой фракции масел (S_1) от соотношения выхода летучих продуктов при 350...550 и 180...350 °C (S_{2b}/S_{2a})

Fig. 2. Yield of gasoline fraction of oils (S_1) vs the ratio of the yield in volatile products at 350...550 and 180...350 °C (S_{2b}/S_{2a})

Температура максимальной скорости выхода углеводородов в области пика $S2a$ ($TpS2a$), по-нашему мнению, отражающая энергию разрыва «слабых» связей, меняется в более широких пределах (292...350 °C). $TpS2a$ при уменьшении отношения S_{2b}/S_{2a} в группе I снижается от 350 до 342 °C, в группе II – от 334 до 328 °C, в группе III – от 318 до 292 °C. Следует отметить, что в группе I при значении $S_{2b}/S_{2a} > 1,24$ $TpS2a$ не меняется и составляет 350 °C.

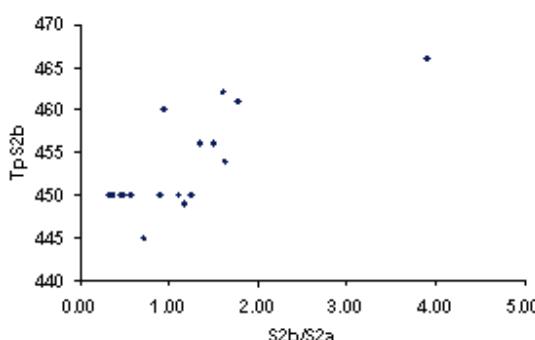


Рис. 3. Взаимосвязь $TpS2b$ и S_{2b}/S_{2a}

Fig. 3. Relationship of $TpS2b$ and S_{2b}/S_{2a}

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ахметов С.А. Технология глубокой переработки нефти и газа. – СПб.: Недра, 2013. – 541 с.
- Капустин В.М., Гуреев А.А. Технология переработки нефти. Ч. 2: Деструктивные процессы. – М.: Колос, 2007. – 334 с.
- Антиценко В.Р., Меленевский В.Н. Состав летучих продуктов флюэш-пиролиза природного асфальтита, его смолисто-асфальтеновых и масляных компонентов // Нефтехимия. – 2012. – Т. 52. – № 6. – С. 403–412.
- Состав «связанных» соединений в маслах биодеградированных нефей по результатам их «on line» флюэш-пиролиза / В.Р. Антиценко, О.С. Баканова, В.Н. Меленевский, Е.А. Ельчанинова // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 6. – С. 46–55.
- Антиценко В.Р., Чешкова Т.В. Состав соединений, связанных через эфирные и сульфидные мостики в маслах природного битума Ашальчинского месторождения // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 3. – С. 16–21.

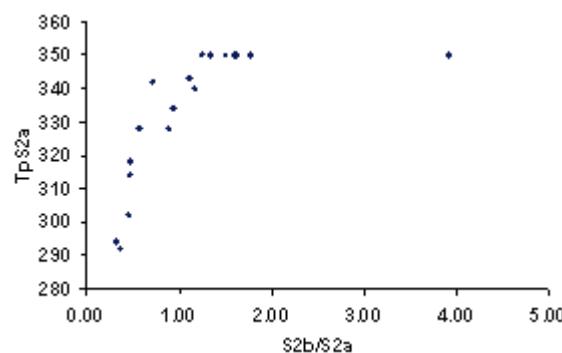


Рис. 4. Взаимосвязь $TpS2a$ и S_{2b}/S_{2a}

Fig. 4. Relationship of $TpS2a$ and S_{2b}/S_{2a}

Заключение

Таким образом, показано, что методом Rock-Eval можно получить информацию о сравнительной термической устойчивости масел и характеристических температурах деструкции содержащихся в них компонентов для образцов, выделенных из нефей и природных битумов, отобранных в различных нефтегазоносных провинциях и отличающихся компонентным составом. Пирограммы масел содержат три пика, проявляющихся в различных интервалах температур. Пик $S1$ (изотерма 180 °C) соответствует процессу испарения низкокипящих компонентов (бензиновой фракции НК–180 °C). Пик $S2a$ (180...350 °C) соответствует наложению процесса испарения «средних» фракций масел и деструкции «слабых» C–S, C–O связей в структурных фрагментах их компонентов. Пик $S2b$ (350...550 °C) соответствует наложению испарения «высококипящих» компонентов масел и деструкции «прочных» C–O, C–C связей в их структурных фрагментах. Изученные образцы более чем на порядок (от 0,32 до 3,91) отличаются отношением выхода летучих продуктов при 350...550 °C и 180...350 °C (S_{2b}/S_{2a}), а также отношением выхода бензиновой фракции масел (S_1) и ($S_{2b}+S_{2a}$) (от 0,044 до 0,518). Изученные образцы масел также отличаются по температуре максимальной скорости выхода углеводородов в области пика $S2b$ (от 466 до 445 °C) и более существенно в области пика $S2a$ (от 350 до 292 °C).

Полученные результаты могут учитываться при выборе оптимальных режимов термической и термокатализитической переработки тяжелого нефтяного сырья.

6. Баканова О.С., Антипенко В.Р. Новый подход к определению структуры фрагментов, связанных через эфирные мостики в маслах нефтей и природных битумов // Химия в интересах устойчивого развития. – 2018. – Т. 26. – № 1. – С. 109–114.
7. Энергии разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и сродство к электрону / Л.В. Гурвич, Г.В. Караваевцев, В.Н. Кондратьев, Ю.А. Лебедев, В.А. Медведев, В.К. Потапов, Ю.С. Ходеев. – М.: Наука, 1974. – 351 с.
8. Espitalié J., Deroo G., Marquis F. La pyrolyse Rock-Eval et ses applications // Oil & Gas Science and Technology. – 1985. – V. 40. – № 5. – P. 563–579.
9. Peters K. Guidelines for evaluating petroleum source rock using programmed pyrolysis // American Association of Petroleum Geologists Bulletin. – 1986. – V. 70. – № 3. – P. 318–329.
10. Конторович А.Э., Меленевский В.Н., Борисова Л.С. Диагностика асфальтенов рассеянного органического вещества и нефти пиролитическим методом // Докл. АН СССР. – 1988. – Т. 302. – № 3. – С. 700–703.
11. Lafargue E., Marquis F., Pillot D. Rock-Eval 6 Applications in Hydrocarbon Exploration, Production and Soils Contamination Studies // Oil & Gas Science and Technology. – 1998. – V. 53. – № 4. – P. 421–437.
12. Меленевский В.Н., Борисова Л.С., Тимошина И.Д. Пиролитическая характеристика твердых битумов ряда кериты-антраксолиты // Геология нефти и газа. – 2008. – № 4. – С. 40–45.
13. Диагенетическая трансформация органического вещества голоценовых осадков Черного моря по данным пиролиза / В.Н. Меленевский, С.В. Сараев, Е.А. Костырева, В.А. Каширцев // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58. – № 2. – С. 273–289.
14. Современный метод определения пиролитических параметров горных пород / Э.А. Вторушина, Т.Д. Булатов, И.В. Козлов, М.Н. Вторушин // Геология нефти и газа. – 2018. – № 2. – С. 71–77.
15. Guidelines for kinetic input to petroleum system models from open-system pyrolysis / K.E. Peters, A.K. Burnham, C.C. Walters, O. Schenk // Marine and Petroleum Geology. – 2018. – V. 92. – P. 979–986.
16. Behar F., Beaumont V., De B Penteado H.L. Rock-Eval 6 Technology: Performances and Developments // Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP. – 2001. – V. 56. – № 2. – P. 111–134.
17. T_{\max} of asphaltenes: a parameter for oil maturity assessment / M. Nali, G. Caccialanza, C. Ghiselli, M.A. Chiaromonte // Organic Geochemistry. – 2000. – V. 31. – P. 1325–1332.
18. Биогенное окисление высоковязкой нефти Ашальчинского месторождения и ее гетероорганических соединений / Д.А. Филатов, Е.Б. Кривцов, Н.Н. Свириденко, А.К. Головко, Л.К. Алтунина // Нефтехимия. – 2017. – Т. 57. – № 4. – С. 386–393.
19. Fedyaeva O.N., Antipenko V.R., Vostrikov A.A. Conversion of sulfur-rich asphaltite in supercritical water and effect of metal addition // The Journal of Supercritical Fluids. – 2014. – V. 88. – P. 105–116.
20. Современные методы исследования нефти (Справочно-методическое пособие) / под ред. А.И. Богомолова, М.Б. Темянко, Л.И. Хотынцевой. – Л.: Недра, 1984. – 431 с.
21. Speight J.G. Handbook of Petroleum Analysis. – New-York: Wiley Interscience, 2001. – 489 p.
22. ГОСТ Р 51858–2002. Нефть. Общие технические условия. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002. – 9 с.
23. Петров Ал.А. Углеводороды нефти. – М.: Наука, 1984. – 264 с.

Поступила 01.03.2019 г.

Информация об авторах

Антипенко В.Р., доктор химических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории гетероорганических соединений нефти Института химии нефти СО РАН.

Баканова О.С., аспирант лаборатории гетероорганических соединений нефти Института химии нефти СО РАН.

Кашапов Р.С., научный сотрудник лаборатории геохимии и пластовых нефтей ОАО «ТомскНИПИнефть».

UDC 665.613: 543.57

CHARACTERISTICS OF THERMAL STABILITY OF OILS OF NATURAL BITUMENS AND CRUDE OILS

Vladimir R. Antipenko¹,

avr@ipc.tsc.ru

Olga S. Bakanova¹,

olgapushkar@mail.ru

Roman S. Kashapov²,

KashapovRS@tomsknipi.ru

¹ Institute of Petroleum Chemistry SB RAS,
4, Akademichesky avenue, Tomsk, 634055, Russia.

² Tomsk Oil and Gas Research and Design Institute («TomskNIPIneft», Joint Stock Company),
72, Mira avenue, Tomsk, 634027, Russia.

The relevance of the research is caused by the fact that thermal destruction is one of the most common processes of refining oil residues, heavy oils, and natural bitumens. Thermal and thermocatalytic processes of conversion of the above mentioned hydrocarbon feedstocks are accompanied by formation of supplementary distillate fractions («secondary» oils) during thermal degradation of resin-asphaltene substances of initial objects. Transformation of oils of the initial object and «secondary» oils occurs simultaneously at temperatures corresponding to the thermal disruption of «weak» and «strong» bonds in their constituent compounds. When choosing the optimum modes of thermal and thermocatalytic processing of heavy oil feedstock, the results of assessment of thermal stability of its components should be taken into account. One of the methods for studying the thermal stability of sedimentary organic matter is the Rock-Eval pyrolysis. Information about the potential of this method for analysis of oils is very limited. However, the information on their thermal stability and characteristic temperatures of destruction of their constituents could be obtained from the pyrogram of oils. The analysis of the pyrogram will also provide information on the difference in these parameters for oils isolated from crude oils and natural bitumens, sampled in various oil provinces and significantly differing in their component composition.

The main aim of the research is a comparative analysis of thermal stability of oils isolated from natural bitumens and crude oils differing in the total content of resin-asphaltene substances, products of their laboratory biodegradation and conversion in supercritical water using the Rock-Eval method.

Objects: oils isolated from 18 samples of crude oils and natural bitumens, products of their laboratory biodegradation and conversion in supercritical water.

Methods: elemental analysis, NMR ¹H-spectroscopy, Rock-Eval pyrolytic analysis.

Results. It is shown that the information on thermal stability of oils isolated from crude oils and natural bitumens sampled in various oil provinces and differing in their component composition could be obtained via Rock-Eval pyrolysis. The presence of three peaks characteristic for oils is evident from the pyrograms. They are observed within different temperature ranges. Hence, S1 peak (isotherm 180 °C) corresponds to the process of the gasoline fraction (initial boiling point (IBP)...180 °C) evaporation. The S2a peak (180...350 °C) corresponds to overlapping of evaporation of intermediate fractions of oils and rupture of «weak» C—S, C—O bonds in the structural fragments of their compounds. The S2b peak (350...550 °C) corresponds to overlapping of evaporation of high-boiling fractions of oils and rupture of «strong» C—O, C—C bonds in their structural fragments. The samples under study differ by more than one order of magnitude (from 0,32 to 3,91) in the ratio of the yields in volatile products at 350...550 and 180...350 °C (S_{2b}/S_{2a}) and in the ratio of the yields in the gasoline fraction of oils – S1 and $S_{2b}+S_{2a}$ (0,044 to 0,518). The samples of oils under study also differ in the temperature of maximum rate of release of hydrocarbons in the course of pyrolysis in the range of S2b peak (from 445 to 466 °C). This difference is more significant in the range of the S2a peak (from 292 to 350 °C).

Key words:

Crude oils, natural bitumens, oils, isolation, composition, Rock-Eval-analysis, thermal stability.

REFERENCES

1. Akhmetov S.A. *Tekhnologiya glubokoy pererabotki nefti i gaza* [Technology of deep processing of oil and gas]. St.-Peterburg, Nendra Publ., 2013. 541 p.
2. Kapustin V.M., Gureev A.A. *Tekhnologiya pererabotki nefti. Ch. 2. Destruktivnye protsessy* [Technology of oil processing. P. 2: Destructive processes]. Moscow, Kolos Publ., 2007. 334 p.
3. Antipenko V.R., Melenevskii V.N. Composition of volatile products of flash pyrolysis of natural asphaltite and its resin-asphaltene and oil components. *Petroleum Chemistry*, 2012, vol. 52, no. 6, pp. 373–382.
4. Antipenko V.R., Bakanova O.S., Melenevskiy V.N., Elchaninova E.A. «Bonded» compounds composition in the oils of biodegraded petroleum using their «on-line» flash pyrolysis. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 6, pp. 46–55. In Rus.
5. Antipenko V.R., Cheshkova T.V. Composition of the compounds bonded via ether, ester and sulfide linkages in oils of natural bitumen from Ashalchinskoye deposit. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 3, pp. 16–21. In Rus.
6. Bakanova O.S., Antipenko V.R. Novy podkhod k opredeleniyu struktury fragmentov, svyazannykh cherez efirnye mostiki v maslakh neftey i prirodnikh bitumov [New approach towards structure determination of fragments coupled via ether/ester bridges in petroleum and natural bitumen oils]. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*, 2018, vol. 26, no. 1, pp. 109–114.
7. Gurvich L.V., Karachentsev G.V., Kondratiev V.N., Lebedev Yu.A., Medvedev V.A., Potapov V.K., Khodeev Yu.S. *Energy razryva khimicheskikh svyazey. Potentsialy ionizatsii i srodstvo k elektronu* [Break Energies of Chemical Bonds. Ionization Potentials and Electron Affinity]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 351 p.

8. Espitalié J., Deroo G., Marquis F. La pyrolyse Rock-Eval et ses applications. *Oil & Gas Science and Technology*, 1985, vol. 40, no. 5, pp. 563–579.
9. Peters K. Guidelines for evaluating petroleum source rock using programmed pyrolysis. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1986, vol. 70, no. 3, pp. 318–329.
10. Kontorovich A.E., Melenevskiy V.N., Borisova L.S. Diagnostika asfaltenov rasseyannogo organiceskogo veshchestva i neftey piroliticheskim metodom [Diagnostics of asphaltenes in dispersed organic matter and oil by a pyrolytic method]. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 1988, vol. 302, no. 3, pp. 700–703.
11. Lafargue E., Marquis F., Pillot D. Rock-Eval 6 Applications in Hydrocarbon Exploration, Production and Soils Contamination Studies. *Oil & Gas Science and Technology*, 1998, vol. 53, no. 4, pp. 421–437.
12. Melenevskiy V.N., Borisova L.S., Timoshina I.D. Pyrolytic characteristics of hard bitumen of kerite-anthraxolite series. *Oil and gas geology*, 2008, no. 4, pp. 40–45. In Rus.
13. Melenevskiy V.N., Saraev S.V., Kostyрева Е.А., Kashirtsev V.A. Diagenetic transformation of organic matter of the Holocene Black Sea sediments according to pyrolysis data. *Russian Geology and Geophysics*, 2017, vol. 58, no. 2, pp. 273–289. In Rus.
14. Vtorushina E.A., Bulatov T.D., Kozlov I.V., Vtorushin M.N. The advanced technique for determination of pyrolysis parameters of rocks. *Oil and gas geology*, 2018, no. 2, pp. 71–77. In Rus.
15. Peters K.E., Burnham A.K., Walters C.C., Schenk O. Guidelines for kinetic input to petroleum system models from open-system pyrolysis. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, vol. 92, pp. 979–986.
16. Behar F., Beaumont V., De B Penteado H.L. Rock-Eval 6 Technology: Performances and Developments. *Oil & Gas Science and Technology Rev. IFP*, 2001, vol. 56, no. 2, pp. 111–134.
17. Nali M., Caccialanza G., Ghiselli C., Chiaromonte M.A. T_{max} of asphaltenes: a parameter for oil maturity assessment. *Organic Geochemistry*, 2000, vol. 31, pp. 1325–1332.
18. Filatov D.A., Krivtsov E.B., Sviridenko N.N., Golovko A.K., Altunina L.K. Biogenic oxidation of the high-viscosity oil of the Ashal'chinskoe field and its hetero compounds. *Petroleum Chemistry*, 2017, vol. 57, no. 8, pp. 649–656.
19. Fedyaeva O.N., Antipenko V.R., Vostrikov A.A. Conversion of sulfur-rich asphaltite in supercritical water and effect of metal addition. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2014, vol. 88, pp. 105–116.
20. Sovremennoye metody issledovaniya neftey (Spravochno-metodicheskoe posobie) [A Manual of Modern Oil Investigation Techniques]. Eds. A.I. Bogomolov, M.B. Temyanko, L.I. Khotyntseva. Leningrad, Nedra Publ., 1984. 431 p.
21. Speight J.G. *Handbook of Petroleum Analysis*. New-York, Willey Interscience, 2001. 489 p.
22. GOST R 51858–2002. Neft. Obshchie tekhnicheskie usloviya [State Standard R 51858–2002. Crude petroleum. General specifications]. Moscow, IPK Standart Publ., 2002. 9 p.
23. Petrov Al.A. *Uglevodorody nefti* [Hydrocarbons of crude oil]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 264 p.

Received: 1 March 2019.

Information about the authors

Vladimir R. Antipenko, Dr. Sc, professor, leading researcher, Institute of Petroleum Chemistry SB RAS.

Olga S. Bakanova, postgraduate student, Institute of Petroleum Chemistry SB RAS.

Roman S. Kashapov, researcher, Tomsk Oil and Gas Research and Design Institute.

УДК 546.65:544.65

ВЛИЯНИЕ АЦЕТАТ- И ЦИТРАТ-ИОНОВ НА ПРОТЕКАНИЕ ПРОЦЕССА КАТОДНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ Yb(III) НА РТУТНЫХ ЭЛЕКТРОДАХ

Коршунов Андрей Владимирович¹,
korshunov@tpu.ru

Ковалева Светлана Владимировна²,
svetkovaleva@rambler.ru

Абрамова Полина Владимировна¹,
polya.bozhko@yandex.ru

Горлушко Дмитрий Александрович¹,
gda@tpu.ru

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

² Томский государственный педагогический университет,
Россия, 634061, г. Томск, ул. Киевская, 60.

Актуальность. Иттербий, его сплавы и соединения характеризуются особыми термоэлектрическими, магнитными и оптическими свойствами; иттербийсодержащие материалы находят применение в военной и атомной промышленности. Вследствие высокой химической активности, а также сходства с другими редкоземельными элементами технологии выделения иттербия включают большое количество операций, в их числе осаждение, электролиз, цементация, адсорбция и др. Особенностью иттербия (а также европия и самария) по сравнению с другими редкоземельными элементами является возможность катодного осаждения на ртутном электроде и образования амальгамы при сравнительно невысоких отрицательных потенциалах. В связи с этим исследование закономерностей протекания электродных процессов с участием иттербия является актуальной задачей как с фундаментальной, так и с технологической точки зрения.

Цель: определить особенности влияния комплексообразователей (ацетат- и цитрат-ионов) на протекание процесса катодного восстановления Yb(III) на ртутных электродах.

Объекты: оксид иттербия, хлорная и уксусная кислоты, растворы солей (NaClO_4 , LiCl , $\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_4\text{Cl}$, ацетата и цитрата натрия) и щелочей (NaOH).

Методы: поляография постоянного и переменного тока, циклическая вольтамперометрия.

Результаты. Уточнена область потенциалов протекания катодного процесса $\text{Yb(III)} \rightarrow \text{Yb(II)}$ ($12 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-3} \text{ M}$) на ртутных электродах (капающим, стационарном) в некомплексообразующих и комплексообразующих (ацетатном, цитратном) фоновых электролитах в широком интервале $\text{pH}=2 \dots 9$. Установлено влияние комплексообразования Yb(III) на соотношение токов восстановления ионов иттербия и водорода и на устойчивость промежуточного продукта Yb(II) катодного процесса в среде раствора. Показан катализитический характер химической реакции окисления Yb(II) ионами водорода в прикатодном слое раствора на протекание процесса $\text{Yb(III)} \rightarrow \text{Yb(II)}$ в области потенциалов $-1,3 \dots -1,5 \text{ V}$ (нас. х.с.э.). Интерпретация результатов электрохимических исследований проведена с использованием расчётных диаграмм $E-\text{pH}$ для систем $\text{Yb}-\text{H}_2\text{O}-\text{CH}_3\text{COO}^-$ и $\text{Yb}-\text{H}_2\text{O}-\text{Cit}^{3-}$ в сравнении с системой без комплексообразователя. Показана важность учёта состояния Yb(III) в растворе и условий электролиза при протекании катодного процесса.

Ключевые слова:

Соединения иттербия (III), ацетатные и цитратные комплексы, постоянно- и переменнотоковая поляография, циклическая вольтамперометрия, ртутные электроды, катодное восстановление.

Введение

Материалы на основе иттербия и его соединений обладают особыми термоэлектрическими, магнитными и оптическими свойствами и находят применение в военной и атомной промышленности. Вследствие высокой химической активности, а также сходства с другими редкоземельными элементами технологии выделения иттербия включают большое количество операций, в их числе осаждение, электролиз, цементация, адсорбция и др. [1]. Особенностью иттербия (а также европия и самария) по сравнению с другими редкоземельными элементами является возможность катодного осаждения на ртутном электроде и образования

амальгамы при сравнительно невысоких отрицательных потенциалах [2]. С этой особенностью иттербия связаны перспективы его отделения от лютения при производстве радиоактивных препаратов медицинского назначения [3–5]. Несмотря на достаточно продолжительный период исследований эффективности амальгамного разделения иттербия и лютения, полного понимания происходящих при этом процессов нет до сих пор. В связи с этим изучение процессов катодного восстановления Yb(III) в растворах является актуальной фундаментальной и прикладной задачей.

Из ранних работ известно [1, 2, 6], что на ртутном катоде, а также на амальгамах щелочных ме-

таллов иттербий (III) восстанавливается ступенчато через одноэлектронную $\text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{2+}$ и двухэлектронную $\text{Yb}^{2+} \rightarrow \text{Yb}^0$ стадии с последующим образованием амальгамы. При этом последовательность восстановления ионов водорода, щелочного и редкоземельного металла зависит от разности потенциалов, pH среды, присутствия комплексообразователя. Наиболее оптимальными условиями извлечения иттербия из растворов с образованием амальгамы являются $\text{pH} < 7$, многократное повторение операции цементации в сочетании с электролизом, введение в растворы ацетата и цитрата натрия, охлаждение электролита, дополнительное хроматографическое разделение, при этом степень извлечения может достигать 99 % [4, 6–14]. В ряде работ указано, что вследствие высоких значений соотношения иттербий/лютеций (несколько тысяч) на практике метод цементации может быть малоэффективным за счет снижения выхода лютеция [4, 7, 15, 16].

Электрохимическое поведение иттербия изучено преимущественно с применением ртутных электродов. В отсутствие комплексообразователей в хлорникислых растворах стадия восстановления $\text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{2+}$ сопровождается разрядом водорода в области $-1,45$ В, наибольшее влияние которого наблюдается при $\text{pH} < 4$ [17]. В работе [18] показано, что в этих условиях обратимое восстановление иттербия сопровождается гомогенными реакциями и контролируется диффузией. Вторая стадия восстановления $\text{Yb}^{2+} \rightarrow \text{Yb}^0$ на капающем ртутном электроде [19] также сопровождается восстановлением водорода, ионы $\text{Yb}(\text{II})$ восстанавливаются до металла, а далее происходит каталитическая реакция взаимодействия металла с протонами или молекулами воды на поверхности электрода. При $\text{pH} > 4$ значительно усиливаются гидролитические процессы. Потенциал полуволны восстановления Yb^{3+} до Yb^{2+} варьирует от 1,46 до 1,40 в зависимости от pH раствора, потенциал второй ступени восстановления Yb^{2+} до Yb^0 принимает значения от 2,07 до 2,00 В [20].

Анализ опубликованных данных показал, что, несмотря на большое число работ, посвященных исследованию процессов катодного восстановления и амальгамной цементации иттербия из водных растворов, данные по электрохимическому поведению иттербия в растворах ацетатов и цитратов в проанализированных источниках отсутствуют. В связи с этим целью настоящей работы явилось определение особенностей влияния комплексообразователей (ацетат- и цитрат-ионов) на протекание процесса катодного восстановления $\text{Yb}(\text{III})$ на ртутных электродах.

Материалы и методы исследования

В качестве исходного реагента для приготовления растворов использовали оксид иттербия (99,9 мас. %), предварительно прокаленный при 800 °C (4 ч). Навеску оксида растворяли в 1–2 мл концентрированной хлорной кислоты («х.ч.»), да-

лее доводили до заданного объема раствора бидистилированной водой. Концентрация исходного раствора составляла 0,01 М, $\text{pH} \approx 2$. Рабочие растворы готовили путем разбавления исходного бидистилированной водой, pH растворов регулировали в интервале 2...9 путем добавления HClO_4 или NaOH . Измерение pH проводили при помощи pH-метра pH-410 (г. Гомель, Белоруссия) с универсальным электродом, калибровку pH-метра производили с использованием стандартных буферных растворов с pH 1,65, 4,01 и 6,86.

Электродные процессы с участием иттербия в растворах изучали с использованием классической и переменнотоковой полярографии (поляграф ПУ-1) с ртутным капающим электродом и циклической вольтамперометрии (потенциостат ПИ-50-1.1) со стационарным электродом «ртутная капля» (ртуть Р-О). В работе использовали трехэлектродную ячейку, вспомогательным электродом являлся платиновый электрод, электродом сравнения служил насыщенный хлорсеребряный электрод (нас. х.с.э.). Значения потенциалов приведены относительного этого электрода. В качестве фоновых электролитов использовали 0,1 М растворы NaClO_4 , LiCl , $\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_4\text{Cl}$, ацетата и цитрата натрия. Чистота реагентов соответствовала квалификации «х.ч.», дополнительную их очистку не производили. Непосредственно перед электрохимическими измерениями исследуемые растворы деаэрировали путем пропускания азота высокой чистоты.

Результаты и их обсуждение

В условиях полярографии с капающим электродом катодный процесс $\text{Yb}^{3+} + e = \text{Yb}^{2+}$ как в некомплексообразующих растворах (NaClO_4 , LiCl), так и в растворах ацетата натрия отображается на полярограммах в виде одной выраженной необратимой волны (рис. 1). В области $\text{pH} < 4$ на восстановление ионов Yb^{3+} ($1 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-3}$ М) накладывается процесс восстановления ионов водорода, что приводит к существенному возрастанию предельного тока полярографической волны. При этом волны иттербия и водорода плохо разделяются, этот эффект также наблюдается на переменнотоковых полярограммах в виде раздвоенного максимума. В интервале $4 < \text{pH} < 6$ волна восстановления водорода смещается в область отрицательных потенциалов и её предельный ток значительно снижается, что позволяет выделить волну восстановления ионов иттербия ($E_{1/2} = -1,30 \dots -1,38$ В). В этой области pH величина предельного тока пропорциональна концентрации Yb^{3+} в растворе. При $\text{pH} \geq 6,25$ в некомплексообразующей среде наблюдается осаждение нерастворимого гидроксида $\text{Yb}(\text{OH})_3$, при этом волна восстановления ионов иттербия на полярограммах не проявляется. Это свидетельствует о том, что в условиях эксперимента гидроксид иттербия электрохимически неактивен и не подвергается катодному восстановлению.

В фоновых растворах ацетата натрия полярографические волны иттербия и водорода разделяются

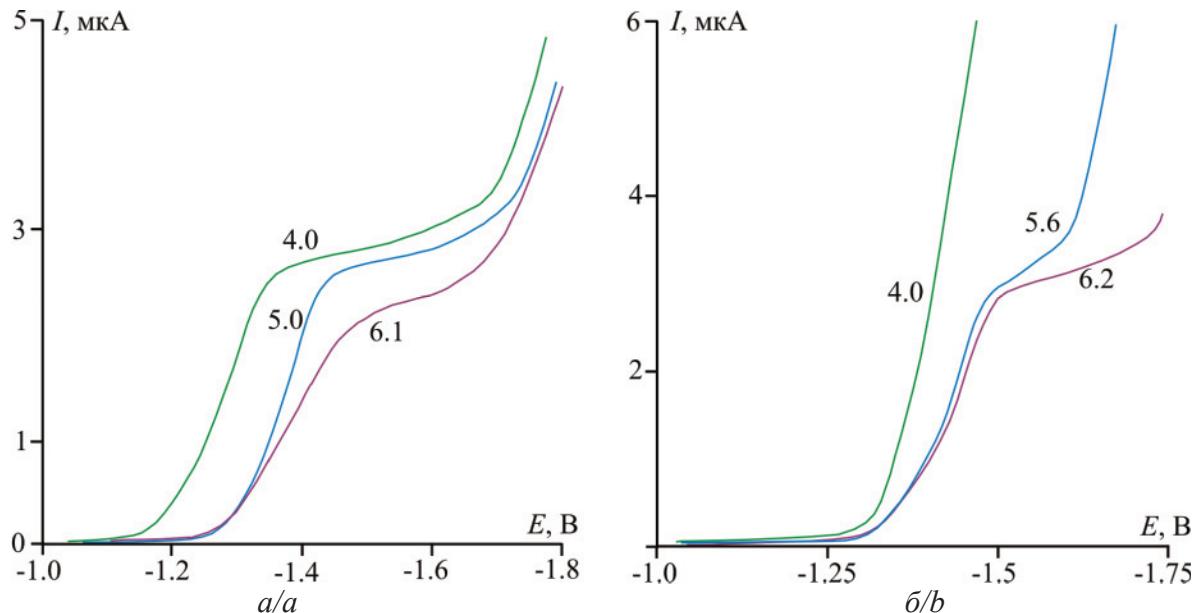


Рис. 1. Постояннотоковые полярограммы восстановления Yb(III) ($5 \cdot 10^{-4}$ М) на ртутном капающем электроде в (а) перхлоратном (0,1 М NaClO_4) и (б) ацетатном (0,1 М CH_3COONa) фоновых электролитах при различных значениях pH растворов (значения pH указаны на рис.; параметры капающего электрода: скорость истечения Hg 4,6 мг/с, период капания 5,7 с; скорость развертки потенциалов 3 мВ/с)

Fig. 1. Direct-current polarograms of Yb(III) reduction ($5 \cdot 10^{-4}$ M) at dropping Hg-electrode in (a) perchlorate (0,1 M NaClO_4) and (b) acetate (0,1 M CH_3COONa) supporting electrolytes at different pH of the solutions (the values of pH are shown in the Fig.; Hg flow rate is 4,6 mg/s; dropping period is 5,7 s; potential sweep rate is 3 mV/s)

хуже, чем в перхлоратных растворах (рис. 1, б). Наложение двух катодных процессов в этом случае проявляется до более высоких значений pH. При этом область выделения водорода смешается в направлении более положительных потенциалов, что свидетельствует об электрокатализитическом влиянии комплексов Yb. За счет формирования комплексов наблюдается смещение потенциала полу волн восстановления ионов Yb^{3+} в область отрицательных потенциалов, $E_{1/2} = -1,42 \dots -1,45$ В. Величины предельных токов восстановления Yb(III) при pH=5...6 в перхлоратных и ацетатных растворах сопоставимы между собой (рис. 1, а, б). Несмотря на образование комплексов Yb в ацетатных фоновых электролитах, повышение pH среды до 6,5 и более приводит к осаждению иттербия из раствора в виде гидроксида и к исчезновению волны восстановления иттербия на полярограммах. Следовательно, использование ацетатных растворов позволяет лишь незначительно повысить значения pH растворов, при которых происходит восстановление Yb^{3+} . При этом существенного снижения влияния разряда водорода на исследуемый процесс практически не происходит. Нужно отметить, что вторая волна, соответствующая процессу $\text{Yb}^{2+} + 2e = \text{Yb}$, на полярограммах не была зафиксирована.

В отличие от перхлоратных и ацетатных фоновых растворов, в среде 0,1 М цитрата натрия в исследованном интервале pH волна восстановления ионов иттербия на полярограммах не проявляется. По-видимому, цитратный комплекс $[\text{Yb}(\text{Cit})]$, образующийся при большом избытке цитрат-ионов в

растворе, не подвергается катодному восстановлению в условиях полярографии. При соотношениях концентраций цитрат натрия/ Yb^{3+} =1...3 в растворе 0,1 М NaClO_4 происходит значительное смещение $E_{1/2}$ волны от -1,38 до -1,65 В, при этом предельный ток снижается и достигает фоновых значений при дальнейшем увеличении концентрации цитрат-ионов в смеси. Нужно отметить, что повышение pH цитратных растворов до 10 не приводило к осаждению гидроксида иттербия вследствие высокой прочности комплекса, ток восстановления цитратного комплекса иттербия в щелочной среде также не наблюдается.

Более детальное изучение особенностей протекания электродных процессов проведено с использованием циклической вольтамперометрии со стационарной Hg-каплей в качестве рабочего электрода. Из анализа вольтамперограмм следует, что в некомплексообразующих и комплексообразующих фоновых электролитах электродные процессы с участием Yb(III) в значительной степени различаются (рис. 2).

В растворах 0,1 М NaClO_4 , $\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_4\text{Cl}$, KCl на катодном участке ЦВА проявляется максимум тока процесса восстановления $\text{Yb}^{3+} + e = \text{Yb}^{2+}$ при $E_{\max} = -1,4 \dots -1,5$ В, величина которого пропорциональна концентрации ионов Yb^{3+} в растворе. При дальнейшем смещении потенциала электрода вплоть до -2 В происходит возрастание тока катодного восстановления водорода, дополнительных максимумов, связанных с более глубоким восстановлением иттербия, не наблюдается. При обратной

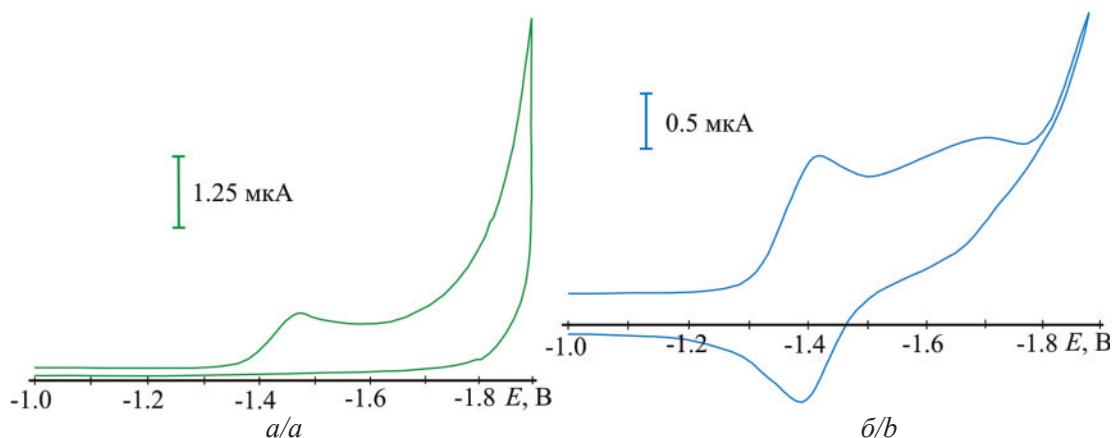


Рис. 2. Циклические вольтамперограммы стационарного Hg-электрода в растворах Yb(III) ($5 \cdot 10^{-4} M$) на фоне (а) перхлората натрия ($0,1 M NaClO_4$) и (б) ацетата натрия ($0,1 M CH_3COONa$) при $pH=5$ (скорость развертки потенциалов $50 mV/s$)

Fig. 2. Cyclic voltammograms of the hanging mercury drop electrode in Yb(III) solutions ($5 \cdot 10^{-4} M$) in (a) sodium perchlorate ($0,1 M NaClO_4$) and in (b) sodium acetate ($0,1 M CH_3COONa$) at $pH=5$ (sweep rate is $50 mV/s$)

развертке потенциалов на анодном участке ЦВА максимумы также отсутствуют. Следовательно, процесс $Yb^{3+} + e = Yb^{2+}$ в указанных электролитах протекает необратимо, продукт восстановления (Yb^{2+}) является неустойчивым и не накапливается в приэлектродном растворе. Очевидно, что ионы Yb^{2+} за счет значительного отрицательного стандартного окислительно-восстановительного потенциала $E^\circ(Yb^{3+}/Yb^{2+}) = -1,05$ В (ст.в.э.) непосредственно после образования вступают в химическую реакцию с катионами водорода $Yb^{2+} + H^+ = Yb^{3+} + \frac{1}{2}H_2$. Протекание этой реакции обуславливает каталитическое увеличение значения I_{max} и позволяет объяснить отсутствие соответствующего максимума тока окисления катиона Yb^{2+} на анодном участке ЦВА. Кроме того, расходование катионов Yb^{2+} при протекании химической стадии приводит к невозможности более глубокого восстановления с образованием амальгамы, что подтверждается отсутствием максимумов токов на ЦВА в области отрицательных потенциалов. Следовательно, в некомплексообразующих фоновых электролитах протекание катодного процесса с участием Yb(III) фактически не приводит к накоплению продуктов восстановления вследствие их расходования в каталитической химической стадии.

В условиях ЦВА в фоновом электролите $0,1 M CH_3COONa$ катодный и анодный участки вольтамперограмм содержат по два максимума токов (рис. 2, б). Катодные максимумы при $-1,45$ и $-1,7$ В отображают протекание электродной реакции $Yb(III) \rightarrow Yb(II)$ восстановления ацетатных комплексов различного состава. При обратной развертке потенциалов на анодном участке ЦВА отображаются соответствующие процессы окисления. Вместе с тем сопоставление этих максимумов показало, что величины катодных токов не согласуются между собой, как и соответствующие им анодные токи. Величина первого катодного тока $I_{max,1}$ при $E = -1,45$ В превышает величину токов остальных максимумов вследствие наложения ка-

талитической химической стадии с участием $Yb(II)$ и ионов водорода. Величина второго катодного тока $I_{max,2}$ значительно меньше величины первого вследствие частичного окисления $Yb(II)$ в растворе. Тем не менее, в отличие от некомплексообразующих фоновых растворов, в растворе ацетата натрия происходит стабилизация ионов $Yb(II)$ за счет образования ацетатных комплексов, которые накапливаются в приэлектродном слое раствора. В связи со стабилизацией $Yb(II)$ на анодном участке ЦВА отображается максимум анодного тока окисления этих ионов, чего не наблюдалось в случае перхлоратных и хлоридных сред. Тем не менее, величины токов окисления промежуточных продуктов восстановления существенно меньше токов катодного процесса, что свидетельствует о каталитическом влиянии химической реакции на протекание катодного процесса.

С целью обоснования выводов об особенностях протекания электродных процессов в некомплексообразующих и комплексообразующих фоновых растворах были проведены расчёты диаграмм $E-pH$ для исследуемых систем (рис. 3). В области потенциалов устойчивости воды термодинамически устойчивым состоянием иттербия является $Yb(III)$ (рис. 3, а), которое в зависимости от pH раствора представлено катионами или гидроксидом иттербия. Восстановление $Yb(III)$ термодинамически возможно при крайне отрицательных потенциалах за пределами устойчивости воды, при этом катион Yb^{2+} должен окисляться водой с выделением водорода (рис. 3, а). Действительно, потенциал катодного процесса $Yb(III) \rightarrow Yb(II)$, наблюдаемый в эксперименте (рис. 1, 2), близок к величине стандартного потенциала $-1,05$ В (ст.в.э.) (рис. 3, а), процесс протекает благодаря высокому перенапряжению водорода на ртутном электроде. Окисление Yb^{2+} в ходе химической реакции, протекающей в приэлектродном слое раствора, хорошо согласуется с областью потенциалов устойчивости этого катиона на диаграмме $E-pH$.

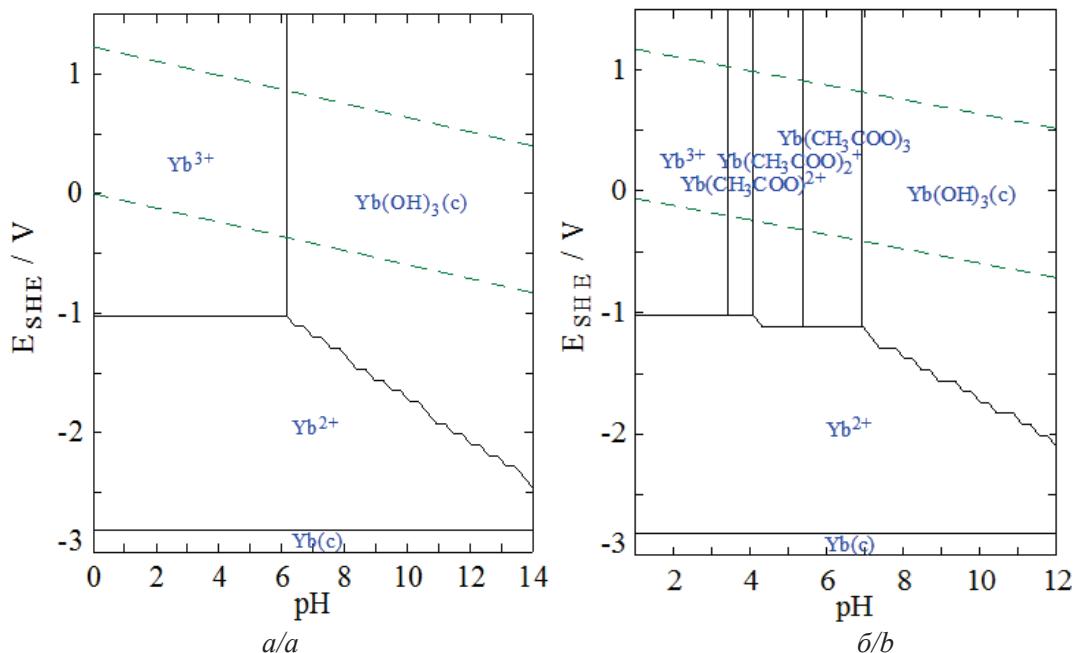


Рис. 3. Расчетные диаграммы $E_{\text{ст.в.э.}} - \text{pH}$ для систем (а) $\text{Yb}-\text{H}_2\text{O}$ и (б) $\text{Yb}-\text{H}_2\text{O}-\text{CH}_3\text{COO}^-$ ($c_0(\text{Yb}^{3+})=5 \cdot 10^{-4} \text{ M}$; $c_0(\text{CH}_3\text{COO}^-)=0,1 \text{ M}$; 25°C)
 Fig. 3. Potential-pH diagrams for the systems (a) $\text{Yb}-\text{H}_2\text{O}$ and (b) $\text{Yb}-\text{H}_2\text{O}-\text{CH}_3\text{COO}^-$ ($c_0(\text{Yb}^{3+})=5 \cdot 10^{-4} \text{ M}$; $c_0(\text{CH}_3\text{COO}^-)=0,1 \text{ M}$; 25°C)

В ацетатном фоновом электролите иттербий образует несколько комплексных соединений с различным числом лигандов и различной устойчивостью (рис. 3, б). Несмотря на формирование комплексов в системе области потенциалов и pH устойчивости катиона Yb^{2+} и гидроксида иттербия изменяются незначительно, что хорошо согласуется с данными полярографии и вольтамперометрии (рис. 1, 2). Детальный анализ диаграммы (рис. 3, б) позволяет определить смещение потенциала восстановления $\text{Yb}(\text{III}) \rightarrow \text{Yb}(\text{II})$ для комплексов различного состава: катионный комплекс с одним лигандром $[\text{Yb}(\text{CH}_3\text{COO})]^{2+}$ характеризуется таким же потенциалом восстановления, как и катион Yb^{3+} (-1,05 В), тогда как для комплексов с большим числом лигандов $[\text{Yb}(\text{CH}_3\text{COO})]^{+}$ и $[\text{Yb}(\text{CH}_3\text{COO})_3]$ характерно смещение потенциала восстановления на ~0,2 В в сторону более отрицательных потенциалов.

Этот факт позволяет объяснить появление второго широкого максимума катодного тока на ЦВА для ацетатных растворов (рис. 2, б). По-видимому, катионы Yb^{2+} , образующиеся при восстановлении комплексов $\text{Yb}(\text{III})$, образуют с ацетат-ионами комплексы аналогичного состава, что согласуется с положением максимумов анодного тока на ЦВА (рис. 2, б).

В отличие от ацетатного фонового электролита, с цитрат-ионами $\text{Yb}(\text{III})$ образует один нейтральный комплекс $[\text{Yb}(\text{Cit})]$, устойчивый в более широких интервалах pH и потенциалов (рис. 4). Электродные процессы с участием иттербия в избытке цитрата в области потенциалов -1,3...-1,5 В, как это наблюдается для перхлоратных и ацетатных растворов, не протекают. Такая особенность, по-видимому, связана с низким значением константы

нестойкости, отсутствием заряда у комплекса, структурой органических лигандов. В связи с этим технологически значимым фактором в процессах электролитического и амальгамного извлечения иттербия из растворов с применением цитратов является точный контроль содержания цитрат-ионов в растворах.

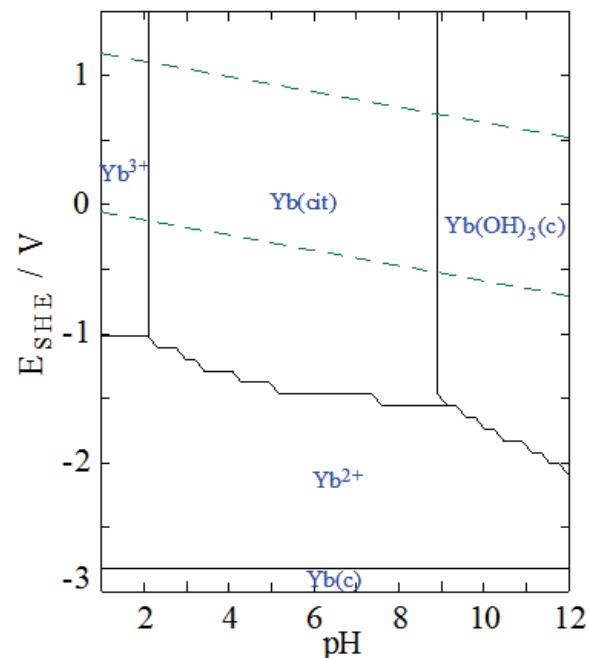


Рис. 4. Расчетная диаграмма $E_{\text{ст.в.э.}} - \text{pH}$ для системы $\text{Yb}-\text{H}_2\text{O}-\text{Cit}^{3-}$ ($c_0(\text{Yb}^{3+})=5 \cdot 10^{-4} \text{ M}$; $c_0(\text{Cit}^{3-})=0,1 \text{ M}$; 25°C)

Fig. 4. Potential-pH diagram for the system $\text{Yb}-\text{H}_2\text{O}-\text{Cit}^{3-}$ ($c_0(\text{Yb}^{3+})=5 \cdot 10^{-4} \text{ M}$; $c_0(\text{Cit}^{3-})=0,1 \text{ M}$; 25°C)

Выводы

- Параметры первой стадии восстановления иттербия(III) $\text{Yb}(\text{III}) \rightarrow \text{Yb}(\text{II})$ на ртутном катоде (потенциал, ток), а также устойчивость продукта $\text{Yb}(\text{II})$ восстановления определяются присутствием комплексообразователей в растворе. Ионы Yb^{2+} в приэлектродном растворе быстро окисляются ионами водорода (водой), химическая стадия оказывает катализический эффект на величину катодного тока восстановления $\text{Yb}(\text{III})$. В присутствии ацетат-ионов происходит стабилизация $\text{Yb}(\text{II})$, его образование в растворе может быть определено по максимуму тока анодного окис-

сления в условиях циклической вольтамперометрии.

- Избыточная концентрация цитрат-ионов по отношению к $\text{Yb}(\text{III})$ в растворе приводит к образованию прочного комплекса, который, как и гидроксид иттербия, в условиях циклической вольтамперометрии не восстанавливается на Hg-катоде вплоть до крайне отрицательных потенциалов. Для процессов электролитического и цементационного извлечения иттербия из растворов является нецелесообразным применение цитратных фоновых растворов, а также создание $\text{pH} > 6,2$ вследствие потерь иттербия за счет осаждения в виде малорастворимых соединений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Рябчиков Д.И., Терентьева Е.А. Новое в способах разделения редкоземельных элементов // Успехи химии. – 1960. – Т. 2. – № 10. – С. 1285–1300.
- Колесов Г.М., Панкратова Л.Н. Разделение редкоземельных элементов электролизом на ртутном катоде // Успехи химии. – 1968. – Т. 37. – № 9. – С. 1642–1657.
- Update on radionuclide therapy in oncology (Review) / C. Nitipir, D. Niculae, C. Orlov, M. Barbu et al. // Oncology Letters. – 2017. – V. 14. – № 6. – P. 7011–7015.
- Comparative studies of extraction chromatography and electroamalgamation separation to produce no-carrier added ^{177}Lu by Tehran research reactor / N. Salek, M. Shamsaei, M. Maragheh, S. Arani, A. Samani // Iran J. Nucl. Med. – 2017. – V. 25. – № 1. – P. 23–33.
- Тарасов В.А., Романов Е.Г., Кузнецов Р.А. Сравнительный анализ схем реакторной наработки лютеция-177 // Известия самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 15. – № 4 (5). – С. 1084–1090.
- Marsh J.K. Rare-earth metal amalgams. P. III. The separation of ytterbium from its neighbours // J. Chem. Soc. – 1943. – P. 8–10.
- Cieszykowska I., Zoltowska M., Mielcarski M. Separation of ytterbium from $^{177}\text{Lu}/\text{Yb}$ mixture by electrolytic reduction and amalgamation // Sop Transactions on Applied Chemistry. – 2014. – V. 1. – № 2. – P. 6–13.
- An electro-amalgamation approach to isolate no-carrier-added ^{177}Lu from neutron irradiated Yb for biomedical applications / R. Chakravarty, T. Das, A. Dash, M. Venkatesh // Nuclear Medicine and Biology. – 2010. – V. 37. – P. 811–820.
- Electrochemical method for producing radionuclide Lu-177 with high specific activity / P.P. Boldyrev, A.V. Kurochkin, R.F. Nurtdinov, M.A. Proshin, D.Yu. Chuvilin, Yu.A. Yashin // Moscow Univ. Chem. Bull. – 2016. – V. 71. – № 3. – P. 193–198.
- Moeller T., Kremers H. Observations on the rare earths extraction of ytterbium from rare earth mixtures with sodium amalgam // Ind. Eng. Chem. – 1945. – V. 17. – № 12. – P. 798–800.
- Possibility of obtaining high-activity ^{177}Lu in the IR-8 research reactor / P.P. Boldyrev, V.A. Zagryadskii, D.Yu. Erak et al. // Atomic Energy. – 2017. – V. 121. – № 3. – P. 208–213.
- Radiochemical separation of no-carrier-added ^{177}Lu as produced via the $^{176}\text{Yb}(n,\gamma)^{177}\text{Yb} \rightarrow ^{177}\text{Lu}$ process / N.A. Lebedev, A.F. Novgorodov, R. Misiak, J. Brockmann, F. Rosch // Applied Radiation and Isotopes. – 2000. – V. 53. – P. 421–425.
- McCoy H.N. Europium and ytterbium amalgams // J. Am. Chem. Soc. – 2002. – V. 63. – № 6. – P. 1622–1624.
- Kosynkin V.D., Molchanova T.V., Zharova E.V. Lutetium and ytterbium separation by ion-exchange chromatography // Atomic Energy. – 2017. – V. 121. – № 6. – P. 443–447.
- Bilewicz A., Zuchowska K., Bartos B. Separation of Yb as YbSO_4 from the ^{176}Yb target for production of ^{177}Lu via the $^{176}\text{Yb}(n,\gamma)^{177}\text{Yb} \rightarrow ^{177}\text{Lu}$ process // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2009. – V. 280. – № 1. – P. 167–169.
- Indirect production of no carrier added (NCA) ^{177}Lu from irradiation of enriched ^{176}Yb : options for ytterbium/lutetium separation / A. Dash, R. Chakravarty, F.F. Knapp, A. Pillai // Current Radiopharmaceuticals. – 2015. – V. 8. – № 2. – P. 107–118.
- Steeman E., Temmerman E., Verbeek F. Electrochemical reduction of the lanthanide ions. Part 1. First reduction step of ytterbium (III) in acidic 1 M NaClO_4 solution // J. Electroanal. Chem. – 1978. – V. 89. – P. 97–111.
- Rabockai T. Electrochemical reduction of ytterbium in perchloric media // J. Electroanal. Chem. – 1977. – V. 76. – P. 83–89.
- Steeman E., Temmerman E., Verbeek F. Electrochemical reduction of the lanthanide ions. Part II. Second reduction step of europium (III), ytterbium (III) and samarium (III) in acidic tetramethylammonium perchlorate solution // J. Electroanal. Chem. – 1978. – V. 89. – P. 113–122.
- Barton G.B., Kurbatov J.D. Dependence of the diffusion current of ytterbium on supporting electrolyte and pH // J. Phys. Chem. – 1949. – V. 53. – № 5. – P. 683–690.

Поступила 08.05.2019 г.

Информация об авторах

Коршунов А.В., доктор химических наук, профессор отделения естественных наук Школы базовой инженерной подготовки Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Ковалева С.В., доктор химических наук, профессор кафедры химии и методики обучения химии биолого-химического факультета Томского государственного педагогического университета.

Абрамова П.В., кандидат химических наук, ассистент отделения естественных наук Школы базовой инженерной подготовки Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Горлушко Д.А., кандидат химических наук, доцент Научно-образовательного центра Н.М. Кижнера Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 546.65:544.65

INFLUENCE OF ACETATE AND CITRATE IONS ON CATHODIC REDUCTION OF Yb(III) AT MERCURY ELECTRODES

Andrey V. Korshunov¹,

korshunov@tpu.ru

Svetlana V. Kovaleva²,

svetkovaleva@rambler.ru

Polina V. Abramova¹,

polya.bozhcko@yandex.ru

Dmitry A. Gorlushko¹,

gda@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,

30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia

² Tomsk State Pedagogical University,

60, Kievskaya street, Tomsk, 634061, Russia

Relevance. Ytterbium, its alloys and compounds are characterized by valuable thermoelectric, magnetic and optical properties, ytterbium-containing materials are used in military and nuclear industries. Due to the high chemical activity, as well as similarities with other rare earth elements, ytterbium isolation technologies include a large number of operations, among them deposition, electrolysis, cementation, adsorption, etc. The peculiarity of ytterbium (as well as europium and samarium) in comparison with other rare earth elements is the possibility of cathodic deposition at the mercury electrode and formation of amalgam at relatively low negative potentials. In this regard, the study of the regularities of the electrode processes involving ytterbium is an urgent task both from a fundamental and technological point of view.

The aim of the research is to determine the features of the effect of complexing agents (acetate and citrate ions) on cathodic reduction of Yb(III) at mercury electrodes.

Objects: ytterbium oxide, perchloric and acetic acids, solutions of salts (NaClO_4 , LiCl , $\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_4\text{Cl}$, sodium acetate and citrate) and alkali (NaOH).

Methods: direct and alternating current polarography, cyclic voltammetry with mercury electrodes.

Results. The range of potential of the cathodic process $\text{Yb(III)} \rightarrow \text{Yb(II)}$ ($1 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-3} \text{ M}$) at mercury electrodes (dropping, stationary) in non-complexing and complexing (acetate, citrate) supporting electrolytes in a wide pH range 2...9 has been refined. The effect of complexation of Yb(III) on the ratio of ytterbium and hydrogen ions reduction currents and on the stability of the intermediate product Yb(II) of the cathode process in the solution medium was established. The paper introduces the catalytic nature of the chemical reaction of Yb(II) oxidation by hydrogen ions occurred in the near-cathode layer of the solution to the process $\text{Yb(III)} \rightarrow \text{Yb(II)}$ at potentials $-1,3 \dots -1,5 \text{ V}$ (vs. $\text{Ag}/\text{AgCl}/\text{KCl}$). Interpretation of the results of electrochemical studies was carried out using the calculated diagrams $E\text{-pH}$ for $\text{Yb-H}_2\text{O}-\text{CH}_3\text{COO}^-$ and $\text{Yb-H}_2\text{O}-\text{Cit}^3-$ systems in comparison with the system without complexing agent. The importance of taking into account Yb (III) state in solutions and electrolysis conditions for the cathode process is discussed.

Key words:

Ytterbium(III) compounds, acetate and citrate complexes, direct and alternating current polarography, cyclic voltammetry, mercury electrodes, cathodic reduction.

REFERENCES

1. Ryabchikov D.I., Terent'eva E.A. Progress in methods for the separation of rare-earth elements. *Russ. Chem. Rev.*, 1960, vol. 29, no. 10, pp. 589–598.
2. Kolesov G.M., Pankratova L.N. Separation of rare-earth elements by electrolysis at a mercury cathode. *Russ. Chem. Rev.*, 1968, vol. 37, no. 9, pp. 701–710.
3. Nitipir C., Niculae D., Orlov C., Barbu M., et al. Update on radionuclide therapy in oncology (Review). *Oncology Letters*, 2017, vol. 14, no. 6, pp. 7011–7015.
4. Salek N., Shamsaei M., Maragheh M., Arani S., Samani A. Comparative studies of extraction chromatography and electroamalgamation separation to produce no-carrier added ^{177}Lu by Tehran research reactor. *Iran J. Nucl. Med.*, 2017, vol. 25, no. 1, pp. 23–33.
5. Tarasov V.A., Romanov E.G., Kuznetsov R.A. Sravnitelny analiz skhem reaktornoy narabotki lyutetsiya-177 [Comparative analysis of the reactor production of lutetium-177]. *Izvestiya Samarinskogo nauchnogo tsentra RAS*, 2013, vol. 15, no. 4 (5), pp. 1084–1090.
6. Marsh J.K. Rare-earth metal amalgams. P. III. The separation of ytterbium from its neighbours. *J. Chem. Soc.*, 1943, pp. 8–10.
7. Cieszykowska I., Zoltowska M., Mielcarski M. Separation of ytterbium from $^{177}\text{Lu}/\text{Yb}$ mixture by electrolytic reduction and amalgamation. *Sop Transactions on Applied Chemistry*, 2014, vol. 1, no. 2, pp. 6–13.
8. Chakravarty R., Das T., Dash A., Venkatesh M. An electro-amalgamation approach to isolate no-carrier-added ^{177}Lu from neutron irradiated Yb for biomedical applications. *Nuclear Medicine and Biology*, 2010, vol. 37, pp. 811–820.
9. Boldyrev P.P., Kurochkin A.V., Nurtdinov R.F., Proshin M.A., Chuvalin D.Yu., Yashin Yu.A. Electrochemical method for producing radionuclide Lu-177 with high specific activity. *Moscow Univ. Chem. Bull.*, 2016, vol. 71, no. 3, pp. 193–198.

10. Moeller T., Kremers H. Observations on the rare earths extraction of ytterbium from rare earth mixtures with sodium amalgam. *Ind. Eng. Chem.*, 1945, vol. 17, no. 12, pp. 798–800.
11. Boldyrev P.P., Zagryadskii V.A., Erak D.Yu. Possibility of obtaining high-activity ^{177}Lu in the IR-8 research reactor. *Atomic Energy*, 2017, vol. 121, no. 3, pp. 208–213.
12. Lebedev N.A., Novgorodov A.F., Misiak R., Brockmann J., Rosch F. Radiochemical separation of no-carrier-added ^{177}Lu as produced via the $^{176}\text{Yb}(n,\gamma)^{177}\text{Yb} \rightarrow ^{177}\text{Lu}$ process. *Applied Radiation and Isotopes*, 2000, vol. 53, pp. 421–425.
13. McCoy H.N. Europium and ytterbium amalgams. *J. Am. Chem. Soc.*, 2002, vol. 63, no. 6, pp. 1622–1624.
14. Kosynkin V.D., Molchanova T.V., Zharova E.V. Lutetium and ytterbium separation by ion-exchange chromatography. *Atomic Energy*, 2017, vol. 121, no. 6, pp. 443–447.
15. Bilewicz A., Zuchowska K., Bartos B. Separation of Yb as YbSO_4 from the ^{176}Yb target for production of ^{177}Lu via the $^{176}\text{Yb}(n,\gamma)^{177}\text{Yb} \rightarrow ^{177}\text{Lu}$ process. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 2009, vol. 280, no. 1, pp. 167–169.
16. Dash A., Chakravarty R., Knapp F.F., Pillai A. Indirect production of no carrier added (NCA) ^{177}Lu from irradiation of enriched ^{176}Yb : options for ytterbium/lutetium separation. *Current Radiopharmaceuticals*, 2015, vol. 8, no. 2, pp. 107–118.
17. Steeman E., Temmerman E., Verbeek F. Electrochemical reduction of the lanthanide ions. Part 1. First reduction step of ytterbium(III) in acidic 1 M NaClO_4 solution. *J. Electroanal. Chem.*, 1978, vol. 89, pp. 97–111.
18. Rabockai T. Electrochemical reduction of ytterbium in perchloric media. *J. Electroanal. Chem.*, 1977, vol. 76, pp. 83–89.
19. Steeman E., Temmerman E., Verbeek F. Electrochemical reduction of the lanthanide ions. Part II. Second reduction step of europium(III), ytterbium(III) and samarium(III) in acidic tetramethylammonium perchlorate solution. *J. Electroanal. Chem.*, 1978, vol. 89, pp. 113–122.
20. Barton G.B., Kurbatov J.D. Dependence of the diffusion current of ytterbium on supporting electrolyte and pH. *J. Phys. Chem.*, 1949, vol. 53, no. 5, pp. 683–690.

Received: 8 May 2019.

Information about the authors

Andrey V. Korshunov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Svetlana V. Kovaleva, Dr. Sc., professor, Tomsk State Pedagogical University.

Polina V. Abramova, Cand. Sc., senior lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Dmitry A. Gorlushko, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 004.8:622.24

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОМОК РЕЗЦОВ PDC С ПОМОЩЬЮ РЕГРЕССИОННОГО И НЕЙРОСЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Третьяк Александр Яковлевич¹,
13050465@mail.ru

Кузнецова Алла Витальевна¹,
alvirkuz@yandex.ru

Борисов Константин Андреевич¹,
13020165@mail.ru

¹ Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова,
Россия, 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132.

Актуальность. В процессе бурения скважин буровые долота, армированные пластинами PDC, отрабатывают свой ресурс не полностью, так как часть режущих PDC элементов выходит из строя по причине их скола, слома или потери, что в значительной степени сказывается на конечных технико-экономических показателях бурения скважин.

Цель: разработка и предложение нейросетевой модели для решения проблемы определения процента поломок режущих элементов буровых долот, армированных PDC, на основе имеющихся полевых данных бурения скважин по породам VI–VIII категорий по буримости.

Объекты: причины, вызывающие выход из строя пластин PDC на буровых долотах в процессе бурения скважин в породах VI–VI–II категории по буримости в зависимости от режимных параметров бурения.

Методы. В качестве факторов для определения процента поломок использовалась нагрузка на долото (P , кН), частота его вращения (N , об/мин) и скорость бурения (V , м/ч) при неизменных значениях параметров промывочной жидкости и компоновки низа бурильной колонны. Для анализа данных применялись регрессионные и нейросетевые модели различных конфигураций.

Результаты. Анализ регрессионных моделей показал их непригодность из-за нелинейного характера скорости бурения при низких давлениях и высоких оборотах. Авторами предложена двухступенчатая нейросетевая модель, в которой первая нейронная сеть (Neural Network) служит для определения скорости бурения, а вторая – для прогнозирования процента поломок пластин PDC. Ошибки нейросетевого ансамбля на тестовых данных не превышают величину пригодности нелинейных моделей, равную 4,5 % для относительной ошибки и 12–15 % для максимальной величины. Предложенная нейросетевая модель может найти применение при разработке технологического регламента отработки долот, армированных резцами PDC.

Ключевые слова:

Поломки PDC, искусственная нейронная сеть, регрессионная модель, технологический регламент отработки долот, торсионные вибрации.

Введение

Бурение скважин на нефть и газ в комплексе работ при геологоразведке выходит на первое место как по стоимости работ, так и по качеству и количеству геологической информации, получаемой в ходе их проведения. Породоразрушающим инструментом бурят осадочные, метаморфические и магматические породы на глубину до семи километров. Эффективность процесса бурения скважин, особенно в твердых горных породах, в значительной степени определяется эксплуатационными показателями породоразрушающего инструмента [1–4].

В последнее время на первый план выходит породоразрушающий инструмент, армированный алмазно-твердосплавными пластинами (АТП) или Polycrystalline diamond compact (PDC) [5–9]. В работе сделана попытка обобщения и систематизации результатов исследований по технологии износа и поломок буровых долот, армированных PDC.

Известно, что вибрации бурового долота, армированного PDC, являются основной причиной износа алмазных резцов. На долото могут действовать различные типы вибраций: осевая, радиальная (поперечная), торсионная (эффект пружины),

но радиальная и торсионная вибрации встречаются наиболее часто (рис. 1).

Осевая вибрация зависит от нагрузки и частоты вращения долота, а также жесткости компоновки низа бурильной колонны (КНБК). Торсионные колебания вызывают снижение скорости вращения КНБК при внедрении в горную породу на забое, вплоть до остановки вращения. При этом энергия вращения непрерывно сообщается долоту буровым станком по колоннам бурильных труб или забойными двигателями до тех пор, пока она не превысит предел прочности породы. В это время буровой снаряд с породоразрушающим инструментом (ПРИ) начинает раскручиваться с ускорением, превышающим в два или более раза номинальную скорость вращения. При этом, как и при поперечной вибрации, увеличивается ударная нагрузка на резцы PDC, что может привести к их сколу, слому и потере, в зависимости от глубины внедрения резца в породу и его положения на забое.

Торсионные колебания зависят от глубины внедрения PDC в горную породу. При большой глубине внедрения реактивный момент возрастает, а, следовательно, возрастает и риск возникновения

торсионных колебаний. При использовании PDC меньшего диаметра глубина внедрения резцов будет меньше, что способствует снижению реактивного момента. Справиться с влиянием данного эффекта можно уменьшением скорости вращения ПРИ и увеличением осевой нагрузки на режущие PDC элементы. Радиальная вибрация – это такой тип вибрации, при котором вибрация долота происходит вокруг его оси и не является его геометрическим центром. Происходит быстрое ускорение и замедление вращения долота, что значительно увеличивает ударную нагрузку на PDC. Добиться уменьшения радиальной вибрации можно путем увеличения нагрузки на PDC, уменьшением частоты вращения и увеличения жесткости КНБК [10–12].

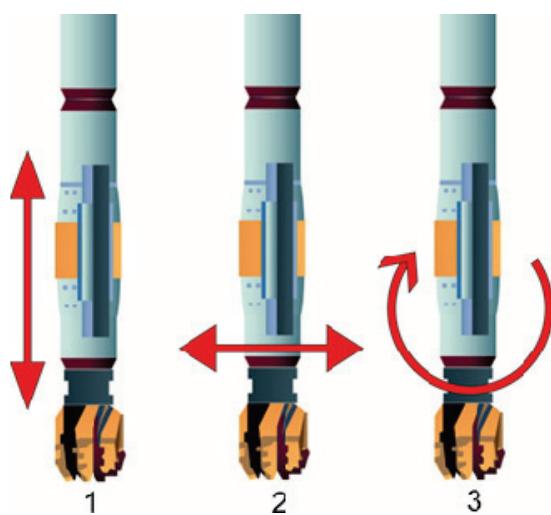


Рис. 1. Основные виды вибраций долота, армированного PDC, при бурении скважин: 1) осевая; 2) радиальная (поперечная); 3) торсионная (эффект пружины)

Fig. 1. Main types of vibration bit, reinforced PDC, when drilling wells: 1) axial; 2) radial (transverse); 3) torsional (spring effect)

Задача

Опыт эксплуатации буровых долот, армированных PDC, показывает, что наибольший процент поломок от вибраций (более 50 %) происходит по причине поломки резца, то есть скола и слома. Исходя из вышеизложенного, была поставлена задача – минимизировать количество поломок резцов PDC на буровом долоте. Решение этой задачи будет способствовать увеличению проходки на долото и механической скорости бурения.

Поломка PDC – есть результат частичного выхода из строя долота при неудачно выбранных значениях основных параметров бурения – нагрузки Р и частоты вращения N. Оптимизируя эти два основных технологических параметра, при оптимально заданных жесткости низа буровой колонны и количеству прокачиваемой жидкости, необходимо добиться минимизации количества поломок резцов PDC бурового долота.

Для буровых компаний очень важно добиться оптимальной технологии отработки долот, армированных PDC. В распоряжении технолого-буровика не всегда имеются в наличии сведения обо всех возможных поломках резцов породоразрушающего инструмента и о возможных причинах их появления, возникающих при бурении или в нештатных ситуациях. Поэтому обобщить знания специалиста на все возможные диапазоны параметров бурения можно как на основе математико-статистических методов регрессионного анализа, так и на основе популярных в настоящее время технологий искусственного интеллекта и, в частности, искусственных нейронных сетей (ИНС).

Поломки резцов PDC в процессе бурения скважин были всегда и от них невозможно избавиться полностью, но, подбирая оптимальное значение Р и N и получая при этом максимальную механическую скорость бурения V как определяющий фактор, решим задачу минимизации поломок резцов PDC.

Решение

Исследования проводились с использованием полевых данных обработки долот, армированных PDC, диаметром 215,9 мм, с 8 лопастями, вооруженными 56 пластинами PDC. Бурение скважин осуществлялось по горным породам VI–VIII категории по буримости. Фрагмент исходных данных для создания моделей представлен в табл. 1.

Полный выход долота из строя – редкость, а процент частичной поломки резцов PDC эксперт определяет следующим образом:

$$Prpol = (n_{\text{пол}} / n_{\text{общ}}) \cdot 100 \%,$$

где $n_{\text{пол}}$ – число резцов PDC, вышедших из строя за фиксированный момент времени; $n_{\text{общ}}$ – общее число элементов долота.

Анализ имеющихся экспериментальных данных показал низкую линейную корреляционную зависимость между Р и N ($R_{P,N}=0$), что является условием включения этих параметров в создаваемую модель в качестве факторных.

Высокая зависимость между скоростью и процентом поломок ($R_{V,Prpol}=0,79$) позволяет рассматривать их в качестве результативных параметров, либо один из них может быть входным для другого. Линейные корреляционные зависимости входных и выходных параметров представлены в табл. 2.

Низкая связь между N и V, N и Prpol ($R_{N,V}=0,05$; $R_{N,Prpol}=0,04$) свидетельствует о том, что прямой линейной зависимости между этими парами параметров нет. Но это совсем не значит, что между ними отсутствуют другие, нелинейные зависимости. По мнению авторов, влияние частоты оборотов на рассматриваемые выходные параметры бурения является существенно нелинейной. Косвенно это подтверждается непригодностью созданных линейных регрессионных моделей, построенных при уровне доверительного интервала 0,05:

$$V_{\text{reg}} = -0,06 + 0,49P + 0,00N; \quad (1)$$

$$Prpol_{\text{reg}} = -10,49 + 0,97P + 0,00N. \quad (2)$$

Таблица 1. Фрагмент обучающей выборки

Table 1. Fragment of the training sample

| Скорость бурения Drilling speed | <i>P</i> , кН | <i>N</i> , об/мин (r/min) | <i>V</i> , м/ч (m/h) | <i>PrPolom</i> , % |
|------------------------------------|---------------|------------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Низкая/Low | 7 | 200 | 2,0 | 0,5 |
| | 7 | 210 | 2,2 | 0,5 |
| | 8 | 230 | 3,2 | 0,6 |
| | 8 | 240 | 3,5 | 0,6 |
| | 8 | 250 | 4,0 | 0,6 |
| | 9 | 260 | 4,2 | 0,7 |
| | 9 | 270 | 4,7 | 0,7 |
| | 9 | 280 | 5,0 | 0,7 |
| | 10 | 290 | 5,6 | 0,7 |
| | 10 | 300 | 5,9 | 0,7 |
| Средняя/Average | 10 | 310 | 6,0 | 0,8 |
| | 13 | 240 | 7,4 | 1,6 |
| | 13 | 250 | 7,6 | 1,7 |
| | 13,5 | 260 | 7,8 | 1,7 |
| | 13,5 | 270 | 7,9 | 1,8 |
| | 13,5 | 280 | 7,9 | 1,9 |
| | 14 | 290 | 8,0 | 1,9 |
| | 14 | 300 | 8,0 | 2,0 |
| | 14 | 310 | 8,1 | 2,1 |
| | 14,5 | 200 | 8,1 | 2,2 |
| | 14,5 | 210 | 8,2 | 2,6 |
| | 14,5 | 220 | 8,3 | 3,4 |
| | 15 | 230 | 8,4 | 4,3 |
| | 15 | 240 | 8,4 | 4,5 |
| | 15 | 250 | 8,4 | 4,7 |
| Высокая/High | 18,5 | 210 | 9,2 | 9,3 |
| | 18,5 | 220 | 9,2 | 9,4 |
| | 19 | 230 | 9,3 | 9,6 |
| | 19 | 240 | 9,3 | 9,7 |
| | 19 | 250 | 9,4 | 9,7 |
| | 19,5 | 260 | 9,6 | 10,5 |
| | 19,5 | 270 | 9,7 | 10,6 |
| | 19,5 | 280 | 9,8 | 10,8 |
| | 20 | 290 | 10,0 | 14,9 |
| | 20 | 300 | 10,3 | 15,0 |
| | 20 | 310 | 10,5 | 15,1 |

Таблица 2. Коэффициенты корреляции параметров модели

Table 2. Correlation coefficients of model parameters

| | <i>P</i> | <i>N</i> | <i>V</i> | <i>Prpol</i> |
|--------------|----------|----------|----------|--------------|
| <i>P</i> | 1 | 0 | 0,95 | 0,93 |
| <i>N</i> | 0 | 1 | 0,05 | 0,04 |
| <i>V</i> | 0,95 | 0,05 | 1 | 0,79 |
| <i>Prpol</i> | 0,93 | 0,04 | 0,79 | 1 |

Коэффициенты регрессии для частоты вращения *N* в моделях (1) и (2) имеют порядок значений 10^{-4} (0,0029 и 0,0046), что практически исключает её из рассмотрения в качестве основного параметра регрессионной модели. Средние и максимальные значения ошибок моделей соответственно равны 8,6 и 96,4 % для (1), 82,1 и 323 % для (2), что свидетельствует об их полной непригодности.

Создание модели для вычисления процента поломок на основе трех параметров *P*, *N* и *V*:

$$Prpol_{reg} = -10,63 + 1,96P + 0,01N - 2,02V \quad (3)$$

ненамного улучшило ситуацию по сравнению с линейной моделью (2). Величины ошибок модели (3)

соответственно равны 35,7 и 214 %. Справедливо ради следует отметить, что выборы в значениях ошибок регрессионных моделей наблюдаются в области низких давлений (там имеют место существенные нелинейные зависимости) и частично в области высоких давлений.

Попытка создания нелинейных регрессионных моделей (4, 5) на основе метода наименьших квадратов (МНК) с использованием метода Гаусса–Ньютона и последующей проверкой применимости МНК показала следующие результаты:

$$V_{nlreg} = -0,04P^2 + 0,00N^2 + 1,53P + 0,00T - 6,62; \quad (4)$$

$$Prpol_{nlreg} = -0,10P^2 - 0,00N^2 - 1,82P + 0,01T + 7,21. \quad (5)$$

Уровень значимости α в обоих случаях был выбран равным 0,05. Проверка истинности пяти предпосылок МНК [13], а именно: 1) случайный характер остатков; 2) нулевая средняя величина остатков; 3) нормальное распределение остатков; 4) отсутствие автокорреляции остатков; 5) постоянство дисперсии остатков (гомоскедастичность) дала положительный ответ для предпосылок № 1–3. Выявлено наличие тенденции при проверке предпосылки № 4. Зарегистрирован незначительный выход за пределы доверительного интервала крайних левых (низкие давления) и крайних правых (высокие давления) значений вектора остатков при проверке гомоскедастичности. Величины средних и максимальных значений ошибок – 9,1 и 24,6 % для модели (4); 19,4 и 65,6 % для модели (5) все же превышают максимально допустимое значение пригодности нелинейных моделей, равное 12–15 %.

Неполное удовлетворение предпосылок МНК и превышение порога пригодности требуют либо существенной корректировки рассматриваемых нелинейных моделей либо использование принципиально иных методов и технологий определения оптимальных значений выходных параметров – аппарата теории искусственных нейронных сетей. Способность к обобщению информации, описывающей нелинейные зависимости в сложных объектах, процессах и явлениях, неотъемлемая черта ИНС, присущая ей по внутренней природе – по структуре и по способу функционирования на основе обучения. Современный уровень технологии буровых работ как раз и относится к подобным высокотехнологичным научно-ёмким процессам, характеризующимся большим числом режимов, типов параметров, объемов характеристик каждого типа, связанных сложными нелинейными соотношениями.

Нейронные сети помогают выявить связи между экспериментальными данными в тех случаях, когда статистические методы не справляются с задачей. По сравнению со статистико-математическими методами, ИНС менее требовательны к качеству априорных знаний. В рассматриваемом случае в качестве таких знаний выступает ограниченный состав выбранных входных параметров нейросетевой модели, отсутствие достоверных производ-

ственных данных для большинства граничных и ряда средних значений входных параметров. В подобных условиях нейронные сети часто дают быстрое и качественное решение задачи, как правило, не худшее, чем решение, получаемое статистическими методами, после тщательной подготовки данных для обучения сети. Разработка промышленно пригодной нейросетевой системы для определения управляющих параметров технологических процессов, как правило, осуществляется за значительно более короткое время (порядка нескольких месяцев) по сравнению с созданием аналогичной системы, требующей тщательного выбора математической модели на основе анализа имеющихся производственных данных, и информации, специфичной для данной области [15–20].

Для построения модели была использована нейронная сеть прямого распространения сигнала (feedforward) с двумя входами и двумя выходами (пакет NeuralNetworks системы Matlab). В результате циклического поиска наилучшей, в смысле минимума относительной ошибки на обучающей и тестовой выборке, оказалась сеть с двумя скрытыми слоями с десятью и пятью нейронами (рис. 2).

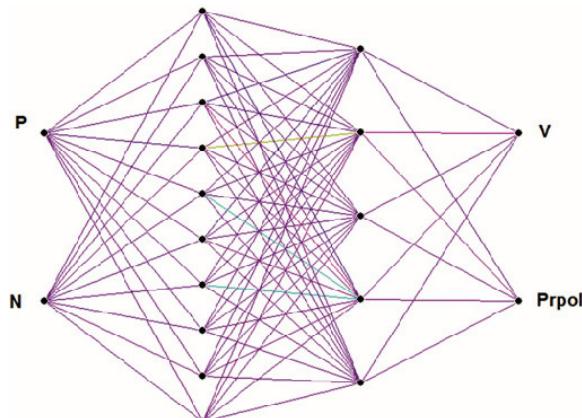


Рис. 2. Нейронная сеть для определения V , $Prpol$ на основе P , N
 Fig. 2. Neural network to determine V , $Prpol$ on the basis of P , N

Функция обучения нейронов скрытого слоя – гиперболический тангенс (*tansig*), выходного слоя – линейная (*purelin*), алгоритм обучения – Левенберга–Марквардта. Функция вычисления ошибки при обучении сети среднеквадратическая (*mse*). Способ выбора элементов обучающей выборки в процессе обучения случайный. Остальные параметры обучения сети выбраны по умолчанию. Для обучения нейронной сети использовались те же данные, что и при составлении регрессионных моделей. Из общего количества входных векторов было выделено тестовое множество в объёме 20 % от общего числа векторов. Поскольку диапазоны входных и выходных параметров различны, их значения параметров были линейно масштабированы по диапазону изменения в интервал [0..1]:

$$\tilde{x} = \frac{(x_i - x_{\min})}{(x_{\max} - x_{\min})},$$

где \tilde{x} – масштабированное значение параметра; x_i – текущее значение параметра; x_{\min} , x_{\max} – минимальное и максимальное значения параметра.

Абсолютные и относительные величины ошибок оптимальной сети оказались гораздо меньше величин ошибок, которые демонстрировали регрессионные модели. Анализ остатков, полученных в результате тестирования нейросетевой модели, показал, что, несмотря на достаточно высокую среднюю величину этих остатков по сравнению с регрессионной моделью (10^{-2} , 10^{-3} против 10^{-14}), остальные характеристики полностью удовлетворяют предпосылкам № 1–5. Этот факт, по мнению авторов, свидетельствует в пользу применения ИНС-модели, учитывающей нелинейные зависимости.

Множество значений скоростей и процента поломок, вычисляемое нейронной сетью на всем диапазоне изменения давления 7...20 кН и частоты вращения 200...310 об/мин, представлено на рис. 3.

Несмотря на приемлемые величины средних ошибок сети, максимальные значения ошибок нейросетевой модели всё еще значительны. Боль-

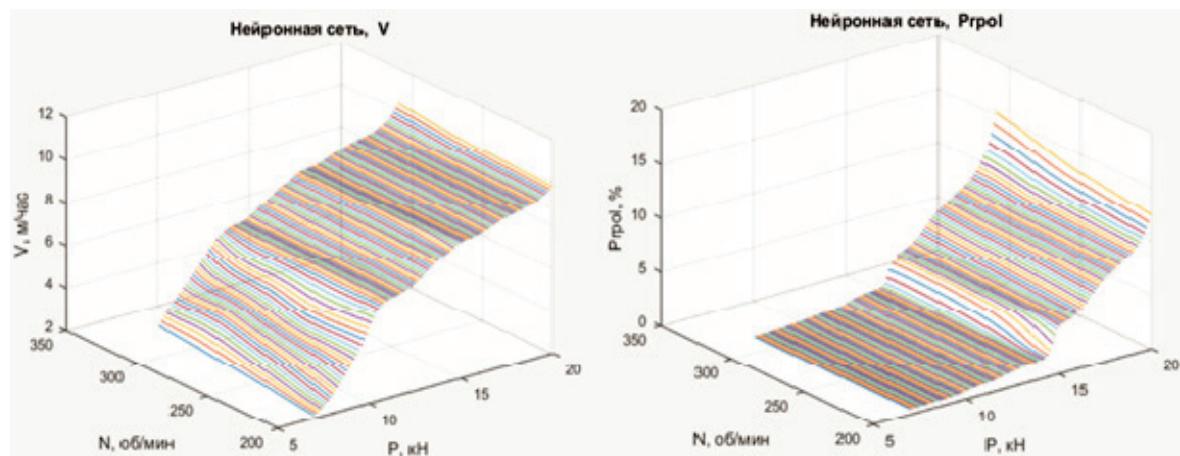


Рис. 3. Реакция сети на входные воздействия: слева – скорость бурения V ; справа – процент поломок $Prpol$

Fig. 3. Network reaction to the input: on the left is the drilling speed V ; to the right is the percentage of breakdowns $Prpol$

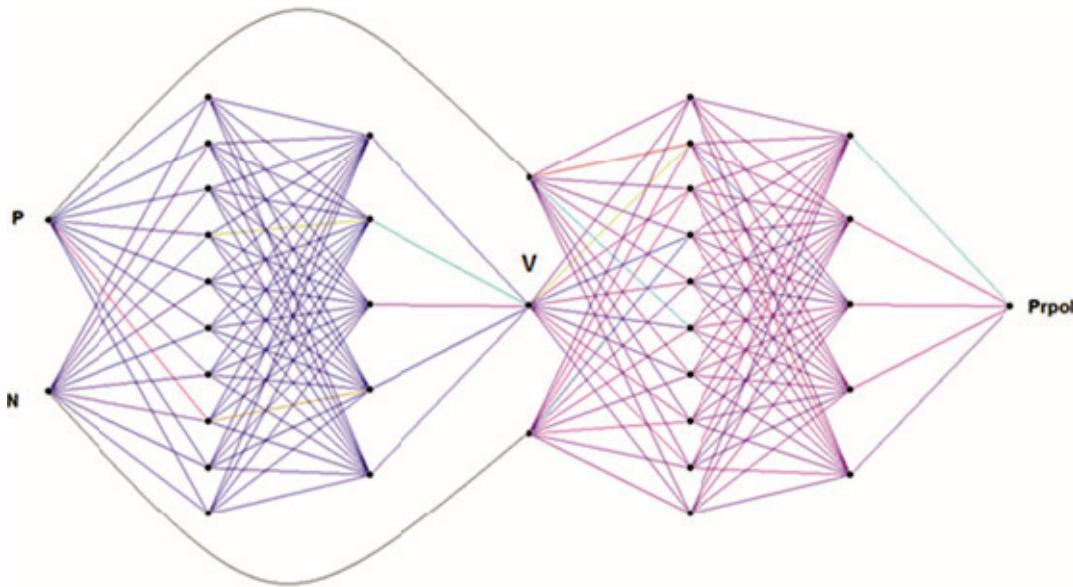


Рис. 4. Ансамбль нейронных сетей

Fig. 4. Ensemble of neural networks

шая часть выбросов наблюдалась в области низких давлений, реже – в области высокого давления и почти никогда при средних значениях давления. Учитывая вышеизложенное, а также то, что механическая скорость бурения является определяющим фактором при выработке резцов PDC, предложенная модель вида:

$$\{P, N\} \rightarrow \{NN: 10 \times 5\} \rightarrow \{V, Prpol\} \quad (6)$$

была преобразована в новую модель, состоящую из двух последовательно соединенных сетей:

$$\begin{aligned} &\{P, N\} \rightarrow \{NN: 10 \times 5\} \rightarrow \{V^*\}; \\ &\{P, N, V^*\} \rightarrow \{NN: 10 \times 5\} \rightarrow \{Prpol\}. \end{aligned} \quad (7)$$

Первая нейронная сеть ансамбля вычисляет значение скорости бурения V^* , а вторая сеть использует полученную скорость в совокупности с давлением и частотой оборотов долота для вычисления процента поломок (рис. 4).

В этом случае не только средние значения ошибок обеих сетей, но и выбросы ошибок снижены до приемлемого уровня 12–15 %. Величины ошибок, при вычислении процентов поломок двумя предложенными моделями (6) и (7), представлены в табл. 3.

На рис. 5 приведены поверхности отклика модели (7) при низких (200), средних (250) и высоких (310) значениях частоты оборотов. Результаты экспериментов показывают, что последовательно соединенные сети моделируют сложные поверхности для вычисляемых значений V и $Prpol$ в области известных значений входных параметров P , N в отличие от более «гладких» поверхностей регрессионных моделей. С одной стороны, это указывает на более тонкую настройку модели, способной точнее определять значения искомых величин, с другой – на возможную подстройку сетей под данные обучающей выборки, сформированной экспертом.

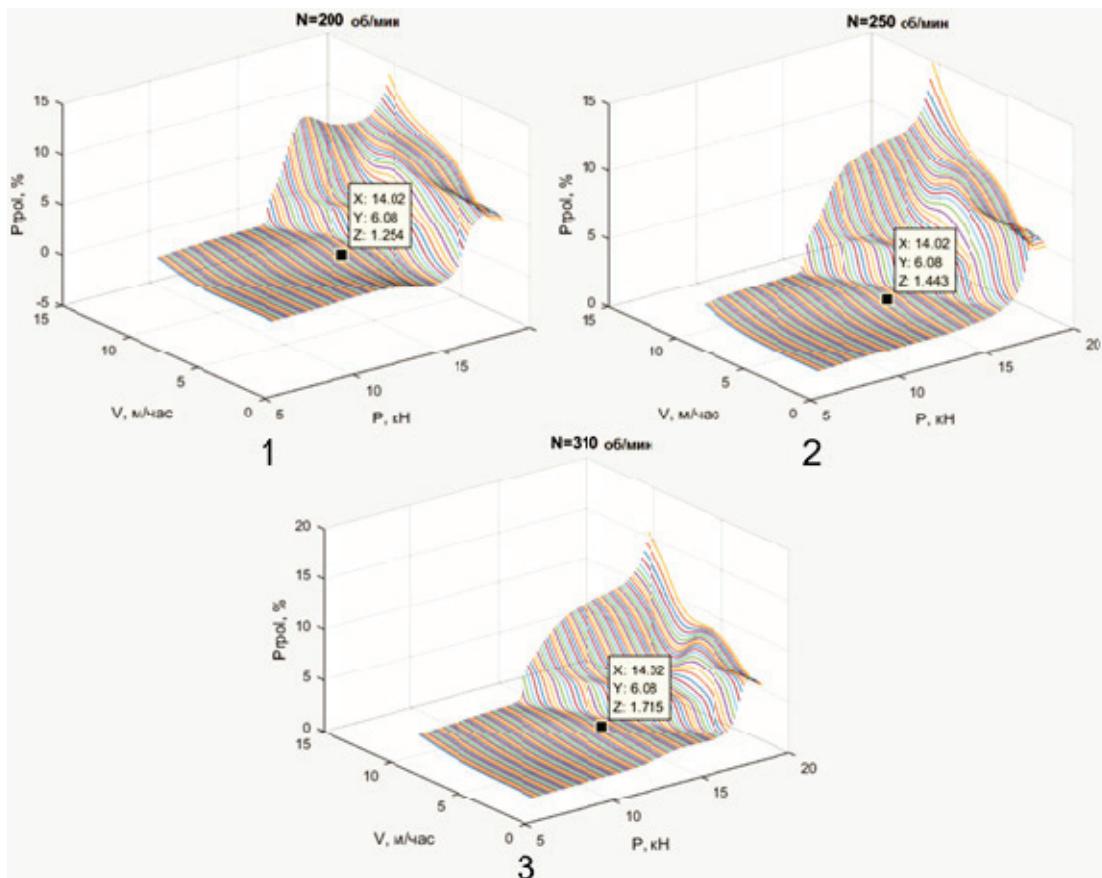
Таблица 3. Величины ошибок нейронных сетей

Table 3. Error values of neural networks

| Ошибки нейронной сети Errors of the neural network | Модель 1 Model 1 | | Модель 2 Model 2 | |
|--|---------------------|---------|---------------------|---------|
| | V | $Prpol$ | V | $Prpol$ |
| Среднее значение остатков на обучающей выборке Average value of residuals in the training sample | -0,02 | -0,01 | -0,01 | -0,01 |
| Среднее значение остатков на тестовом множестве Average value of residuals on the test set | -0,01 | -0,03 | -0,01 | -0,01 |
| Среднее значение относительной ошибки на обучающей выборке Average value of the relative error in the training sample | 1,29 | 3,58 | 2,74 | 2,76 |
| Среднее значение относительной ошибки на тестовом множестве Average value of the relative error on the test set | 2,05 | 4,48 | 2,95 | 2,82 |
| Максимальное значение относительной ошибки на обучающей выборке Maximum value of the relative error in the training sample | 12,82 | 19,90 | 10,67 | 11,96 |
| Максимальное значение относительной ошибки на тестовом множестве Maximum value of the relative error on the test set | 14,74 | 16,89 | 11,03 | 13,07 |

Выводы

- Использование нейросетевых моделей для целей минимизации поломок резцов PDC является актуальной задачей.
- Предложенная модель ансамбля нейронных сетей позволяет добиться увеличения механической скорости бурения скважин на нефть и газ, а также проходку на долото, с учетом уменьшения поломок PDC.



Rис. 5. Реакция второй сети (процент поломок): 1) N=200; 2) N=250; 3) N=310

Fig. 5. Reaction of the second network (breakdowns percentage): 1) N=200; 2) N=250; 3) N=310

3. Модель может быть использована при оперативном учете основных параметров бурения в системе геолого-технологических исследований.
4. Положительные результаты, полученные с помощью комплексной нейросетевой модели с использованием полевых данных отработки долот, армированных PDC, показали её пригодность и возможность дальнейшего развития путем учёта дополнительных параметров режима бурения и уточнения уже использованной входной информации.
5. Предложенная нейросетевая модель и её последующие модификации могут найти широкое применение при разработке технологического регламента отработки долот, армированных резцами PDC.
6. Использование нейросетевых моделей для целей оптимизации техники и технологии сооружения скважин на нефть и газ в настоящее время востребовано производственниками и требует дальнейшего совершенствования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инновационные подходы к конструированию высокоеффективного породоразрушающего инструмента / А.Я. Третьяк, В.В. Попов, А.Н. Гроссу, К.А. Борисов // ГИАБ. – 2017. – № 8. – С. 225–230.
2. Метод расчета осевой нагрузки и механической скорости бурения двухъярусного долота режущего типа Д-2ВВ / А.Я. Третьяк, В.Ф. Чихоткин, Ю.Ф. Литкевич, А.Е. Асеева // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2006. – № 3. – С. 13–18.
3. Нескоромных В.В., Пушмин П.С. Методика оптимальных параметров режима и условий бурения скважин // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАН. – 2011. – № 1 (38). – С. 151–157.
4. Нескоромных В.В., Борисов К.И. Аналитическое исследование процесса резания-скальвания горной породы долотом с резцами PDC // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 1. – С. 191–195.
5. Третьяк А.А., Литкевич Ю.Ф., Асеева А.Е. Разработка методики расчёта наработки породоразрушающего инструмента с алмазно-твердосплавным вооружением // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2010. – № 12. – С. 2–5.
6. Третьяк А.А. Влияние вибраций на прочностные свойства буровых коронок, армированных алмазно-твердосплавными пластинами // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2016. – № 10. – С. 20–24.
7. Сысоев Н.И., Буренков Н.Н., Третьяк А.А. Расчет конструк-

- тивных параметров буровых коронок, армированных PDC // Oil and Gas Journal Russia. – 2012. – № 5. – С. 56–58.
8. Симонов В.Б., Юнин Е.К. Влияние колебательных процессов на работу бурильного инструмента. – М.: Недра, 1977. – 210 с.
9. Власюк В.И., Будюков Ю.Е., Спирин В.И. Технические средства и технологии для повышения качества бурения скважин. – Тула: Гриф и К, 2013. – 176 с.
10. Третьяк А.А., Савенок О.В., Швец В.В. Буровые коронки, армированные алмазно-твердосплавными пластинами. – Новочеркасск: Изд-во Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ), 2015. – 186 с.
11. Ресурсосберегающая технология алмазного бурения в сложных геологических условиях / Н.В. Соловьев, В.Ф. Чихоткин, Р.К. Богданов, А.П. Закора. – М.: Изд-во ВНИИОЭНГ, 1997. – 329 с.
12. A new method of combined rock drilling / T. Jiren, L. Yiyu, G. Zhaolong, X. Binwei, S. Huijuan et al. // International Journal of Mining Science and Technology. – 2014. – V. 24. – Iss. 1. – P. 1–6.
13. Ивченко Г.И., Медведев Ю.И. Математическая статистика. – М.: КД Либроком, 2014. – 352 с.
14. Sarle W.S. Neural Networks and Statistical Models // Proc. of the Nineteenth Annual SAS Users Group International Conference. – Cary, NC, SAS Institute, April 3–4, 1994. – P. 1538–1550.
15. Syzrantseva K., Arishin V., Dvoynikov M. Optimization of the damping element of axial vibrations of the drilling string by computer simulation // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – № 11 (10). – P. 2312–2315.
16. Application of hybrid artificial neural networks for predicting rate of penetration (ROP): a case study from Marun oil field / S.B. Ashrafi, M. Anemangely, M. Sabah, M.J. Ameri // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – V. 175. – P. 604–623.
17. Ahmed O.S., Adeniran A.A., Samsuri A. Computational intelligence based prediction of drilling rate of penetration: a comparative study // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – № 172. – P. 1–12. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.09.027.
18. A new methodology for optimization and prediction of rate of penetration during drilling operations / Y. Zhao, A. Noorbakhsh, M. Koopialipoor, A. Azizi, M.M. Tahir // Engineering with Computers. – 2019. – DOI: 10.1007/s00366-019-00715-2.
19. Hossain M.E., Al-Majed A.A. Fundamentals of Sustainable Drilling Engineering // Fundamentals of Sustainable Drilling Engineering. – 2015. – P. 785. DOI: 10.1002/9781119100300.
20. Soares C., Daigle H., Gray K. Evaluation of PDC bit ROP models and the effect of rock strength on model coefficients // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2016. – № 34. – P. 1225–1236. DOI: 10.1016/j.jngse.2016.08.012.

Поступила: 22.02.2019 г.

Информация об авторах

Третьяк А.Я., доктор технических наук, профессор, академик РАЕН, заведующий кафедрой нефтегазовые техники и технологии Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) им. М.И. Платова.

Кузнецова А.В., кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры программного обеспечения вычислительной техники Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) им. М.И. Платова.

Борисов К.А., ассистент кафедры нефтегазовых техники и технологии Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) им. М.И. Платова.

UDC 004.8:622.24

DETERMINATION OF PDC CUTTER BREAKDOWNS USING REGRESSION AND NEURAL NETWORK MODELING

Alexander Ya. Tretyak¹,

13050465@mail.ru

Alla V. Kuznetsova¹,

alvirkuz@yandex.ru

Konstantin A. Borisov¹,

13020165@mail.ru

¹ Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),
132, Prosveshcheniya street, Novocherkassk, 346428, Russia.

The relevance. While drilling, the drill bits reinforced with PDC plates do not fully work out their life, as part of the cutting PDC elements fails due to their chipping, breakage or loss, which largely affects the final technical and economic indicators of well drilling.

The aim of the research is to develop and to propose a neural network model to solve the problem of determining the percentage of breakage of cutting elements of drill bits reinforced with PDC, based on the available field data of drilling wells on rocks of VI–VIII category of drilling capacity.

Objects: the reasons causing failure of PDC plates on drill bits in well drilling in rocks of VI–VIII category of drilling capacity depending on the operating parameters of drilling.

Methods. The load on the bit, its speed and drilling speed were used as the determining factors for defining the percentage of breakdowns at constant values of the parameters of the washing liquid and bottom-hole assembly. Regression and neural network models of different configurations were used for data analysis.

Result. The analysis of regression models showed their unsuitability due to the nonlinear nature of the drilling speed at low pressures and high rpm. The authors proposed a two-stage neural network model in which the first neural network is used to determine the drilling speed, and the second – to predict the percentage of PDC plate breakdowns. Errors of the neural network ensemble on the test data do not exceed the values of the suitability of nonlinear models – 4,5 % for the relative error and 12–15 % of its maximum value. The proposed neural network model can be used in the development of technological regulations of working bits reinforced with PDC cutters.

Key words:

PDC breakdowns, artificial neural network, regression model, technological regulations of bit mining, torsional vibrations.

REFERENCES

1. Tretyak A.Ya., Popov V.V., Grossu A.N., Borisov K.A. Innovative approaches to designing highly efficient rock-breaking tool. *GIAB*, 2017, no. 8, pp. 225–230. In Rus.
2. Tretyak A.Ya., Chikhotkin V.F., Litkevich Yu.F., Aseeva A.E. Metod rascheta osevoy nagruzki i mekhanicheskoy skorosti bureniya dvukhjarusnogo dolota rezhuschego tipa D-2VV [The method of calculating the axial load and the mechanical speed of drilling a bimetallic bit of cutting type D-2VV]. *Stroitelstvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*, 2006, no. 3, pp. 13–18.
3. Neskromnykh V.V., Pushmin P.S. Metodika optimalnykh parametrov rezhima i usloviy bureniya skvazhin [Methods of optimal parameters and drilling conditions of wells]. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektii nauk o Zemle RAEN*, 2011, no. 1 (38), pp. 151–157.
4. Neskromnykh V.V., Borisov K.I. Analytical study of the process of rock cutting-chipping with a chisel with PDC cutters. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 1, pp. 191–195.
5. Tretyak A.A., Litkevich Yu.F., Aseeva A.E. Razrabotka metodiki rascheta narabotki porodorazrushayushchego instrumenta s almazno-tverdosplavnym vooruzheniem [Development of methodology for calculation of developments of rock cutting tool with a diamond-carbide armament]. *Stroitelstvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*, 2010, no. 12, pp. 2–5.
6. Tretyak A.A. Vliyanie vibratsii na prochnostnye svoistva burevyykh koronok, armirovannykh almazno-tverdosplavnymi plastinami [Influence of vibrations on the strength properties of drill bits reinforced with diamond-carbide plates]. *Stroitelstvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*, 2016, no. 10, pp. 20–24.
7. Sysoev N.I., Burenkov N.I., Tret'yak A.A. Calculating design parameters of PDC drill bits. *Oil and Gas Journal Russia*, 2012, no. 5, pp. 56–58.
8. Simonov V.V., Yunin E.K. *Vliyanie kolebatelnykh protsessov na rabotu burilnogo instrumenta* [Influence of oscillatory processes on the operation of drilling tools]. Moscow, Nedra Publ., 1977. 210 p.
9. Vlasuk V.I., Budyukov Yu.E., Spirin V.I. *Tekhnicheskie sredstva i tekhnologii dlya povysheniya kachestva bureniya skvazhin* [Technical means and technologies to improve the quality of drilling]. Tula, Grif i K Publ., 2013. 176 p.
10. Tre'yak A.A., Savenok O.V., Shvets V.V. *Burovye koronki, armirovannye almazno-tverdosplavnymi plastinami* [Drill bits, reinforced with diamond-carbide plates] Novocherkassk, South Russian State Polytechnic University (NPI) Publ., 2015. 186 p.
11. Solovev N.V., Chikhotkin V.F., Bogdanov R.K., Zakora A.P. *Resursosberegayushchaya tekhnologiya almaznogo bureniya v slozhnykh geologicheskikh usloviyakh* [Resource-saving technology of diamond drilling in complex geological conditions]. Moscow, VNIIOENG Publ., 1997. 329 p.
12. Jiren T., Yiyu L., Zhaolong G., Binwei X., Huijuan S. A new method of combined rock drilling. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2014, vol. 24, Iss. 1, pp. 1–6.
13. Ivchenko G.I., Medvedev Yu.I. *Matematicheskaya statistika* [Mathematical statistics]. Moscow, KD Librokom Publ., 2014. 352 p.

14. Sarle W.S. Neural Networks and Statistical Models. *Proc. of the Nineteenth Annual SAS Users Group International Conference*. Cary, NC, SAS Institute, April 3–4, 1994. pp. 1538–1550.
15. Syzrantseva K., Arishin V., Dvoynikov M. Optimization of the damping element of axial vibrations of the drilling string by computer simulation. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2016, no. 11 (10), pp. 2312–2315.
16. Ashrafi S.B., Anemangely M., Sabah M., Ameri M.J. Application of hybrid artificial neural networks for predicting rate of penetration (ROP): a case study from Marun oil field. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 175, pp. 604–623.
17. Ahmed O.S., Adeniran A.A., Samsuri A. Computational intelligence based prediction of drilling rate of penetration: a comparative study. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, no. 172, pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.09.027.
18. Zhao Y., Noorbakhsh A., Koopialipoor M., Azizi A., Tahir M.M. A new methodology for optimization and prediction of rate of penetration during drilling operations. *Engineering with Computers*, 2019. DOI: 10.1007/s00366-019-00715-2.
19. Hossain M.E., Al-Majed A.A. Fundamentals of Sustainable Drilling Engineering. *Fundamentals of Sustainable Drilling Engineering*, 2015. 785 p. DOI: 10.1002/9781119100300.
20. Soares, C., Daigle, H., Gray, K. Evaluation of PDC bit ROP models and the effect of rock strength on model coefficients. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, no. 34, pp. 1225–1236. DOI: 10.1016/j.jngse.2016.08.012.

Received: 22 February 2019.

Informstion about the authors

Alexander Ya. Tretyak, Dr. Sc., professor, Academician of Russian Academy of Natural Sciences, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI).

Alla V. Kuznetsova, Cand Sc., associate professor, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI).

Konstantin A. Borisov, assistant, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI).

УДК 556.531.4:550.84.094

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ МЕЖДУ ХИМИЧЕСКИМ СОСТАВОМ ВОД И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ РЕК СИБИРИ

Савичев Олег Геннадьевич,

OSavichev@mail.ru

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

Актуальность. Понимание механизма и количественная оценка взаимодействия между речными водами и веществом речных наносов, донных отложений и берегов представляет собой методологическую основу планирования мероприятий по рекультивации нарушенных водных объектов, экологического мониторинга и гидрохимических поисков полезных ископаемых.

Цель работы: количественное описание взаимосвязей между химическим составом речных вод и донных отложений.

Методы исследования: статистические методы, математическое моделирование гидрохимических процессов.

Результаты и выводы. Рассмотрена математическая модель взаимосвязей концентраций Fe, Cu, Pb, Zn, As водах и донных отложениях рек Омутная (речная система Омутная-Киргизка-Томь-Обь), Ильбокич, Боткич, Верхняя и Нижняя Немба, Инганба (притоки реки Чадобец; система Чадобец-Ангара-Енисей) и Актуру (система Актуру-Чуя-Катунь-Обь). Предложен алгоритм определения параметров этой модели, включающий регрессионный анализ и использование методов оптимизации. Показано, что связи между химическим составом речных вод и донных отложений существенно не линейны и зависят от абсолютных и относительных характеристик интенсивности водообмена, заболоченности водосборных территорий и pH речных вод. Установлено, что абсолютное и относительное приращение концентраций в речных водах обычно меньше, чем соответствующее приращение концентраций в донных отложениях. В то же время иногда отмечаемые высокие концентрации Fe и повышенные содержания некоторых микроэлементов могут быть связаны не только с наличием природных геохимических аномалий в донных отложениях или загрязнением водного объекта, но и с определенными сочетаниями природных условий, например, с приближением фактической сорбции к максимальным возможным значениям.

Ключевые слова:

Донные отложения, речные воды, химический состав, математическая модель, таежная зона Сибири.

Введение

Химический состав речных вод формируется в результате комплекса различных процессов, включая взаимодействие между речными водами и веществом речных наносов, донных отложений и берегов. Понимание механизма и количественная оценка таких взаимодействий представляет собой методологическую основу одновременно и гидрохимических поисков полезных ископаемых, и планирования рекультивации нарушенных водных объектов, и геоэкологического мониторинга [1, 2]. По этой причине их изучению посвящено огромное количество работ, среди которых следует отметить работы [3, 4], в которых предпринята попытка теоретически обосновать взаимосвязи между водным, твердым и химическим стоком и приведено наиболее полное обобщение исследований донных отложений. Тем не менее целый ряд вопросов остался недостаточно раскрытым, в результате чего до сих пор не разработаны способы расчета сбросов загрязняющих веществ в водные объекты с учетом геохимического состояния донных отложений, а в ряде случаев эффективность гидрохимических поисков остается недостаточно высокой [5–8].

С учетом этого был выполнен анализ взаимосвязей между геохимическими показателями речных вод и донных отложений на основе модели, учитывающей процессы сорбции, растворения, осаждения, а также влияние потока на их скорость и полноту. Целью анализа является количественное описание механизма взаимодействия речных вод и

донных отложений, пригодное для оптимизации методик гидрохимических поисков полезных ископаемых и геоэкологического мониторинга. Исходной информацией послужили данные о химическом составе вод и донных отложений рек Омутная, Ильбокич, Боткич, Верхняя и Нижняя Немба, Инганба, Актуру.

Река Омутная является элементом речной системы Омутная-Киргизка-Томь-Обь (Томская область, Российская Федерация). Водосбор расположен в районе Туганского циркон-ильменитового месторождения и проявления полиметаллической и благороднометалльной минерализации [9, 10]). Водовмещающие отложения палеоген-четвертичного возраста [11]. Полевые работы проведены 23.06.2018 г.

Реки Ильбокич, Боткич, Верхняя и Нижняя Немба, Инганба являются притоками реки Чадобец – элемента системы Чадобец-Ангара-Енисей (Красноярский край, Российская Федерация). Водовмещающие отложения палеозойского, мезозойского и кайнозойского возрастов; палеозойские отложения прорваны основными породами формаций сибирских траппов [12]. Полевые работы проведены 13–17.08.2008 г.

Река Актуру – элемент речной системы Актуру-Чуя-Катунь-Обь (республика Алтай, Российская Федерация). Водосбор сложен гранитоидами Актууринского массива пермо-триасового возраста. В его пределах выявлены участки, перспективные на проявления золота, цинка, свинца и приуроченные к Актууринской магмо-рудно-мета-

соматической системе [13]. Полевые работы выполнены В.В. Паромовым 18–20.07.2013 г.

Выбор объектов обусловлен, с одной стороны, приуроченностью к участкам фактического или потенциально возможного обнаруженияrudопроявлений в таежной зоне Северной Азии [9], а с другой стороны – наличием измерений расходов воды, скоростей течения, глубины потока и материалов одновременного изучения химического состава вод и донных отложений с использованием современных и сопоставимых (или одних и тех же) методов исследования. В рассматриваемом случае использовались данные, полученные в лабораториях Томского политехнического университета (ТПУ) и ООО «Плазма» (г. Томск) с использованием методов: pH – потенциометрический; Ca²⁺, Mg²⁺, HCO₃⁻, CO₃²⁻, CO₂, Cl⁻, перманганатная (PO) и бихроматная (BO) окисляемость – титриметрический; SO₄²⁻ – турбидиметрический; Na⁺, K⁺ – ионная хроматография; Si, NH₄⁺, NO₂⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻ – фотометрический; Fe и микроэлементы – спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой и извлечением кислоторастворимых форм элементов. Подробная информация об указанных объектах и используемых методах определения приведена в [11, 12].

Особенностью работы является достижение поставленной цели путем разработки и апробации математической модели формирования содержаний Fe, Cu, Zn, Pb, As, что определило структуру рассматриваемой работы. Химические элементы выбраны с учетом попытки повысить эффективность водоохранных мероприятий и работ по выявлению участков водных объектов с повышенными относительно нормативов концентрациями (в Сибири практически повсеместно – Fe, очень часто – Cu, Zn, в ряде случаев, включая антропогенно измененные территории – Pb и As [2, 14–16]).

Математическая модель взаимосвязей между химическим составом речных вод и донных отложений

Любая модель – всегда набор определенных допущений и упрощений, который более или менее адекватно описывает исследуемый фрагмент реальности. Нами (с учетом подходов [6, 7, 17–19] к совместному описанию сорбции, растворения и осаждения) был использован следующий набор уравнений:

$$\frac{dC}{dt} = \varphi_{ds} + \varphi_{srh} = \varphi_0 - k_r C, \quad (1)$$

$$\varphi_{ds} = k_{p0}(k_{p1}C_p - C) \approx k_{p0}(k_g M_{aq}^{b_1} C_g - C), \quad (2)$$

$$\varphi_{srh} = k_s(S - k_c C) \approx k_s(S - k_m(S_m - S)C), \quad (3)$$

$$k_r = k_{p0} + k_s k_m (S_m - S), \quad (4)$$

где t – координата времени; φ_{ds} и φ_{srh} – функции, описывающие процессы растворения–осаждения (2) и сорбции–десорбции (3), соответственно; φ_0 – функция, слабо зависящая от времени и расхода

воды Q в момент времени t ; C и S – концентрация исследуемого вещества в речных водах и донных отложениях, соответственно; C_p – концентрация вещества в речных водах, соответствующая локальному равновесию в системе *вода–порода* и аппроксимируемая, согласно [20], средним геометрическим C_g с учетом поправки на отклонение от равновесия, связанное с пространственными изменениями среднемноголетнего модуля водного стока M_{aq} ; S_m – максимальная сорбционная способность донных отложений; $k_{p0}, k_{p1}, k_g, b_1, k_s, k_m$ – эмпирические коэффициенты.

При $\frac{dC}{dt} = 0$ концентрации веществ в речных водах и донных отложениях определяются уравнениями:

$$C_e = \frac{k_s S + k_{p0} k_{p1} C_p}{k_r} = \frac{S + \frac{k_{p0}}{k_s} k_{p1} C_p}{\frac{k_{p0}}{k_s} + k_m (S_m - S)}, \quad (5)$$

$$S_e = \frac{k_s k_m S_m C + k_{p0} C - k_{p0} k_{p1} C_p}{k_s + k_s k_m C} = \frac{k_m S_m C + \frac{k_{p0}}{k_s} (C - k_{p1} C_p)}{1 + k_m C}. \quad (6)$$

В общем случае при допущениях

$$\frac{dC}{dt} = \frac{dC}{dQ} \frac{dQ}{dt} \approx \frac{dC}{dQ} \lambda Q \text{ и } \frac{k_r}{\lambda} \approx \text{const}$$

(λ – удельная скорость изменения расхода воды) в качестве решения (1) рассматривается как отклонение некоторого устойчивого состояния при среднемноголетнем расходе воды Q_a :

$$C = C_e + (C_0 - C_e) \left(\frac{Q}{Q_a} \right)^{-\frac{k_r}{\lambda}}, \quad (7)$$

где C_0 – концентрация вещества в начальный момент времени, принимаемая, с учетом [20, 21], как среднее геометрическое C_g .

Методика исследования

Модель (4)–(7) содержит значительное количество неизвестных параметров, измерить которые сложно или невозможно. С учетом этого использовались методы оптимизации (метод общего понижающего градиента; реализация в пакете MS Excel) с минимизацией функции:

$$NS^* = \sqrt{1 - NS} = \frac{1}{\sigma_o} \sqrt{\frac{\sum (y_o - y_s)^2}{N-1}}, \quad (8)$$

где NS – критерий Нэша–Сатклифа [22]; y_o и y_s – измеренные и вычисленные значения исследуемой величины y ; σ_o – среднее квадратическое отклонение измеренных значений y_o ; N – объем выборки. Зависимость принимается удовлетворительной при $NS^* \leq 0,8$ ($NS > 0,36$).

Для более эффективного поиска минимума функции (8) предложен следующий алгоритм определения параметров модели (4)–(7):

- 1) в первом приближении подбираются значения k_m и S_m в уравнении Лэнгмюра при минимуме (8):

$$S = \frac{k_m S_m C}{1 + k_m C}; \quad (9)$$

- 2) из уравнения (9) обратным расчетом по известным значениям S , C , k_m находится величина S_m , для которой с помощью метода наименьших квадратов подбирается уравнение связи с гидрологическими и геохимическими показателями $y_{F,j}$ ($j=1, \dots, m$) в виде:

$$\ln S_m = \ln S_{m,0} + \sum (b_{F,j} \ln y_{F,j}), \quad (10)$$

где коэффициенты $\ln S_{m,0}$ и $b_{F,j}$ определяются при условии превышения удвоенной погрешности их определения и $NS > 0,36$;

- 3) подбираются значения k_g , b_1 и (в первом приближении) k_r/λ в уравнении (7) при условии, что $C_0=C_g$ и $C_e \approx k_g M_Q^b C_g$;
- 4) для известных значений $S_{m,0}$, $b_{F,j}$, k_g , b_1 подбираются значения k_m , k_{p0}/k_s ; и ΔS_m ($S_m := S_{m,0} + \Delta S_m$);
- 5) для известных значений $S_{m,0}$, ΔS_m , $b_{F,j}$, k_g , b_1 , k_m , k_{p0}/k_s подбираются значения k_r/λ .

В качестве аргументов зависимости вида (10) использовались расход воды Q ($\text{м}^3/\text{с}$), модуль водного стока M_Q ($\text{л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$), коэффициент шероховатости n_r (в формуле Шези–Маннинга), предельный диаметр неподвижной фракции донных отложений

$$d_{sb,lim} = 0,012 \frac{v^3}{\sqrt{h}} \quad (v - \text{средняя скорость течения, м/с};$$

h – средняя глубина потока, м; $d_{sb,lim}$ в м [23]), pH, бихроматная и перманганатная окисляемость, концентрации макрокомпонентов, фосфатов, железа и кремния, а также коэффициенты вариации среднегодовых расходов воды $Cv(Q_y)_1$ и среднемесячных расходов в среднем за многолетний период $Cv(Q_m)_2$ (коэффициенты вариации приняты для рек Ильбокич, Боткич, Верхняя и Нижняя Немба, Инганба – по реке-аналогу Чадобец, для реки Омутная – по реке-аналогу Киригизке; для Актуру – по данным гидрометрических наблюдений непосредственно на этом водотоке).

После определения параметров модели (4)–(7) выполнялось моделирование изменений концентраций Fe, Cu, Zn, Pb, As для абстрактной реки с площадью водосбора $F_b=3000 \text{ км}^2$ (нижний диапазон категории «средняя река» в равнинных условиях) и диаметром донных отложений $d_{sb,lim}=0,001$ м. Среднемноголетние значения расхода воды Q_a (среднее арифметическое), σ_a (среднее квадратическое отклонение), среднегеометрические значения pH_g, PO_g, BO_g, C_g(HCO₃⁻), C_g(NH₄⁺), C_g(P) определялись по эмпирическим зависимостям (11)–(18), полученным методом наименьших квадратов для 60 средних рек бассейнов Оби, Енисея и Лены (по данным Росгидромета):

$$Q_a = (0,007600 \pm 0,0000384) F_b, \quad NS = 0,87, \quad (11)$$

$$\sigma_a = (0,001354 \pm 0,000050) F_b, \quad NS = 0,92, \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \ln C_g(\text{HCO}_3^-) = & (5,236 \pm 0,144) - \\ & -(0,497 \pm 0,069) M_{aQ}, \quad NS = 0,47, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \text{pH}_g = & (5,911 \pm 0,229) + \\ & +(0,312 \pm 0,052) \ln C_g(\text{HCO}_3^-), \quad NS = 0,41, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \text{BO}_g = & (21,230 \pm 5,219) + (0,714 \pm 0,169) f_{sw} - \\ & -(0,595 \pm 0,247) M_{aQ}, \quad NS = 0,58, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \text{PO}_g = & (4,511 \pm 1,344) + (0,414 \pm 0,056) f_{sw}, \\ NS = & 0,61, \end{aligned} \quad (16)$$

$$C_g(\text{NH}_4^+) = (25,020 \pm 2,599) \text{BO}_g \cdot 10^{-3}, \quad NS = 0,64, \quad (17)$$

$$C_g(\text{P}) = (1,327 \pm 0,158) \text{BO}_g \cdot 10^{-3}, \quad NS = 0,36 \quad (18)$$

где F_b – площадь водосбора в км^2 ; f_{sw} – заболоченность водосбора в % от его площади; среднемноголетний расход воды Q_a и его среднее квадратическое отклонение σ_a – в $\text{м}^3/\text{с}$; M_{aQ} – среднемноголетний модуль водного стока в $\text{л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$; средние геометрические значения РО и ВО – в $\text{мгO}/\text{дм}^3$; рН – в единицах pH4 среднегеометрические значения концентраций HCO₃⁻, NH₄⁺, фосфора фосфатов (P) – в $\text{мг}/\text{дм}^3$. Соотношение Q/Q_a принималось для расчетного значения коэффициента вариации $Cv=\sigma_a/Q_a$ при условии соответствия эмпирической кривой обеспеченностей распределению Крицкого–Менкеля, соотношения коэффициентов асимметрии и вариации $Cs=2Cv$ и для обеспеченностей расхода воды 1, 10, 50, 90, 99 % (соответственно, Q/Q_a : 1,46; 1,23; 0,99; 0,78; 0,64).

Средние геометрические концентрации Fe, Cu, Zn, Pb, As, которые использовались при определении параметров уравнений (1)–(7), рассчитаны по данным наблюдений в соответствующем водосборе (для р. Омутной – за период 1998–2018 гг., для р. Актуру – по данным о реках Актуру и Тюте за период 1997–2014 гг., в случае рек Ильбокич, Боткич, Верхняя и Нижняя Немба, Инганба – данные за 2008–2009 гг. по всем указанным водотокам). При моделировании были заданы постоянные значения C_g : Fe – 0,9 $\text{мг}/\text{дм}^3$; Cu, Zn, Pb, As – 0,9 $\text{мкг}/\text{дм}^3$.

В процессе моделирования для заданной обеспеченности расхода воды P и $F_b=3000 \text{ км}^2$ использовалась 21 сценарий с комбинацией различающихся исходных параметров: 1) $f_{sw}=50\%$, $M_{aQ}=7,6 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$, pH=4, 5, 6, 7, 8, 9 (варианты V1–V6, соответственно); 2) $f_{sw}=5\%$, $M_{aQ}=7,6 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$, pH=4, 5, 6, 7, 8, 9 (варианты V7–V12); 3) $f_{sw}=5\%$, $M_{aQ}=15,2 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$, pH=4, 5, 6, 7, 8, 9 (варианты V13–V18). Дополнительно использовались варианты V19–V21, в которых значение pH определялось по зависимостям (13, 14) при условиях, указанных в сценариях 1, 2, 3. Всего – 105 сценариев (21 сценарий для каждого модульного коэффициента Q/Q_a).

Результаты исследования и их обсуждение

Корреляционный анализ показал, что для рек Омутная, Ильбокич, Боткич, Верхняя Немба, Нижняя Немба, Инганба, Актру значимая корреляционная связь (при уровне значимости 5 %) между концентрациями в донных отложениях и речных водах характерна только для As (причем обратная), а связь с другими компонентами химического состава речных вод выявлена в основном только для Fe и Cu (табл. 1). Однако подбор параметров модели (4)–(7) показал, что такие связи, безусловно, имеются (табл. 2), но они существенно нелинейны и сильно меняются в зависимости от водного стока, pH речных вод и заболоченности водосбора (табл. 3).

Таблица 1. Статистически значимые* коэффициенты корреляции между концентрациями Fe, Cu, Zn, Pb, As в донных отложениях (S), среднемноголетним модулем водного стока M_{aQ} , коэффициентами вариации среднегодовых ($Cv(Q_y)_1$) и среднемесячных ($Cv(Q_m)_2$) расходов воды, измеренных расходов воды Q , pH и geoхимических показателей речной воды

Table 1. Statistically significant* factors of correlation between concentration of Fe, Cu, Zn, Pb, As in bottom sediments (S), mean long-term module of water flow M_{aQ} , factors of a variation of mid-annual ($Cv(Q_y)_1$) and monthly ($Cv(Q_m)_2$) discharges, measured discharges Q , pH and geochemical parameters of river water

| Показатель/Parameter | $S(\text{Fe})$ | $S(\text{Cu})$ | $S(\text{Zn})$ | $S(\text{Pb})$ | $S(\text{As})$ |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| M_{aQ} | -0,70 | -0,64 | - | - | - |
| $Cv(Q_y)_1$ | 0,48 | 0,43 | 0,49 | 0,46 | - |
| $Cv(Q_m)_2$ | 0,81 | 0,77 | - | - | - |
| Q | -0,65 | -0,63 | - | - | - |
| pH речной воды/pH of river water | -0,74 | -0,77 | - | - | - |
| Геохимические показатели речной воды Geochemical parameters of river water | | | | | |
| Сумма главных ионов Sum of main ions | 0,50 | 0,66 | - | - | - |
| Ca^{2+} | 0,42 | 0,53 | - | - | -0,43 |
| Mg^{2+} | 0,61 | 0,65 | - | - | - |
| HCO_3^- | 0,54 | 0,77 | - | - | - |
| SO_4^{2-} | -0,60 | -0,57 | - | - | - |
| NH_4^+ | 0,74 | 0,48 | - | - | - |
| As | - | - | 0,66 | 0,66 | -0,46 |
| Si | 0,79 | 0,69 | - | - | - |
| Перманганатная окисляемость Permanganate oxidability | 0,45 | - | - | 0,43 | - |
| Бихроматная окисляемость Bichromate oxidability | 0,63 | - | - | - | - |

Примечание: * коэффициент корреляции r принимается значимым при условии $|r| \geq 2 \frac{1 - r^2}{\sqrt{N - 1}}$, где N – объем выборки.

Note: * correlation coefficient r is accepted as significant for condition $|r| \geq 2 \frac{1 - r^2}{\sqrt{N - 1}}$, where N is sample size.

Зависимость концентраций веществ в донных отложениях от расходов воды и модулей водного стока в целом обратная (Fe, Cu), что аналогично связи гидрологических характеристик с суммарным содержанием растворенных веществ в речных

водах [1, 24]. Несколько неожиданный, но вполне объяснимый результат – статистически значимые коэффициенты корреляции с коэффициентами вариации среднегодовых и среднемесячных расходов воды (табл. 1). Данный факт хорошо согласуется с концепцией маргинальных фильтров, предложенной А.П. Лисицыным [25], и свидетельствует о более благоприятных условиях аккумуляции веществ в донных отложениях рек с наибольшей изменчивостью водного и, соответственно, твердого стока.

Максимальная сорбционная способность донных отложений S_m во многих случаях обратно пропорциональна величине pH речных вод, с увеличением которой может усиливаться выпадение из раствора малорастворимых гидроксидов, карбонатов и гуматов исследуемых и ряда других химических элементов одновременно и/или с последующими обменными реакциями [26–31]. Эти процессы, в свою очередь, зависят от условий накопления и выноса продуктов взаимодействия речных вод с наносами и донными отложениями [7, 32–34], причем определенную роль играет диаметр частиц донных отложений как характеристика площади их взаимодействия с речными водами [35, 36]. Однако статистически значимую связь с величиной $d_{sd,lim}$ удалось установить только для As (табл. 2), а также для Zn, Pb, Cu в р. Актру. Возможно, это объясняется существенными различиями условий формирования твердого стока исследуемых рек, а также неучтенным влиянием термического режима водных объектов на формы миграции химических элементов [37] и, соответственно, распределение между фракциями донных отложений с разной подвижностью.

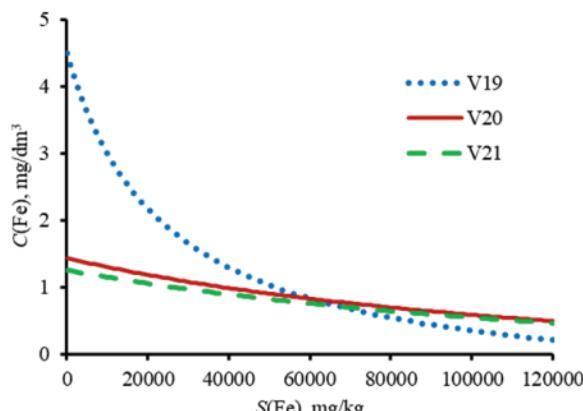
Коэффициенты регрессии для величин ($Cv(Q_y)_1$) и ($Cv(Q_m)_2$) по модулю были несколько меньше удвоенной погрешности их определения и в расчетах не использовались. К прочим факторам формирования S_m относятся: содержание органических веществ по бихроматной и перманганатной окисляемости (соответственно, трудно- и относительно легко окисляемые вещества), продукты его трансформации (NH_4^+ , фосфаты по Р) и ион HCO_3^- . Связь микроэлементов с железом в виде компонента уравнения (10) не была выявлена и не использовалась при моделировании, но, как показали дополнительные расчеты, использование функции $C(\text{Fe})^{b(\text{Fe})}$ с подбором $b(\text{Fe})$ методами оптимизации позволяет несколько снизить итоговую оценку NS^* для модели (4)–(7).

Величина S_m – важный, но не ключевой фактор формирования химического состава речных вод и донных отложений. Ключевым фактором, судя по полученным данным моделирования (табл. 3), является соотношение S_m и S при заданных значениях Q/Q_a , k_r/λ , k_m/k_p . В общих чертах при увеличении концентраций Cu, As и Fe в донных отложениях расчетные концентрации указанных элементов в речных водах возрастают в периоды с пониженной водностью (относительно нормы водно-

Таблица 2. Параметры модели (4)–(7)

Table 2. Parameters of model (4)–(7)

| Параметр (уравнение) Parameter (equation) | Исследуемый химический элемент/Researched chemical element | | | | |
|--|--|--------------------|--------------------|-------------------|---------------------|
| | Fe | Cu | Zn | Pb | As |
| $\ln S_{m,0} (10)$ | $15,220 \pm 1,365$ | $22,904 \pm 4,008$ | $4,105 \pm 0,445$ | $1,923 \pm 0,199$ | $34,816 \pm 7,982$ |
| $b(\text{pH}) (10)$ | $-0,555 \pm 0,162$ | $-9,306 \pm 1,922$ | — | — | $-12,622 \pm 3,283$ |
| $b(\text{PO}) (10)$ | — | — | — | $0,401 \pm 0,131$ | — |
| $b(\text{BO}) (10)$ | $0,159 \pm 0,054$ | — | — | — | — |
| $b(\text{P}) (10)$ | $0,155 \pm 0,045$ | — | $-0,344 \pm 0,108$ | — | — |
| $b(\text{NH}_4^+) (10)$ | — | — | $0,454 \pm 0,180$ | — | — |
| $b(\text{HCO}_3^-) (10)$ | — | — | — | — | $-1,661 \pm 0,363$ |
| $b(d_{sh,lim}) (10)$ | — | — | — | — | $0,094 \pm 0,043$ |
| NS (8) для ур. (10)/for eq. (10) | 0,887 | 0,610 | 0,478 | 0,383 | 0,688 |
| ΔS_m | -151,768 | 2,542 | -5,353 | 14,690 | 2,033 |
| $k_{p0}/k_s (5, 6)$ | -49850,164 | -17796,978 | -846,666 | 10991,803 | -301909,928 |
| $k_m (5, 6)$ | 0,054 | 196800,425 | 2191,518 | 175301,896 | 533640,649 |
| $k_g (2)$ | 2,423 | 0,846 | 14,656 | 27,095 | 1,738 |
| $b_1 (2)$ | -0,291 | 0,038 | -1,146 | -2,007 | -0,300 |
| $-k_r/\lambda (7)$ | -0,402 | -0,275 | 0,757 | 1,008 | -0,065 |
| NS (8) для ур. (7) for eq. (10) | 0,514 | 0,412 | 0,562 | 0,817 | 0,965 |



a

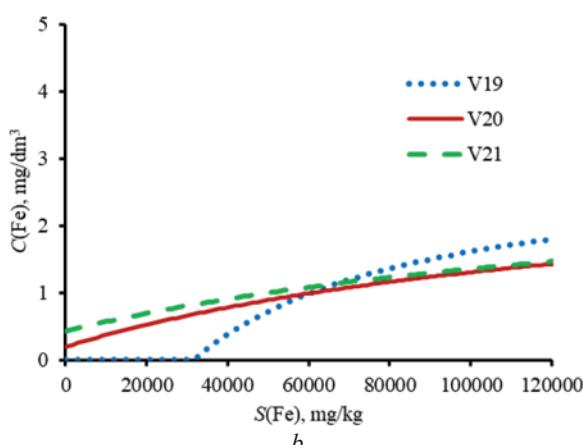


Рис. 1. Расчетные соотношения концентраций Fe в речных водах (C) и донных отложениях (S) для сценариев V19, V20, V21 (табл. 3) при коэффициенте водного стока $Q/Q_a=1,23$ (a) и $Q/Q_a=0,78$ (b)

Fig. 1. Simulated ratio of Fe concentration in river waters (C) and bottom sediments (S) for scripts V19, V20, V21 (table 3), factor of water flow $Q/Q_a=1,23$ (a) and $Q/Q_a=0,78$ (b)

го стока) и снижаются в периоды с повышенной водностью (рис. 1), причем возможны такие условия, при которых будут наблюдаться резкие колебания концентраций в речных водах и донных отложениях (рис. 2, 3). Обратная картина характерна для Zn и Pb (более высокий уровень содержания возможен при более высокой водности).

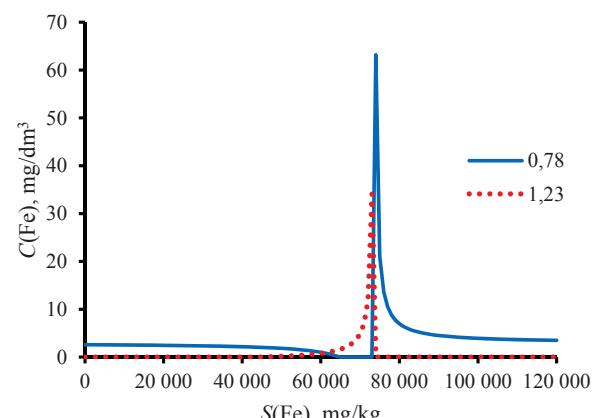


Рис. 2. Расчетные соотношения концентраций Fe в водах (C) и донных отложениях (S) реки с заболоченностью водосбора $f_{sw}=50\%$ и $pH=6,0$ (сценарий V3, табл. 3) при коэффициенте водного стока $Q/Q_a=0,78$ и 1,23

Fig. 2. Simulated ratio of Fe concentration in waters (C) and bottom sediments (S) of the river with basin marshiness $f_{sw}=50\%$ and $pH=6,0$ (script V3, table 3), factor of water flow Q/Q_a 0,78 and 1,23

Величина S_m – важный, но не ключевой фактор формирования химического состава речных вод и донных отложений. Ключевым фактором, судя по полученным данным моделирования (табл. 3), является соотношение S_m и S при заданных значениях Q/Q_a , k_r/λ , k_m , k_{p0}/k_s . В общих чертах при увеличении концентраций Cu, As и Fe в донных отложениях расчетные концентрации указанных эл-

Таблица 3. Расчетные концентрации Fe, Cu, Zn, Pb, As в речных водах при разных значениях коэффициента водного стока Q/Q_a , концентрации исследуемого вещества в донных отложениях S , pH речной воды, заболоченности водосбора f_{sw} , среднемноголетнем модуле водного стока M_{aQ}

Table 3. Simulated concentration of Fe , Cu , Zn , Pb , As in river waters at different values of water flow factor Q/Q_a , concentration of researched substance in bottom sediments S , pH of river water, marshiness of a river basin f_{su} , mean long-term module of water flow M_{AQ}

| Элемент Element | Q/Q_a | S | Концентрации в речной воде С при сценариях моделирования/Concentration in river water C for modelling scripts | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|---|-----|---|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|------|------|--|
| | | | V1 | V2 | V3 | V4 | V5 | V6 | V7 | V8 | V9 | V10 | V11 | V12 | V13 | V14 | V15 | V16 | V17 | V18 | V19 | V20 | V21 | |
| г/кг | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | мг/дм ³ /mg/dm ³ | | | |
| Fe | 1,23 | 0 | 0,55 | 0,33 | 0,00 | 11,80 | 2,05 | 1,53 | 0,25 | 0,00 | 2,25 | 1,50 | 1,30 | 1,21 | 0,18 | 10,3 | 1,59 | 1,28 | 1,16 | 1,11 | 4,49 | 1,44 | 1,26 | |
| | | 40 | 0,72 | 0,61 | 0,00 | 1,45 | 1,09 | 1,01 | 0,56 | 3,51 | 1,12 | 1,00 | 0,96 | 0,94 | 0,64 | 1,12 | 0,93 | 0,90 | 0,88 | 0,87 | 1,30 | 0,99 | 0,89 | |
| | | 80 | 0,95 | 1,12 | 0,00 | 0,49 | 0,64 | 0,69 | 1,22 | 0,25 | 0,62 | 0,69 | 0,72 | 0,73 | 2,22 | 0,31 | 0,57 | 0,64 | 0,67 | 0,69 | 0,55 | 0,70 | 0,65 | |
| | | 120 | 1,26 | 2,32 | 0,00 | 0,13 | 0,37 | 0,47 | 3,42 | 0,00 | 0,34 | 0,48 | 0,54 | 0,58 | 0,00 | 0,00 | 0,34 | 0,46 | 0,52 | 0,55 | 0,21 | 0,50 | 0,47 | |
| | 0,78 | 0 | 1,35 | 1,65 | 2,59 | 0,00 | 0,00 | 0,07 | 1,75 | 5,07 | 0,00 | 0,12 | 0,38 | 0,50 | 1,84 | 0,00 | 0,00 | 0,41 | 0,56 | 0,63 | 0,00 | 0,20 | 0,43 | |
| | | 40 | 1,13 | 1,28 | 2,17 | 0,18 | 0,65 | 0,76 | 1,34 | 0,00 | 0,61 | 0,77 | 0,82 | 0,85 | 1,24 | 0,62 | 0,86 | 0,91 | 0,92 | 0,94 | 0,38 | 0,78 | 0,91 | |
| | | 80 | 0,84 | 0,61 | 6,97 | 1,43 | 1,24 | 1,18 | 0,48 | 1,74 | 1,26 | 1,17 | 1,14 | 1,12 | 0,00 | 1,68 | 1,33 | 1,24 | 1,20 | 1,17 | 1,36 | 1,16 | 1,23 | |
| | | 120 | 0,43 | 0,00 | 3,50 | 1,90 | 1,60 | 1,46 | 0,00 | 2,27 | 1,63 | 1,45 | 1,37 | 1,32 | 20,5 | 2,07 | 1,63 | 1,48 | 1,40 | 1,35 | 1,80 | 1,43 | 1,47 | |
| мг/кг | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | мкг/дм ³ /mkg/dm ³ | | | |
| Cu | 1,23 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 40 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 80 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 120 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 0,78 | 0 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | |
| | | 40 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | |
| | | 80 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | |
| | | 120 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,97 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,97 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,97 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | |
| Zn | 1,23 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 40 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 80 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 120 | 1,06 | 1,06 | 1,06 | 1,06 | 1,06 | 1,06 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | |
| | 0,78 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 40 | 0,74 | 0,74 | 0,74 | 0,74 | 0,74 | 0,74 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,74 | 0,75 | 0,75 | |
| | | 80 | 0,74 | 0,74 | 0,74 | 0,74 | 0,74 | 0,74 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,74 | 0,75 | 0,75 | |
| | | 120 | 0,74 | 0,74 | 0,74 | 0,74 | 0,74 | 0,74 | 0,74 | 0,74 | 0,74 | 0,74 | 0,74 | 0,74 | 0,74 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,74 | 0,74 | 0,75 | 0,75 | |
| Pb | 1,23 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 40 | 1,13 | 1,13 | 1,13 | 1,13 | 1,13 | 1,13 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,13 | 1,11 | 1,11 | |
| | | 80 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | |
| | | 120 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | |
| | 0,78 | 0 | 0,70 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 40 | 0,68 | 0,68 | 0,68 | 0,68 | 0,68 | 0,68 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,68 | 0,70 | 0,70 | |
| | | 80 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 120 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| As | 1,23 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 40 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 80 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 120 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 0,78 | 0 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,92 | 0,92 | 0,92 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,92 | 0,92 | 0,92 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,92 | 0,92 | 0,92 | 0,92 | 0,91 | |
| | | 40 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | |
| | | 80 | 0,91 | 0,91 | 0,92 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,92 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | |
| | | 120 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | |
| Параметры модели (4)–(7)/Parametres of the model (4)–(7) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| pH | ед.pH/Unit pH | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 7,23 | 7,23 | 7,12 | | |
| f_{sw} | % | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | |
| M_{aQ} | $\text{л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$ $1/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ | 7,6 | 7,6 | 7,6 | 7,6 | 7,6 | 7,6 | 7,6 | 7,6 | 7,6 | 7,6 | 7,6 | 7,6 | 7,6 | 15,2 | 15,2 | 15,2 | 15,2 | 15,2 | 15,2 | 7,6 | 7,6 | 15,2 | |

ементов в речных водах возрастают в периоды с пониженной водностью (относительно нормы водного стока) и снижаются в периоды с повышенной водностью (рис. 1), причем возможны такие условия, при которых будут наблюдаться резкие колебания концентраций в речных водах и донных отложениях (рис. 2, 3). Обратная картина характерна для Zn и Pb (более высокий уровень содержания возможен при более высокой водности).

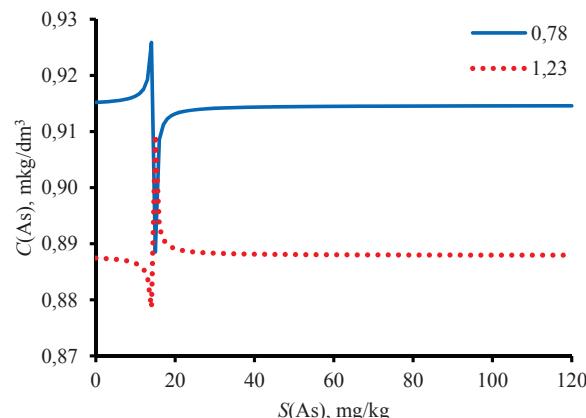


Рис. 3. Расчетные соотношения концентраций As в речных водах (C) и донных отложениях (S) реки с заболоченностью водосбора $f_{sw}=5\%$ и $pH=7,0$ (сценарий V10, табл. 3) при коэффициенте водного стока Q/Q_a 0,78 и 1,23

Fig. 3. Simulated ratio of As concentration in waters (C) and bottom sediments (S) of the river with basin marshiness $f_{sw}=5\%$ and $pH=7,0$ (script V10, table 3), factor of water flow Q/Q_a 0,78 and 1,23

Необходимо отметить, что хорошо выраженные изменения концентраций в зависимости от расхода и pH речных вод, а также заболоченности водосбора характерны, прежде всего, для железа. Концентрации Cu, Zn, Pb, As изменяются в более узком диапазоне (табл. 3). Это, с одной стороны, внушиает некоторый пессимизм с точки зрения использования гидрохимических данных для поисков полезных ископаемых ввиду сложности и неоднозначности связей S и C . Использование последних, конечно же, возможно, но более эффективно в комплексе с литогеохимическими работами. При этом плотность опробования может корректироваться с учетом региональных зависимостей концентраций веществ в донных отложениях от соотношения площади водосбора и его бессточной части в истоках рек, а также сопряженности речной сети и тектонических нарушений [38]. Собственно гидрохимическое опробование наиболее целесообразно проводить в летне-осеннюю межень, когда наблюдается пониженный водный и твердый сток. Но даже выявленные высокие концентрации веществ в речных водах, сами по себе, не свидетельствуют о наличии природной или антропогенной геохимической аномалии в донных отложениях (рис. 2, 3), что необходимо учитывать при интерпретации результатов поисков и экологического мониторинга.

С другой стороны, результаты моделирования весьма оптимистичны в части оценки антропоген-

ных воздействий на водные объекты — абсолютное и относительное приращение концентраций веществ в речных водах обычно заметно меньше соответствующего приращения в донных отложениях. Безусловно, переход вещества из донных отложений в водный поток возможен, особенно при поддержании кислой и слабокислой среды [39]. В том числе вероятно и вторичное загрязнение речных вод. Но последнее в сочетании с прямым воздействием (перенос твердых частиц), как было показано в [40], обычно локализовано на участках до 4–5 км от источника загрязнения (максимально – 11–12 км).

Анализ результатов моделирования также позволяет, вслед за С.Л. Шварцевым [2, 41], предположить, что для формирования высоких содержаний некоторых химических элементов в поверхностных и подземных водных объектах достаточно определенного сочетания природных условий, определяющих преобладание аккумуляции над выносом даже при отсутствии крупных эндогенных источников. В случае железа к ним могут быть отнесены: 1) высокая заболоченность водосборной территории, определяющая повышенную максимальную сорбционную способность грунтов; 2) общее долгосрочное снижение интенсивности водообмена (в том числе, и за счет ухудшения дренированности территории), не нарушающая резкими колебаниями водного стока. Такие условия, например, могли наблюдаться с конца мезозоя на территории современного Бакчарского района Томской области, где выявлены проявления осадочных железных руд [9, 42].

Заключение

В результате исследования получены следующие результаты:

- 1) разработана и апробирована математическая модель взаимосвязей между концентрациями Fe, Cu, Zn, Pb, As в речных водах и донных отложениях в условиях таежной зоны и горно-таежных районов Сибири, предложен алгоритм определения параметров этой модели;
- 2) связи между химическим составом речных вод и донных отложений существенно нелинейны и зависят от абсолютных и относительных характеристик интенсивности водообмена, заболоченности водосборных территорий и pH речных вод;
- 3) абсолютное и относительное приращение концентраций в речных водах обычно меньше, чем соответствующее приращение концентраций в донных отложениях, что в целом обеспечивает устойчивость химического состава речных вод при малых и средних антропогенных нагрузках на водные объекты (под такой нагрузкой нами понимается воздействие в пределах ошибки определения и геохимического фона, соответственно);
- 4) высокие концентрации Fe и некоторых микроэлементов (Pb, As) и их резкие колебания в речных водах в ряде случаев могут быть связаны не только с наличием природных геохимиче-

ских аномалий в донных отложениях или загрязнением водного объекта, но и с определенными сочетаниями природных условий, например, с приближением фактической сорбции к максимально возможным значениям;
5) влияние процессов растворения–осаждения оказывает не только прямое воздействие на

уровень содержания Fe и микроэлементов в водах рек Сибири, но и косвенное (возможно, даже более значимое), за счет формирования максимальной сорбционной способности донных отложений.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Meybeck M. Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads // American Journal of Science. – 1987. – V. 287. – P. 401–428.
2. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh Groundwater in the Main Landscape Zones of the Earth // Geochemistry International. – 2008. – V. 46. – № 13. – P. 1285–1398.
3. Поликарпочкин В.В. Вторичные ореолы и потоки рассеяния. – Новосибирск: Наука, 1976. – 407 с.
4. Янин Е.П. Техногенные речные илы (условия формирования, вещественный состав, геохимические особенности). – М.: APCO, 2018. – 415 с.
5. Домаренко В.А. Рациональная методика поисков и геолого-экономической оценки месторождений руд редких и радиоактивных элементов. Ч. 1. Прогнозирование, поиски и оценка. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2012. – 167 с.
6. Loucks D.P., Van Beek E. Water resources systems planning and management. An Introduction to Methods, Models and Applications. – Turin: UNESCO Publishing, printed by Ages Arti Grafiche, 2005. – 679 p.
7. Benedini M., Tsakiris G. Water Quality Modelling for Rivers and Streams. – Dordrecht: Springer, 2013. – 288 p.
8. Методика разработки нормативов допустимых сбросов веществ и микроорганизмов в водные объекты для водопользователей (с изменениями от 31.07.2018 г.). – М.: МПР России, 2018. – 35 с.
9. Недра России. В 2 т. Т. 1. Полезные ископаемые / А.А. Смыслов, Н.В. Межеловский, А.Ф. Морозов, Е.А. Басков, А.И. Бурдэ, К.Б. Ильин, А.В. Козлов, Л.В. Кулачков, В.С. Литвиненко, Ю.В. Лир, Д.В. Рундквист, И.Г. Савина, С.В. Сендерек, Л.И. Тихомиров, М.Г. Харламов / под ред. Н.В. Межеловского, А.А. Смыслова. – СПб.; М.: Горный ин-т, Межрегионцентр по геол. Картографии, 2001. – 547 с.
10. Циркон-ильменитовые россыпные месторождения как потенциальный источник развития Западно-Сибирского региона / Л.П. Рихванов, С.С. Кропанин, С.А. Бабенко, А.И. Соловьев, В.М. Советов, Т.Ю. Усова, М.А. Полякова / под ред. Е.Н. Трибунского, М.С. Паровинчака. – Кемерово: ООО «Сарс», 2001. – 214 с.
11. Трансформация минерального состава донных отложений от истоков к устьям рек / О.Г. Савичев, В.А. Домаренко, Е.В. Перегудина, О.Е. Лепокурова // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 7. – С. 43–56.
12. Савичев О.Г., Копылова Ю.Г., Хващевская А.А. Эколого-геохимическое состояние окружающей среды в Северном Приангарье (Восточная Сибирь) // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 1. – С. 129–136.
13. Магмо-рудно-метасоматическая система Актуру в Горном Алтае / А.И. Гусев, А.Ф. Коробейников, А.Я. Шеничкин, В.А. Домаренко // Успехи современного естествознания. – 2014. – № 7. – С. 75–79.
14. Транспорт загрязняющих веществ по крупным рекам европейского Севера и Сибири / А.М. Никаноров, В.А. Брызгалов, О.С. Решетняк, М.Ю. Кондакова // Водные ресурсы. – 2015. – Т. 42. – № 3. – С. 279–287. DOI: 10.7868/S0321059615010101.
15. Моисеенко Т.И. Эволюция биогеохимических циклов в современных условиях антропогенных нагрузок: пределы воздействий // Геохимия. – 2017. – № 10. – С. 841–862. DOI: 10.7868/S0016752517100089.
16. Водный кадастровый реестр Российской Федерации. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество. 2017 год. – СПб: Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Федеральное агентство по водным ресурсам, федеральное агентство по недропользованию, 2018. – 153 с.
17. Grenthe I., Hummel W., Puigdomenech I. Chemical Background for the Modelling of Reactions in Aqueous systems // Modelling in aquatic chemistry / Eds. I. Grenthe, I. Puigdomenech. – Paris, France: Organisation for economic co-operation and development (OECD). Nuclear Energy Agency, 1997. – P. 69–130.
18. Jakob A. Modelling Solute Transport Using the Double Porous Medium Approach // Modelling in aquatic chemistry. – Paris, France: Organisation for economic co-operation and development (OECD). Nuclear Energy Agency, 1997. – P. 525–576.
19. Solubility, Mobility, and Bioaccumulation of Trace Elements: Abiotic Processes in the Rhizosphere / B. Robinson, N. Bolan, S. Mahimairaja, B. Clothier // Trace elements in the environment: biogeochemistry, biotechnology, and bioremediation / Ed. by M.N.V. Prasad, Ravi Naidu, Kenneth S. Sajwan. – New York, USA: Taylor & Francis Group, 2006. – P. 97–110.
20. Савичев О.Г., Нгуен В.Л. О методике определения фоновых и аномальных значений гидрохимических показателей // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 9. – С. 133–142.
21. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. – М.: Недра, 1983. – 228 с.
22. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. P. I – A discussion of principles // Journal of Hydrology. – 1970. – № 10 (3). – P. 282–290.
23. Карапушев А.В. Теория и методы расчета речных наносов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1977. – 272 с.
24. Drever J.I. The geochemistry of natural waters. – Englewood Cliffs: Prentice-Hall, Inc., 1982. – 440 p.
25. Лисицын А.П. Маргинальный фильтр океанов // Океанология. – 1994. – Т. 34. – № 5. – С. 735–747.
26. Ephraim J.H., Allard B. Metal Ion Binding by Humic Substances // Modelling in Aquatic Chemistry / Eds. I. Grenthe, I. Puigdomenech. – Paris, France: OECD, Nuclear Energy Agency, 1997. – P. 207–244.
27. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. – М.: Наука, 2004. – 677 с.
28. Савенко А.В. Экспериментальное моделирование иммобилизации тяжелых металлов на карбонатном сорбционно-осадительном геохимическом барьере // Геохимия. – 2016. – № 8. – С. 748–760. DOI: 10.7868/S0016752516060066.
29. Савенко А.В. Комплексообразовательно-осадительные геохимические барьеры // Доклады Академии наук. – 2017. – Т. 472. – № 5. – С. 572–575. DOI: 10.7868/S086956521705022X.
30. Numerical simulations with the P-Hydroslag model to predict phosphorus removal by steel slag filters / D. Claveau-Mallet,

- B. Courcelles, P. Pasquier, Y. Comeau // Water Research. – 2017. – V. 126. – P. 421–432. DOI: 10.1016/j.watres.2017.09.032.
31. Evaluating solubility of Zn, Pb, Cu and Cd in pyrite cinder using leaching tests and geochemical modelling / Ch. Tiberg, D. Bendz, G. Theorin, D.B. Kleja // Applied Geochemistry. – 2017. – V. 85. – P. 106–117. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2017.09.007.
32. Coupled modeling of biospheric and chemical weathering processes at the continental scale / C. Roelandt, Y. Goddérus, M.-P. Bonnet, F. Sondag // Global Biogeochemical Cycles. – 2010. – V. 24. – № 2. – P. 6357–6374. DOI: 10.1029/2008GB003420.
33. Савенко В.С. Полуэмпирическая математическая модель вторичного загрязнения водоемов растворенными формами железа и марганца // Водные ресурсы. – 2016. – Т. 43. – № 6. – С. 608–619. DOI: 10.7868/S0321059616060067.
34. Савенко А.В., Савенко В.С. Растворение алюмосиликатов в воде: эффект второй фазы // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: материалы третьей Все-рос. конф. с междунар. участием / Отв. ред. Л.В. Замана, С.Л. Шварцев. – Чита, 20–25 августа 2018 г. – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2018. – С. 161–164. DOI: 10.31554/978-5-7925-0536-0-2018-161-164.
35. White Ar.F. Chemical weathering rates of silicate minerals in soils // Reviews in Mineralogy. Chemical Weathering Rates of Silicate Minerals. – 1995. – V. 31. – P. 405–462.
36. Савенко А.В., Савенко В.С. Поглощенный комплекс твердых веществ речного стока и его роль в геохимическом балансе океана // Литология и полезные ископаемые. – 2016. – № 1. – С. 16–41. DOI: 10.7868/S0024497X16010055.
37. Pokrovsky O.S., Karlsson J., Giesle R. Freeze-thaw cycles of Arctic thaw ponds remove colloidal metals and generate low-molecu-lar-weight organic matter // Biogeochemistry. – 2018. – V. 137. – P. 321–336. DOI: 10.1007/s10533-018-0421-6.
38. Improved method for hydrochemical exploration of mineral resources / Nguyen Van Luyen, O.G. Savichev, V.A. Domarenko, Quach Duc Tin // Vietnam Journal of Earth Sciences. – 2017. – № 39 (2). – P. 167–180. DOI: 10.15625/0866-7187/39/2/9703.
39. Frye E., Bao Chen, Li Li, and Blumsack S. Environmental Controls of Cadmium Desorption during CO₂ Leakage // Environmental Science & Technology. – 2012. – V. 46. – P. 4388–4395. DOI: 10.1021/es3005199.
40. Нгуен Ван Луен. Эколо-геохимическое состояние подземных и речных вод, донных отложений водотоков в северной части Вьетнама (на примере уезда Чодонь, провинция Баккан): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2017. – 22 с.
41. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода – порода: в 5 т. Т. 2. Система вода–порода в условиях зоны гипергенеза / С.Л. Шварцев, Б.Н. Рыженко, В.А. Алексеев, Е.М. Дутова, И.А. Кондратьева, Ю.Г. Копылова, О.Е. Лепокупрова / отв. ред. Б.Н. Рыженко. – Новосибирск: СО РАН, 2007. – 389 с.
42. Ferrimagnetic iron sulfide formation and methane venting across the paleocene-eocene thermal maximum in shallow marine sediments, ancient West Siberian sea / M. Rudmin, A. Mazurov, O. Savinova, A. Ruban, R. Kashapov, A.P. Roberts, C.-S. Horng, M. Veklich // Geochimica, Geophysica, Geosystems. – 2018. – V. 19. – № 1. – P. 21–42. DOI: 10.1002/2017GC007208.

Поступила 19.02.2019 г.

Информация об авторах

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

UDC 556.531.4:550.84.094

RESEARCH OF INTERRELATIONS BETWEEN CHEMICAL COMPOSITION OF WATERS AND BOTTOM SEDIMENTS OF SIBERIAN RIVERS

Oleg G. Savichev,

OSavichev@mail.ru

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

Relevance. Understanding of the mechanism and quantitative estimation of interaction between river waters and bottom sediments substance is a methodological basis of water restoration planning, ecological monitoring and ores hydrogeochemical searches.

The aim of the research is the quantitative description of interrelation between the chemical composition of river waters and bottom sediments.

Methods: statistical methods, mathematical modelling of hydrogeochemical processes.

Results and conclusions. The author has considered the mathematical model of Fe, Cu, Pb, Zn, As interrelations in waters and bottom sediments of some Siberian rivers (the Omurnaya, Ilbokich, Botkitch, Top Nemba, Bottom Nemba, Inganba and Aktru rivers; the Omurnaya river in river system Omurnaya–Kirgizka–Tom–Ob rivers; the Ilbokich, Botkitch, Top Nemba, Bottom Nemba, Inganba rivers are tributaries of the Chadobets river, system Chadobets–Angara–Yenisei rivers; the Aktru river in system Aktru–Chuya–Katun–Ob rivers). The algorithm of model parameters definition including the regression analysis and optimization methods is proposed. The relations between a chemical composition of river waters and bottom sediments are not linear and depend on absolute and relative characteristics of water exchange intensity, basin marshiness and pH of river waters. The absolute and relative increment of concentration in river waters is usually less than a corresponding increment of concentration in bottom sediments. At the same time, the observed high concentration of Fe and the raised contents of some microelements can be related not only to the natural geochemical anomalies in bottom sediments or water pollution, but also to certain combinations of environmental conditions, for example, to the minimal difference between maxima possible and actual sorption in bottom sediments.

Key words:

River bottom sediments, river waters, chemical composition, mathematical model, taiga zone of Siberia.

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

REFERENCES

1. Meybeck M. Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads. *American Journal of Science*, 1987, vol. 287, pp. 401–428.
2. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh Groundwater in the Main Landscape Zones of the Earth. *Geochemistry International*, 2008, vol. 46, no. 13, pp. 1285–1398.
3. Polikarpochkin V.V. *Vtorichnye oreoly i potoki rasseyaniya* [Secondary halos and scattering flows]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1976. 407 p.
4. Yanin E.P. *Tekhnogennye rechnye ily (usloviya formirovaniya, veshchestvenny sostav, geokhimicheskie osobennosti)* [Technogenic river silts (formation conditions, material composition, geochemical features)]. Moscow, ARSO Publ., 2018. 415 p.
5. Domarenko V.A. *Ratsionalnaya metodika poiskov i geologo-ekonomicheskoy otsenki mestorozhdeniy rud redkih i radioaktivnykh elementov. Ch. 1. Prognozirovaniye, poiski i otsenka* [Rational methodology for prospecting and geological and economic assessment of ore deposits of rare and radioactive elements. P. 1. Forecasting, searches and evaluation]. Tomsk, TPU Publ. house, 2012. 167 p.
6. Loucks D.P., Van Beek E. *Water resources systems planning and management. An Introduction to Methods, Models and Applications*. Turin, UNESCO Publishing, printed by Ages Arti Grafiche, 2005. 679 p.
7. Benedini M., Tsakiris G. *Water Quality Modelling for Rivers and Streams*. Dordrecht, Springer, 2013. 288 p.
8. *Metodika razrabotki normativov dopustimykh sbrosov veshchestva i mikroorganizmov v vodnyye ob'yekty dlya vodopolzovatelyey* [Methodology for developing standards for permissible discharges of substances and microorganisms into water bodies for water users]. 31.07.2018. № 342. Moscow, Ministry of Nature Resources of Russia, 2018. 35 p.
9. Smyslov A.A., Mezhelovskiy N.V., Morozov A.F., Baskov E.A., Burde A.I., Ilin K.B., Kozlov A.V., Kulachkov L.V., Litvinenko V.S., Lir Yu.V., Rundkvist D.V., Savina I.G., Sendek S.V., Tikhomirov L.I., Kharlamov M.G. *Nedra Rossii. V 2 t. T. 1. Poleznye iskopayemye* [The bowels of Russia. In 2 vol. Vol. 1. Minerals]. Eds. N.V. Mezhelovsky, A.A. Smyslov. St-Petersburg, Moscow, Mining Institute, Center for geol. Cartography Publ., 2001. 547 p.
10. Savichev O.G., Domarenko V.A., Peregudina E.V., Lepokurova O.E. Transformation of mineral composition of river sediments from sources to mouth of rivers. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 7, pp. 43–56. In Rus.
11. Savichev O.G., Kopylova Yu.G., Khvashchevskaya A.A. Ecological and geochemical state of the environment in Northern Angara (Eastern Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 316, no. 1, pp. 129–136.
12. Rikhvanov L.P., Kropanin S.S., Babenko S.A., Solovyev A.I., Sovetov V.M., Usova T.Yu., Polyakova M.A. *Tsirkon-ilmenitovye rossypnye mestorozhdeniya kak potentsialny istochnik razvitiya Zapadno-Sibirskogo regiona* [Zirkon-ilmenite placer deposits as a potential source of development of the West Siberian region]. Eds. E.N. Tribunsky, M.S. Parovinchak. Kemerovo, Sars LLC Publ., 2001. 214 p.
13. Gusev A.I., Korobeynikov A.F., Pshenichkin A.Ya., Domarenko V.A. Magmo-ore-metasomatic system of Akturu in the Gorny Altai. *Successes of modern natural science*, 2014, no. 7, pp. 75–79. In Rus.
14. Nikonorov A.M., Bryzgalo V.A., Reshetnyak O.S., Kondakova M.Yu. Transport of pollutants along the major rivers of the European North and Siberia. *Water resources*, 2015, vol. 42, no. 3, pp. 279–287. DOI: 10.7868/S0321059615010101. In Rus.
15. Moiseyenko T.I. The evolution of biogeochemical cycles in modern conditions of anthropogenic loads: limits of impacts. *Geochemistry*,

- 2017, no. 10, pp. 841–862. DOI: 10.7868/S0016752517100089. In Rus.
16. *Vodnyy kadastr Rossiyskoy federatsii. Resursy poverkhnostnykh i podzemnykh vod, ikh ispolzovaniye i kachestvo. 2017 god* [Water cadastre of the Russian Federation. Surface and groundwater resources, their use and quality. 2017]. St.-Peteburg, Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation, Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, Federal Agency for Water Resources, Federal Agency for Subsoil Use, 2018. 153 p.
17. Grenthe I., Hummel W., Puigdomenech I. Chemical Background for the Modelling of Reactions in Aqueous systems. *Modelling in aquatic chemistry*. Eds. I. Grenthe, I. Puigdomenech. Paris, Nuclear energy agency Publ., 1997. pp. 69–130.
18. Jakob A. Modelling Solute Transport Using the Double Porous Medium Approach. *Modelling in aquatic chemistry*. Eds. I. Grenthe, I. Puigdomenech. Paris, France, Nuclear Energy Agency Publ., 1997. pp. 525–576.
19. Robinson B., Bolan N., Mahimairaja S., Clothier B. Solubility, Mobility, and Bioaccumulation of Trace Elements: Abiotic Processes in the Rhizosphere. *Trace elements in the environment: biogeochemistry, biotechnology, and bioremediation*. Eds. M.N.V. Prasad, Ravi Naidu, Kenneth S. Sajwan. New York, USA, Taylor & Francis Group Publ., 2006. pp. 97–110.
20. Savichev O.G., Nguen V.L. The technique for determining background and extreme values of hydrogeochemical parameters. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 9, pp. 133–142. In Rus.
21. *Instruktsiya po geokhimicheskim metodam poiskov rudnykh mestorozhdeniy* [The instruction on geochemical methods of searching ore deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1983. 228 p.
22. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. P. I – A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 1970, no. 10 (3), pp. 282–290.
23. Karaushev A.V. *Teoriya i metody rascheta rechnykh nanosov* [Theory and methods of calculation of river sediments]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1977. 272 p.
24. Drever J.I. *The geochemistry of natural waters*. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, Inc., 1982. 440 p.
25. Lisitsyn A.P. Marginalny filtr okeanov [Marginal oceans filter]. *Okeanologiya*, 1994, vol. 34, no. 5, pp. 735–747.
26. Ephraim J.H., Allard B. Metal Ion Binding by Humic Substances. *Modelling in Aquatic Chemistry*. Eds. I. Grenthe, I. Puigdomenech. Paris, France, Nuclear Energy Agency, 1997. pp. 207–244.
27. Kraynov S.R., Ryzhenko B.N., Shvets V.M. *Geokhimiya podzemnykh vod: teoreticheskie, prikladnye i ekologicheskie aspekty* [Geochemistry of ground waters: theoretical, applied and environmental aspects]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 677 p.
28. Savenko A.V. Experimental modeling of heavy metal immobilization on carbonate sorption-precipitation geochemical barrier. *Geochemistry*, 2016, no. 8, pp. 748–760. DOI: 10.7868/S0016752516060066. In Rus.
29. Savenko A.V. Complex-precipitation geochemical barriers. *Reports of the Academy of Sciences*, 2017, vol. 472, no. 5, pp. 572–575. DOI: 10.7868/S086956521705022X. In Rus.
30. Claveau-Mallet D., Courcelles B., Pasquier P., Comeau Y. Numerical simulations with the P-Hydroslag model to predict phosphorus removal by steel slag filters. *Water Research*, 2017, vol. 126, pp. 421–432. DOI: 10.1016/j.watres.2017.09.032.
31. Tiberg Ch., Bendz D., Theorin G., Kleja D.B. Evaluating solubility of Zn, Pb, Cu and Cd in pyrite cinder using leaching tests and geochemical modelling. *Applied Geochemistry*, 2017, vol. 85, pp. 106–117. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2017.09.007.
32. Roelandt C., Goddérus Y., Bonnet M.-P., Sondag F. Coupled modeling of biospheric and chemical weathering processes at the continental scale. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010, vol. 24, no. 2, pp. 6357–6374. DOI: 10.1029/2008GB003420.
33. Savenko V.S. Semi-empirical mathematical model of secondary pollution of water bodies with dissolved forms of iron and manganese. *Water resources*, 2016, vol. 43, no. 6, pp. 608–619. DOI: 10.7868/S0321059616060067. In Rus.
34. Savenko A.V., Savenko V.S. Rastvorenie aljumosilikatov v vode: effekt vtoroy fazy [Dissolution of aluminosilicates in water: the effect of the second phase]. *Geologicheskaya evolyutsiya vzaimodeystviya vody s gornymi porodami: materialy tretyey Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem* [Geological evolution of the interaction of water with rocks. Proceedings of the Third All-Russian Scientific Conference with international participation]. Eds. L.V. Zamana, S.L. Shvartsev. Ulan-Ude, BNTS SB RAS Publ. house, 2018. pp. 161–164. DOI: 10.31554/978-5-7925-0536-0-2018-161–164.
35. White Ar.F. Chemical weathering rates of silicate minerals in soils. *Reviews in Mineralogy. Chemical Weathering Rates of Silicate Minerals*. Mineralogical Society of America, 1995, vol. 31, pp. 405–462.
36. Savenko A.V., Savenko V.S. Absorbed complex of river suspended substances and its role in the geochemical balance of the ocean. *Lithology and minerals*, 2016, no. 1, pp. 16–41. DOI: 10.7868/S0024497X16010055. In Rus.
37. Pokrovsky O.S., Karlsson J., Giesle R. Freeze-thaw cycles of Arctic thaw ponds remove colloidal metals and generate low-molecular-weight organic matter. *Biogeochemistry*, 2018, vol. 137, pp. 321–336. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10533-018-0421-6>.
38. Nguyen Van Luyen, Savichev O.G., Domarenko V.A., Quach Duc Tin. Improved method for hydrochemical exploration of mineral resources. *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 2017, no. 39 (2), pp. 167–180. DOI: 10.15625/0866-7187/39/2/9703.
39. Frye E., Bao Chen, Li Li, and Blumsack S. Environmental Controls of Cadmium Desorption during CO₂ Leakage. *Environmental Science & Technology*, 2012, vol. 46, pp. 4388–4395. dx.doi.org/10.1021/es3005199.
40. Nguen Van Luen. *Ekologo-geokhimicheskoe sostoyanie podzemnykh i rechnykh vod, donnykh otlozheniy vodotokov v severnoy chasti Vietnam (na primere uezda Chodon, provintsiya Bakkhan)*. Aftoreferat Dis. Kand. nauk [Ecological and geochemical condition of ground and river waters, river sediments of the minor rivers in the Northern part of Vietnam (by the example of Chodon district, Baccan province). Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2017. 22 p.
41. Shvartsev S.L., Ryzhenko B.N., Alekseev V.A., Dutova E.M., Kondratieva I.A., Kopylova Yu.G., Lepokurova O.E. *Geologicheskaya evolyutsiya i samoorganizatsiya sistemy voda-poroda* [Geological evolution and self-organizing of water-rock system. V. 2. Water-rock system in conditions of a zone of active water exchange]. Ed. by B.N. Ryzhenko. Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Science Publ. house, 2007. 389 p.
42. Rudmin M., Mazurov A., Savinova O., Ruban A., Kashapov R., Roberts A.P., Hornig C.-S., Veklich M. Ferrimagnetic iron sulfide formation and methane venting across the paleocene-eocene thermal maximum in shallow marine sediments, ancient West Siberian sea. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2018, vol. 19, no. 1, pp. 21–42. DOI: 10.1002/2017GC007208.

Received: 19 February 2019.

Information about three authors**Oleg G. Savichev**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 621.643.001:536.2

КОНДУКТИВНЫЙ ТЕПЛОПЕРЕНОС В СЛОЕ ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Половников Вячеслав Юрьевич,
polov@tpu.ru

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

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки новых энергосберегающих технологий для тепловой защиты элементов систем теплоснабжения и иного энергетического оборудования различного назначения. Высокий уровень тепловых потерь в системах теплоснабжения (например, тепловые сети, ТЭС, котельные) и энергетическом оборудовании различного назначения (химические производства, пищевая промышленность и т. д.) и неудовлетворительное состояние их тепловой изоляции обосновывают необходимость разработки новых технологий снижения уровня тепловых потерь в рассматриваемых системах. Уникальные теплофизические характеристики тонкопленочных теплоизоляционных покрытий позволяют использовать их в различных энергетических системах и оборудовании. Несмотря на это, технологии применения тонкопленочных теплоизоляционных покрытий к настоящему моменту времени не получили развития. Это обусловлено рядом причин, основными из которых являются: недостаток знаний о физических свойствах и механизмах процессов тепломассопереноса в тонкопленочных теплоизоляционных покрытиях.

Цель: исследование кондуктивного теплопереноса в слое тонкопленочной тепловой изоляции с учетом разнородности свойств микросфер и связующих веществ.

Объекты: цилиндрические слои тонкопленочного теплоизоляционного покрытия. На внутренней и внешней поверхностях теплоизоляционного покрытия поддерживаются постоянные температуры. Рассматривались два варианта геометрии тонкопленочного теплоизоляционного покрытия: «связующее вещество и полнотельные микросфера» и «связующее вещество и полье микросфера». Исследования проводились для слоя теплоизоляции толщиной 0,33 мм. Температуры на внутренней и внешней поверхностях изоляции принималась в соответствии с экспериментальными данными. Предполагалось, что слой тонкопленочной теплоизоляции на 62 % состоит из микросфер диаметром 50 мкм и на 38 % из связующего вещества. Рассматривались два типа полых микросфер с толщинами стенок: 5 и 2 мкм.

Методы. Экспериментальные исследования проводились с использованием оригинального лабораторного стенда. Решение поставленных задач получено методом конечных элементов. Использовалась аппроксимация Галеркина, неравномерная конечно-элементная сетка. Параметры элементов сетки выбирались из условий сходимости решения. Увеличение числа элементов расчетной сетки проводилось с использованием метода Делоне.

Результаты. Установлено, что средний коэффициент теплопроводности тонкопленочного теплоизоляционного покрытия в диапазоне температур 50–90 °C составляет 0,0574 Вт/(м·К), что существенно отличается от заявленных фирмой-производителем значений. Выявлено влияние на тепловые потери вида связующего вещества и характеристики микросфер (полнотельные или полые), толщины стенки микросферы и газовой фазы, содержащейся в полости микросферы. Для рассматриваемого случая отклонение от экспериментальных данных составило от 9,36 до 91,12 % в зависимости от состава тонкопленочного теплоизоляционного покрытия. Такие отклонения обусловлены резким изменением эффективных теплофизических свойств тепловой изоляции при различных характеристиках компонентов тонкопленочной тепловой изоляции. Анализ результатов численного моделирования позволяет сделать вывод о том, что наиболее вероятный состав тонкопленочной теплоизоляции включает в себя полье микросферы и многокомпонентное связующее вещество.

Ключевые слова:

Тонкопленочная тепловая изоляция, энергосбережение, теплоснабжение, транспортировка и хранение энергии, моделирование

Введение

Разработка новых энергосберегающих технологий для тепловой защиты элементов систем теплоснабжения является одной из актуальнейших в настоящее время при создании энергетического оборудования различного назначения [1–4]. Высокий уровень тепловых потерь [5] в системах теплоснабжения (например, тепловые сети, ТЭС, котельные) и энергетическом оборудовании различного назначения (химические производства, пищевая промышленность и т. д.) и неудовлетворительное состояние их тепловой изоляции обосновывают необходимость разработки новых технологий снижения уровня тепловых потерь в рассматриваемых системах.

В настоящее время появляются принципиально новые материалы, в состав которых входят микросфера и различного рода связующие элементы, так называемые тонкопленочные теплоизоляцион-

ные покрытия, обладающие свойствами красок с теплоизоляционным эффектом. Значения коэффициентов теплопроводности тонкопленочных теплоизоляционных покрытий варьируются в диапазоне от 0,001 до 0,45 Вт/(м·К) [6]. Уникальные теплофизические характеристики тонкопленочных теплоизоляционных покрытий позволяют использовать их в различных энергетических системах и оборудовании. Несмотря на это, технологии применения тонкопленочных теплоизоляционных покрытий к настоящему моменту времени не получили развития. Это обусловлено рядом причин, основными из которых являются: недостаток знаний о физических свойствах и механизмах процессов тепломассопереноса в тонкопленочных теплоизоляционных покрытиях.

Среди научно-исследовательских работ в области технологий применения тонкопленочных те-

плоизоляционных покрытий, опубликованных за последние годы, особо следует выделить публикации о завершенной технологии применения прозрачных тонкопленочных теплоизоляционных покрытий [7–11], а также работы об исследовании теплопроводности одиночных [12] и не упорядоченных засыпок [13] полых микросфер.

Также известно большое количество исследований [14–20], в которых обосновывается целесообразность и эффективность применения тонкопленочных теплоизоляционных покрытий в различных энергетических приложениях и развивается новая технология применения быстромонтируемых термостойких многослойных тонкопленочных теплоизоляционных конструкций с учетом влияния некоторых внешних факторов (влажность, паропроницаемость, морозостойкость и другие).

Анализ современной научной литературы, в частности профильных журналов по энергетике и тепломассообмену, показывает, что проблема моделирования тепломассопереноса в тонкопленочных теплоизоляционных покрытиях не решена мировым сообществом до настоящего времени. Известны лишь одиночные исследования [12, 13] о моделировании теплопереноса в системах, состоящих из микросфер. Данных об особенностях процессов тепломассообмена, влиянии основных значимых факторов и процессов на интенсификацию тепловых потерь, технологиях применения тонкопленочных теплоизоляционных покрытий в условиях реальной эксплуатации в научной литературе не опубликовано.

Целью работы является исследование кондуктивного теплопереноса в слое тонкопленочной тепловой изоляции с учетом разнородности свойств микросфер и связующих веществ.

Экспериментальное исследование

Экспериментальное определение тепловых потерь теплопроводов с применением тонкопленочного теплоизоляционного покрытия

Схематическое изображение лабораторного стенда, имитирующего однотрубный теплопровод, использовавшегося при проведении экспериментальных исследований, приведено на рис. 1. Основные элементы лабораторного стенда: трубчатый термоэлектрический нагреватель (ТЭН) – 1 (диаметр 13 мм, длина 1 м), слой тонкопленочного теплоизоляционного покрытия – 2. На внешних поверхно-

стях ТЭНа и полутолщине слоя изоляции установлены хромелькопелевые термопары – 3. В качестве преобразователя сигнала от термопар использовался измеритель температуры УТК 38Щ4ТП. Термопары использовались для контроля температур поверхности ТЭНа и полутолщины слоя тепловой изоляции, а также индикации установления стационарного режима теплопереноса. Электрические параметры (ток и напряжение) измерялись цифровым мультиметром, а мощность ТЭНа регулировалась лабораторным автотрансформатором. Погрешность измерения температуры составляла 2–3 % и оценивалась по методике [21].

Экспериментальные исследования тепловых потерь теплопровода проводились в следующей последовательности. Первая группа термопар монтировалась на внешнюю поверхность ТЭНа и наносился первый полуслой тепловой изоляции (толщина 0,33 мм). На поверхность первого полуслоя тепловой изоляции симметрично первой группе укладывалась вторая группа термопар. Затем наносился второй слой теплоизоляционного покрытия. В качестве тепловой изоляции использовалось одно из наиболее распространенных в настоящее время тонкопленочных покрытий, бренд которого не раскрывается. Для определения толщины слоя тонкопленочного теплоизоляционного покрытия использовался микрометр типа МК модель 102 (цена деления 0,01, допустимая погрешность $\pm 0,004$, класс точности 2). После подготовки стенда к работе включался электрический нагреватель. Для поддержания на поверхности ТЭНа и полутолщине слоя изоляции постоянных температур по мере установления стационарного режима теплопроводности необходимо было регулировать мощность нагревателя трансформатором.

С целью снижения влияния термопар на искажение температурного поля тонкопленочного теплоизоляционного покрытия термопары первой группы зачеканивались в поверхность ТЭНа, а корольки термопар второй группы выбирались таким образом, чтобы их размеры были минимальными.

Тепловые потери Q определялись с погрешностью 0,5 %, обусловленной характеристиками мультиметра, по формуле:

$$Q = \frac{IU}{L},$$

где L – длина ТЭНа, м; I – ток, А; U – напряжение, В.

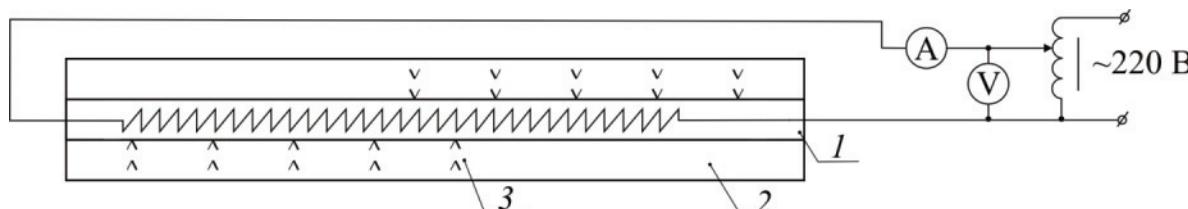


Рис. 1. Схема лабораторного стенда: 1 – ТЭН, 2 – слой тепловой изоляции, 3 – места закладки термопар

Fig. 1. Scheme of laboratory stand: 1 is the tubular thermoelectric heater, 2 is the thermal insulation layer, 3 are the locations of thermocouples

Определение коэффициента теплопроводности тонкопленочной тепловой изоляции

Коэффициент теплопроводности тонкопленочного теплоизоляционного покрытия вычислялся по формуле:

$$\lambda = \frac{Q \ln(d_2 / d_1)}{2\pi L(T_4 - T_3)},$$

где d_2 , d_1 – наружный и внутренний диаметры мест закладки термопар, м; T_4 , T_3 – температуры на внутреннем и наружном диаметрах мест закладки термопар.

При фиксированных значениях температур в местах закладки термопар с целью исключения случайной погрешности эксперименты повторялись пять раз в идентичных условиях.

Результаты экспериментальных исследований

Основные результаты экспериментального исследования тепловых потерь теплопровода, покрытого тонкопленочной тепловой изоляцией, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты экспериментального определения тепловых потерь

Table 1. Results of experimental determination of heat loss

| | | | |
|------------------|--------|--------|--------|
| T_3 , К | 359,49 | 339,59 | 319,77 |
| T_4 , К | 363,15 | 343,15 | 323,15 |
| Q , Вт/м (W/m) | 27,09 | 25,84 | 24,20 |

Анализ результатов экспериментального определения тепловых потерь теплопровода, изолированного тонкопленочной тепловой изоляцией, позволяет сделать ожидаемый вывод об увеличении теплового потока с ростом температуры поверхности теплопровода. При этом перепад температур по полутолщине слоя тонкопленочной изоляции составляет около 4° .

На рис. 2 приведены результаты экспериментального определения коэффициента теплопроводности тонкопленочного теплоизоляционного покрытия при различных значениях температуры поверхности ТЭНа.

Результаты исследования, приведенные на рис. 2, позволяют сделать вывод о том, что теплопроводность тонкопленочного теплоизоляционного покрытия возрастает с увеличением температуры поверхности ТЭНа. Доверительный интервал для всех вариантов экспериментов составляет $\pm 0,0002$ Вт/(м·К). Теплопроводность тонкопленочного теплоизоляционного покрытия в рассматриваемом диапазоне температур изменяется от 0,0565 до 0,0584 Вт/(м·К), что составляет 3,25 %. По этой причине в практических расчетах теплопроводность тонкопленочных теплоизоляционных материалов можно принимать постоянной.

Средний коэффициент теплопроводности тонкопленочного теплоизоляционного покрытия в диапазоне температур 50–90 °C составил 0,0574 Вт/(м·К), что существенно отличается от заявленных фирмой-производителем значений [6].

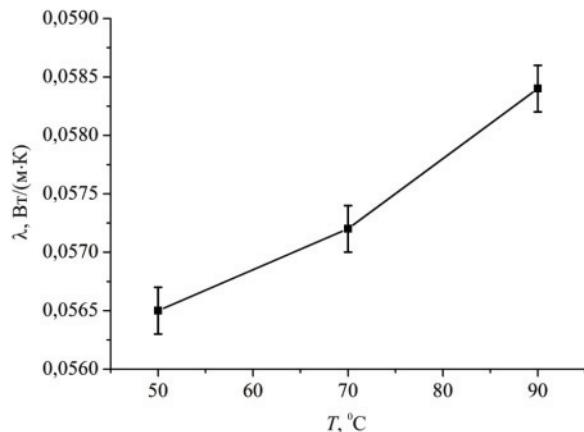


Рис. 2. Зависимость теплопроводности тонкопленочного теплоизоляционного покрытия от температуры

Fig. 2. Dependence of thermal conductivity of thin-film heat-insulating coating on temperature

Из [14–16] известно, что теплопроводность тонкопленочной теплоизоляции составляет 0,028 Вт/(м·К) при температуре 60 °C и 0,036 Вт/(м·К) при температуре 100 °C для покрытий с вакуумированными микросферами и 0,14 и 0,19 Вт/(м·К) для газонаполненных микросфер. Поскольку фактический состав исследуемого материала не известен, провести детализированное сопоставление результатов исследований не представляется возможным. Полученное в настоящей работе значение коэффициента теплопроводности находится в указанном выше диапазоне, что косвенно подтверждает адекватность полученных результатов.

Численное моделирование теплопереноса в тонкопленочных теплоизоляционных покрытиях

Постановка задачи

На рис. 3 приведены схематичные изображения областей решения задач. Рассматривается слой тонкопленочного теплоизоляционного покрытия. Предполагается, что на внутренней и внешней поверхностях изоляционного слоя поддерживаются постоянные температуры.

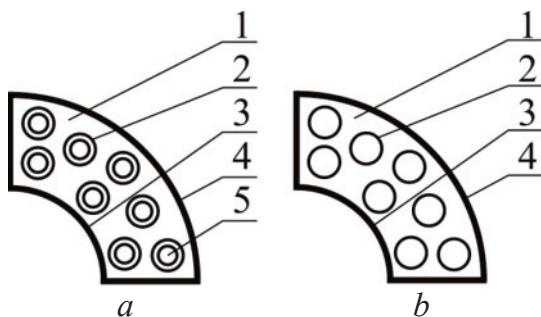


Рис. 3. Схематичное изображение области решения: 1 – связующее вещество; 2 – микросфера; 3 – внутренняя поверхность изоляции; 4 – внешняя поверхность изоляции; 5 – полость микросферы

Fig. 3. Scheme of solution area: 1 is the binder; 2 are the microspheres; 3 is the inner surface of insulation; 4 is the outer surface of insulation; 5 is the microsphere cavity

Рассматривались два варианта геометрии тонкопленочного теплоизоляционного покрытия:

1. Связующее вещество и полнотельные микросфера (рис. 3, а).
2. Связующее вещество и полые микросфера (рис. 3, б).

Основные допущения, принятые при постановке задачи, заключаются в следующем:

1. Теплофизические свойства материалов и веществ имеют известные и постоянные значения. Диапазон изменения параметров, влияющих на теплофизические характеристики, в рассматриваемой задаче невелик [22], следовательно, изменением свойств можно пренебречь.
2. На границах контакта между микросферами и связующим веществом выполняются условия идеального теплового контакта.
3. Не учитывается теплообмен излучением и фазовые переходы на внешней поверхности тонкопленочного теплоизоляционного покрытия.
4. Теплоперенос в рассматриваемых областях решения (рис. 3) реализуется только за счет теплопроводности.
5. Микросфера имеют одинаковые геометрические характеристики, а их размещение в изоляционном слое является упорядоченным.

Математическая модель

Процесс переноса тепла для рассматриваемого случая будет описываться следующими выражениями:

$$\nabla^2 T_1 = 0; \quad (1)$$

$$\nabla^2 T_{2,i} = 0; i=1-n, \quad (2)$$

$$\nabla^2 T_{5,i} = 0; i=1-n. \quad (3)$$

$$T_3 = \text{const}, \quad (4)$$

$$T_4 = \text{const}. \quad (5)$$

$$\lambda_1 \text{grad}(T_1) = \lambda_2 \text{grad}(T_{2,i}); T_1 = T_{2,i}, \quad (6)$$

$$\lambda_2 \text{grad}(T_{2,i}) = \lambda_5 \text{grad}(T_{5,i}); T_{2,i} = T_{5,i}. \quad (7)$$

Обозначения: λ – теплопроводность, Вт/(м·К); T – температура, К; n – количество микросфер, шт; индексы 1–5 – в соответствии с рис. 3.

Метод решения и исходные данные

При решении задачи (1)–(7) использовался метод конечных элементов с аппроксимацией Галеркина [23]. Моделирование проводилось на неравномерной конечно-элементной сетке. Количество элементов выбиралось из условий сходимости решения; сгущение сетки проводилось методом Делоне [23].

Численное моделирование проводилось для слоя теплоизоляции толщиной 0,33 мм. Температура на внутренней и внешней поверхностях изоляции принималась в соответствии с экспериментальными данными (табл. 1). Предполагалось, что слой тонкопленочной теплоизоляции на 62 % состоит из микросфер диаметром 50 мкм и на 38 % из связую-

щего вещества. Рассматривались два типа полых микросфер с толщинами стенок: 5 и 2 мкм. Микросфера по толщине тонкопленочного теплоизоляционного покрытия располагались упорядоченно с «коридорным» вариантом размещения.

Фактический состав тонкопленочных теплоизоляционных материалов является коммерческой тайной и не раскрывается производителями. По этой причине дополнительной задачей в настоящем исследовании являлся параметрический поиск характеристик микросфер и связующих веществ.

В табл. 2 приведены значения [22, 24] теплопроводности (λ), плотности (ρ) и теплоемкости (c) компонентов тонкопленочного теплоизоляционного покрытия, использовавшиеся при проведении исследований тепловых режимов рассматриваемых систем (рис. 3).

Таблица 2. Теплофизические характеристики [22, 24]

Table 2. Thermophysical characteristics [22, 24]

| Характеристика Characteristic | | λ , Вт/(м·К) (W/(m·K)) | ρ , кг/м ³ (kg/m ³) | c , Дж/кг·К (J/(kg·K)) |
|--|--------------------------------------|-----------------------------------|--|-----------------------------|
| Материал микросфер Microsphere material | Стекло C38-1 Glass C38-1 | 0,92 | 3000 | 650 |
| | Стекло C39-1 Glass C39-1 | 1,30 | 2800 | 650 |
| | Стекло C41-1 Glass C41-1 | 0,84 | 3000 | 650 |
| Связующее вещество Binder | Однокомпонентное Single component | 0,175 | 1030 | 840 |
| | Трехкомпонентное Three-component | 0,048 | 1060 | 840 |
| Газовая фаза Gas phase | Воздух/Air | 0,029 | 1,0985 | 1007 |
| | CO ₂ +N ₂ | 0,031 | 1,1 | 1040 |

Результаты численного анализа

В табл. 3–5 приведены величины тепловых потерь теплопровода, покрытого слоем тонкопленочной тепловой изоляции, в зависимости от состава материала (табл. 2), вычисленные в соответствии исходными экспериментальными данными (табл. 1), а также приведено сопоставление результатов численного моделирования и эксперимента. Через знак «/» указаны значения для трех- и однокомпонентного связующего вещества соответственно. Тепловые потери для системы «полнотельные микросфера и связующее вещество» указаны только для однокомпонентного связующего.

Результаты численного моделирования, приведенные в табл. 3–5, позволяют сделать вывод о существенном влиянии состава тонкопленочного теплоизоляционного покрытия на тепловые потери теплопровода.

Сопоставление результатов численного моделирования тепловых потерь теплопровода, изолированного тонкопленочным теплоизоляционным материалом, с результатами экспериментальных исследований свидетельствует об их существенном расхождении (от 9,36 до 91,12 %) в зависимости от состава тонкопленочного теплоизоляционного покрытия.

Таблица 3. Результаты численного моделирования теплопереноса в слое тонкопленочной тепловой изоляции при $T_4=359,49\text{ K}$, $T_3=363,15\text{ K}$

Table 3. Results of numerical simulation of heat transfer in the layer of thin-film thermal insulation at $T_4=359,49\text{ K}$, $T_3=363,15\text{ K}$

| Состав тонкопленочного теплоизоляционного покрытия Composition of the thin-film insulation coating | | Q, Вт/м (W/m) | Расхождение с экспериментальными данными, % Discrepancy with experimental data, % |
|---|---------------------------------|------------------|--|
| Полнотелые микросфераы Full-bodied microspheres | Стекло C38-1 Glass C38-1 | 178,56 | 88,52 |
| | Стекло C39-1 Glass C39-1 | 206,24 | 87,47 |
| | Стекло C41-1 Glass C41-1 | 86,24/171,36 | 68,55/84,92 |
| Полые микросфераы с толщиной стенки 5 мкм Hollow microspheres with a wall thickness of 5 microns | Воздух/Air | 52,08/75,36 | 47,91/65,7 |
| | CO ₂ +N ₂ | 54,12/74,92 | 49,83/65,51 |
| Полые микросфераы с толщиной стенки 2 мкм Hollow microspheres with a wall thickness of 2 microns | Воздух/Air | 29,89/47,33 | 9,36/45,4 |
| | CO ₂ +N ₂ | 33,08/46,60 | 17,9/44,31 |

На рис. 4, 5, в качестве примеров, представлены фрагменты типичных температурных полей в рассматриваемых областях решения.

Распределения температур, приведенные на рис. 4, 5, демонстрируют деформацию температурного поля, вызванную разнородностью теплофизи-

ческих характеристик тонкопленочных теплоизоляционных покрытий в зависимости от композиционного состава материала. На рис. 4, 5 отчетливо видны изменения в направлениях изотермических линий, что соответствует представлениям о процессах теплопроводности в твердых телах.

Таблица 4. Результаты численного моделирования теплопереноса в слое тонкопленочной тепловой изоляции при $T_4=339,59\text{ K}$, $T_3=343,15\text{ K}$

Table 4. Results of numerical simulation of heat transfer in the layer of thin-film thermal insulation at $T_4=339,59\text{ K}$, $T_3=343,15\text{ K}$

| Состав тонкопленочного теплоизоляционного покрытия Composition of the thin-film insulation coating | | Q, Вт/м (W/m) | Расхождение с экспериментальными данными, % Discrepancy with experimental data, % |
|---|----------------------------------|------------------|--|
| Полнотелые микросфераы Full-bodied microspheres | Стекло C38-1 Glass C38-1 | 198,72 | 86,37 |
| | Стекло C39-1 Glass C39-1 | 229,44 | 88,2 |
| | Стекло C41-1 Glass C41-1 | 83,88/190,64 | 68,86/85,79 |
| Полые микросфераы с толщиной стенки 5 мкм Hollow microspheres with a wall thickness of 5 microns | Воздух Air | 50,66/83,84 | 48,32/67,69 |
| | CO ₂ + N ₂ | 53,78/83,2 | 48,14/67,44 |
| Полые микросфераы с толщиной стенки 2 мкм Hollow microspheres with a wall thickness of 2 microns | Воздух Air | 28,78/52,64 | 10,2/48,54 |
| | CO ₂ + N ₂ | 33,08/46,60 | 17,9/44,31 |

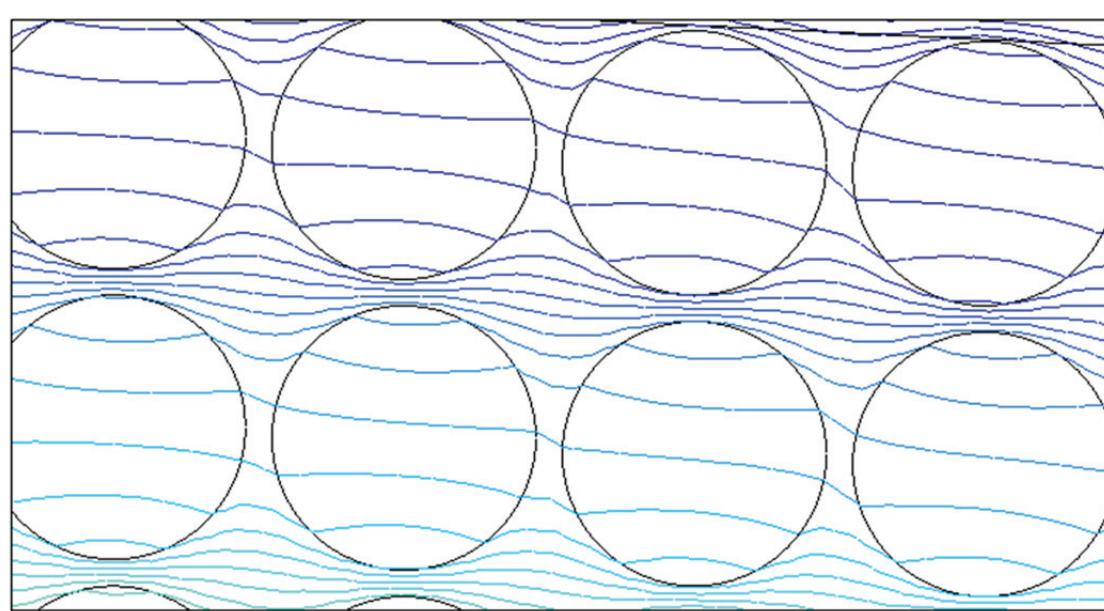


Рис. 4. Фрагмент распределения температур в слое тонкопленочной теплоизоляции (полнотелые микросфераы и однокомпонентное связующее вещество)

Fig. 4. Fragment of temperature distribution in the thin-film thermal insulation layer (solid microspheres and one-component binder)

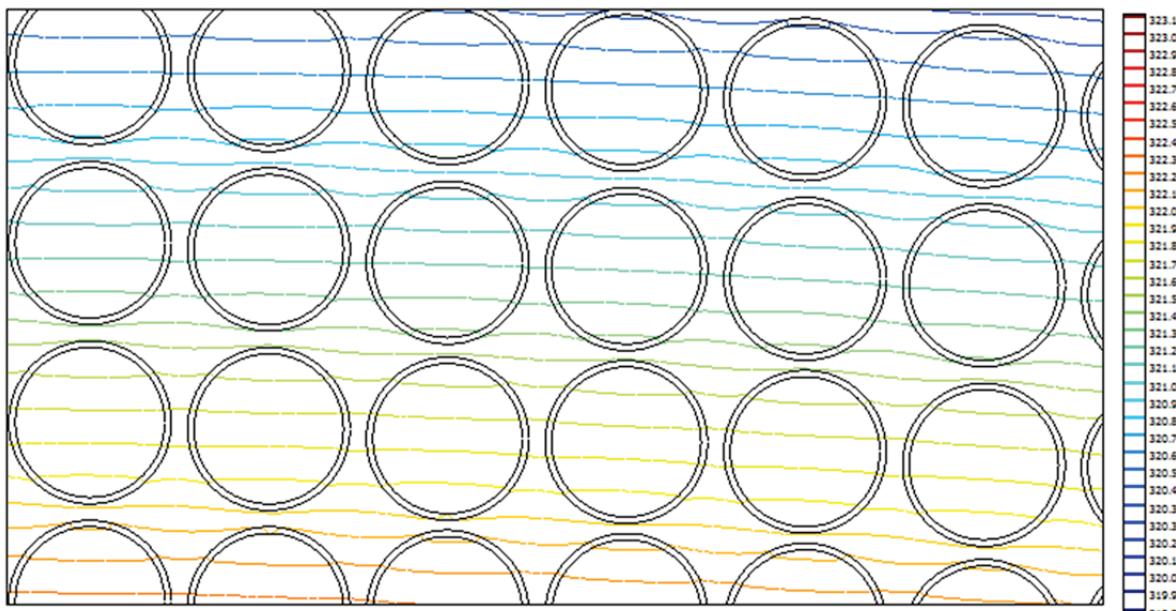


Рис. 5. Фрагмент распределения температур в слое тонкопленочной теплоизоляции (полые микросфера с толщиной стенки 5 мкм и однокомпонентное связующее вещество)

Fig. 5. Fragment of temperature distribution in the layer of thin-film thermal insulation (hollow microspheres with a wall thickness of 5 micrometers and a single-component binder)

Таблица 5. Результаты численного моделирования теплопереноса в слое тонкопленочной тепловой изоляции при $T_4=319,77\text{ K}$, $T_3=323,15\text{ K}$

Table 5. Results of numerical simulation of heat transfer in the layer of thin-film thermal insulation at $T_4=319,77\text{ K}$, $T_3=323,15\text{ K}$

| Состав тонкопленочного теплоизоляционного покрытия Composition of the thin-film insulation coating | | $Q, \text{Вт}/\text{м}$ (W/m) | Расхождение с экспериментальными данными, % Discrepancy with experimental data, % |
|---|-----------------------------|--|--|
| Полнотелые микросфераы Full-bodied microspheres | Стекло C38-1 Glass C38-1 | 316 | 92,34 |
| | Стекло C39-1 Glass C39-1 | 364,8 | 93,37 |
| | Стекло C41-1 Glass C41-1 | 79,63/272,8 | 69,36/91,12 |
| Полые микросфераы с толщиной стенки 5 мкм Hollow microspheres with a wall thickness of 5 microns | Воздух Air | 48,03/120 | 49,59/79,84 |
| | $\text{CO}_2 + \text{N}_2$ | 51,99/119,2 | 49,66/79,7 |
| Полые микросфераы с толщиной стенки 2 мкм Hollow microspheres with a wall thickness of 2 microns | Воздух Air | 28,12/75,2 | 13,57/67,8 |
| | $\text{CO}_2 + \text{N}_2$ | 30,56/74,08 | 20,81/67,34 |

Заключение

Проведено исследование теплопереноса в слое тонкопленочной тепловой изоляции с учетом разнородности свойств микросфер и связующих веществ.

Установлено, что средний коэффициент теплопроводности тонкопленочного теплоизоляционного покрытия в диапазоне температур 50–90 °C составляет 0,0574 Вт/(м·К), что существенно отличается от заявленных фирмой-производителем значений.

Выявлено влияние на тепловые потери вида связующего вещества и характеристик микросфер (полнотелые или полые), толщины стенки микросферы и газовой фазы, содержащейся в полости микросферы. Для рассматриваемого случая отклонение от экспериментальных данных составило от 9,36 до 91,12 % в зависимости от состава тонкопленочного теплоизоляционного покрытия. Такие отклонения обусловлены резким изменением эффективных теплофизических свойств тепловой изоляции при различных характеристиках компонентов тонкопленочной тепловой изоляции.

Показано, что применение полых микросфер для тонкопленочной теплоизоляции по сравнению с полнотелыми микросферами приводит к более существенному снижению тепловых потоков. Это обстоятельство объясняется, прежде всего, значениями теплофизических характеристик связующего вещества и газа-наполнителя полых микросфер.

Анализ результатов численного моделирования позволяет сделать вывод о том, что наиболее вероятный состав тонкопленочной теплоизоляции включает в себя полые микросферы и многокомпонентное связующее вещество.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-48-700008-p_a.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Optimization modeling for smart operation of multi-source district heating with distributed variable-speed pumps / H. Wang, H. Wang, Zh. Haijian, T. Zhu // Energy. – 2017. – V. 138. – P. 1247–1262.
2. Duquette J., Rowe A., Wild P. Thermal performance of a steady state physical pipe model for simulating district heating grids with variable flow // Applied Energy. – 2016. – V. 178. – P. 383–393.
3. Thermal transient prediction of district heating pipeline: Optimal selection of the time and spatial steps for fast and accurate calculation / Y. Wang, S. Youa, H. Zhang, X. Zhenga, W. Zhenga, Q. Miaoa, G. Luc // Applied Energy. – 2017. – V. 206. – P. 900–910.
4. Ertürk M. Optimum insulation thicknesses of pipes with respect to different insulation materials, fuels and climate zones in Turkey // Energy. – 2016. – V. 113. – P. 991–1003.
5. Половников В.Ю. Тепловые режимы и тепловые потери подземных трубопроводов с учетом реальных условий теплообмена на внешнем контуре взаимодействия // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 1. – С. 124–131.
6. Об эффективности применения тонкопленочных теплоизоляционных покрытий / В.А. Рыженков, Н.А. Логинова, А.И. Бычков, А.Ф. Прищепов // Научное обозрение. – 2013. – № 5. – С. 71–75.
7. Chou H.M., Chen C.R., Wu T.N. New transparent thin films for thermal insulation // Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers. Transactions of the Chinese Institute of Engineers. Series C. – 2015. – V. 36 (1). – P. 85–90.
8. The evaluation of energy saving using ultrathin heat insulation in railway electrification substation / H. Kim, J. Jang, S. Shin, Y. Park, S. Kim, H.R. Kim, B. Hyun, J. Kim // Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers. – 2015. – V. 64 (1). – P. 171–175.
9. Qi Y., Yin X., Zhang J. Transparent and heat-insulation plasticized polyvinyl chloride (PVC) thin film with solar spectrally selective property // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2016. – V. 151. – P. 30–35.
10. Patankar S.N., Kranov Y.A. Hollow glass microsphere HDPE composites for low energy sustainability // Materials Science and Engineering. – 2010. – V. 527. – P. 1361–1366.
11. Effect of hollow glass microsphere thin film on heat-insulation performance of building envelope / H. Wang, H.J. Fang, Q.D. Lan, S. He, C. Jiang // Shanghai Jiaotong Daxue Xuebao/Journal of Shanghai Jiaotong University. – 2014. – V. 48 (9). – P. 1341–1345.
12. Thermal conductivity of powder silica hollow spheres / Y. Liao, X. Wu, H. Liua, Y. Chen // Thermochimica Acta. – 2011. – V. 526. – P. 178–184.
13. Numerical analyses of the thermal conductivity of random hollow sphere structures / T. Fiedler, R. Löffler, T. Bernthal, R. Winkler, I.V. Belova, G.E. Murch, A. Öchsner // Materials Letters. – 2009. – V. 63. – № 13–14. – P. 1125–1127.
14. О возможности использования микросфер с модифицированной поверхностью в составе тонкопленочных теплоизоляционных покрытий / В.А. Рыженков, Н.А. Логинова, А.И. Бычков, А.Ф. Прищепов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2013. – № 4. – С. 21–23.
15. Рыженков В.А., Логинова Н.А., Прищепов А.Ф. Эффективность тонкопленочных теплоизоляционных покрытий при использовании микросфер для систем теплоснабжения // Надежность и безопасность энергетики. – 2012. – № 17. – С. 61–63.
16. Испытания тонкопленочных многослойных теплоизоляционных покрытий на морозостойкость / Н.А. Логинова, А.В. Рыженков, А.Ф. Прищепов, Е.Е. Лапин, А.Ю. Плещева // Надежность и безопасность энергетики. – 2014. – № 2. – С. 23–25.
17. Исследование влияния влаги на теплоизоляционные свойства полых микросфер / В.В. Беккер, С.В. Григорьев, Н.А. Логинова, С.И. Погорелов, А.В. Рыженков, А.В. Аникеев // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 12. – С. 136–137.
18. О результатах исследований паропроницаемости новых видов теплоизоляционных материалов / Е.В. Беляева, Н.А. Логинова, Е.Е. Лапин, С.И. Погорелов, А.В. Рыженков // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 8. – С. 114–116.
19. Выбор и оптимизация соотношения компонентов для разработки быстромонтируемых термостойких теплоизоляционных конструкций / Н.А. Логинова, С.В. Григорьев, Е.Е. Лапин, С.И. Погорелов, А.В. Рыженков // Теплоэнергетика. – 2016. – № 5. – С. 51–55.
20. Изучение влияния модификации стеклянных микросфер на свойства синтактических пен на основе олигометилсилоксана / В.С. Осипчик, Н.В. Костромина, Ю.В. Олихова, В.Н. Ивашикина, Е.В. Беляева, Н.А. Логинова, А.В. Рыженков, Е.Е. Лапин // Пластические массы. – 2015. – № 5–6. – С. 36–39.
21. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоиздат, 1991. – 304 с.
22. Гува А.Я. Краткий теплофизический справочник. – Новосибирск: Сибвузиздат, 2002. – 300 с.
23. Garcia A.L. Numerical methods for physics. – San Jose CA: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2015. – 432 с.
24. Бабичев Н.А. Физические величины: справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

Поступила 28.11.2018 г.

Информация об авторах

Половников В.Ю., кандидат технических наук, доцент Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDK 621.643.001:536.2

CONDUCTIVE HEAT TRANSFER IN LAYER OF THIN-FILM THERMAL INSULATION

Viacheslav Yu. Polovnikov,

polov@tpu.ru

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

The relevance of the study is caused by the need to create new energy-saving technologies for thermal protection of elements of heat supply systems and other energy equipment for various purposes. The high level of heat losses in heat supply systems (for example, heat networks, thermal power plants, boiler) and power equipment for various purposes (chemical production, food industry, etc.) and the unsatisfactory condition of their thermal insulation justify the need to develop new technologies to reduce heat losses in the systems in question. The unique thermophysical characteristics of thin-film thermal insulation coatings allow their use in various energy systems and equipment. Despite this, the technology of using thin-film heat-insulating coatings has not been developed. This is due to several reasons, the main of which are: lack of knowledge about the physical properties and mechanisms of heat and mass transfer processes in thin-film heat-insulating coatings.

The main aim of the research is a study of conductive heat transfer in the layer of thin-film thermal insulation taking into account the heterogeneity of the properties of microspheres and binders.

Objects of the research are cylindrical layers of thin-film thermal insulation. It is assumed that constant temperatures are maintained on the inner and outer surfaces. Two variants of the geometry of the thin-film heat-insulating coating were considered: «binder and full-bodied microspheres» and «binder and hollow microspheres». The studies were conducted for 0,33 mm insulation layer. The temperatures on the inner and outer surfaces of the insulation were taken in accordance with the experimental data. It was assumed that 62 % of the thin-film thermal insulation layer consists of microspheres with a diameter of 50 micrometers and 38 % of a binder. Two types of hollow microspheres with wall thicknesses were considered: 5 and 2 micrometers.

Methods. The solution of the problems posed is obtained by the finite element method. Galerkin approximation, non-uniform finite element mesh were used. The parameters of the grid elements were chosen from the conditions of convergence of the solution. An increase in the number of elements of the computational grid was carried out using the Delaunay method. Experimental studies were carried out with the original laboratory stand.

Results. It was established that the average thermal conductivity coefficient of a thin-film heat-insulating coating in the temperature range of 50–90 °C is 0,0574 W/(m·K), which differs significantly from the value stated by the manufacturer. The effect on the thermal losses of the type of binder and the characteristics of the microspheres (hollow or full-bodied), the wall thickness of the microsphere and the gas phase contained in the cavity of the microsphere is revealed. For the case under consideration, the deviation from the experimental data ranged from 9,36 to 91,12 %, depending on the composition of the thin-film thermal insulation coating. This is due to a sharp change in the effective thermophysical properties of thermal insulation with different characteristics of the components of thin-film thermal insulation. Analysis of the results of numerical simulation allows us to conclude that the most likely composition of thin-film thermal insulation includes hollow microspheres and a multicomponent binder.

Key words:

Thin-film thermal insulation, energy saving, heat supply, transportation and storage of energy, modeling.

The research was financially supported by the RFBR within the science project no. 18-48-700008-p_a.

REFERENCES

1. Wang H., Wang H., Haijian Zh., Zhu T. Optimization modeling for smart operation of multi-source district heating with distributed variable-speed pumps. *Energy*, 2017, vol. 138, pp. 1247–1262.
2. Duquette J., Rowe A., Wild P. Thermal performance of a steady state physical pipe model for simulating district heating grids with variable flow. *Applied Energy*, 2016, vol. 178, pp. 383–393.
3. Wang Y., Youa S., Zhang H., Zheng X., Zheng W., Miao Q., Luc G. Thermal transient prediction of district heating pipeline: Optimal selection of the time and spatial steps for fast and accurate calculation. *Applied Energy*, 2017, vol. 206, pp. 900–910.
4. Ertürk M. Optimum insulation thicknesses of pipes with respect to different insulation materials, fuels and climate zones in Turkey. *Energy*, 2016, vol. 113, pp. 991–1003.
5. Polovnikov V.Y. Thermal regimes and thermal losses of underground pipelines in real heat exchange on the outer interaction boundary. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 1, pp. 124–131. In Rus.
6. Ryzhenkov V.A., Loginova N.A., Bychkov A.I., Prishchepov A.F. On the effectiveness of thin-film insulation coatings. *Scientific Review*, 2013, no. 5, pp. 71–75. In Rus.
7. Chou H.M., Chen C.R., Wu T.N. New transparent thin films for thermal insulation. *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers. Transactions of the Chinese Institute of Engineers. Series C*, 2015, vol. 36 (1), pp. 85–90.
8. Kim H., Jang J., Shin S., Park Y., Kim S., Kim H.R., Hyun B., Kim J. The evaluation of energy saving using ultrathin heat insulation in railway electrification substation. *Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, 2015, vol. 64 (1), pp. 171–175.
9. Qi Y., Yin X., Zhang J. Transparent and heat-insulation plasticized polyvinyl chloride (PVC) thin film with solar spectrally selective property. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2016, vol. 151, pp. 30–35.
10. Patankar S.N., Kranov Y.A. Hollow glass microsphere HDPE composites for low energy sustainability. *Materials Science and Engineering*, 2010, vol. 527, pp. 1361–1366.
11. Wang H., Fang H.J., Lan Q.D., He S., Jiang C. Effect of hollow glass microsphere thin film on heat-insulation performance of building envelope. *Shanghai Jiaotong Daxue Xuebao/Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2014, vol. 48 (9), pp. 1341–1345.
12. Liao Y., Wu X., Liua H., Chen Y. Thermal conductivity of powder silica hollow spheres. *Thermochimica Acta*, 2011, vol. 526, pp. 178–184.

13. Fiedler T., Löffler R., Bernthaler T., Winkler R., Belova I.V., Murch G.E., Öchsner A. Numerical analyses of the thermal conductivity of random hollow sphere structures. *Materials Letters*, 2009, vol. 63, no. 13–14, pp. 1125–1127.
14. Ryzhenkov V.A., Loginova N.A., Bychkov A.I., Prishchepov A.F. On the possibility of using microspheres with a modified surface as part of thin-film heat-insulating coatings. *Energy Saving and Water Treatment*, 2013, no. 4, pp. 21–23. In Rus.
15. Ryzhenkov V.A., Loginova N.A., Prishchepov A.F. The effectiveness of thin-film insulating coatings when using microspheres for heat supply systems. *Reliability and safety of energy*, 2012, no. 17, pp. 61–63. In Rus.
16. Loginova N.A., Ryzhenkov A.V., Prishchepov A.F., Lapin E.E., Pleshcheva A.Yu. Tests of thin-film multilayer heat-insulating coatings for frost resistance. *Reliability and safety of energy*, 2014, no. 2, pp. 23–25. In Rus.
17. Bekker V.V., Grigorev S.V., Loginova N.A., Pogorelov S.I., Ryzhenkov A.V., Anikeev A.V. Study of the effect of moisture on the insulating properties of hollow microspheres. *Oil industry*, 2015, no. 12, pp. 136–137. In Rus.
18. Beliaeva E.V., Loginova N.A., Lapin E.E., Pogorelov S.I., Ryzhenkov A.V. On the results of vapor permeability studies of new types of thermal insulation materials. *Oil industry*, 2015, no. 8, pp. 114–116. In Rus.
19. Loginova N.A., Grigorev S.V., Lapin E.E., Pogorelov S.I., Ryzhenkov A.V. Choice and optimization of ratio of components to develop fast-mounted thermostable heat-insulating constructions. *Thermal Engineering*, 2016, vol. 63, no. 5, pp. 355–359. In Rus.
20. Osipchik V.S., Kostromina N.V., Olihova Iu.V., Ivashkina V.N., Beliaeva E.V., Loginova N.A., Ryzhenkov A.V., Lapin E.E. Studying the effect of modifying glass microspheres on the properties of oligomethylsiloxane-based syntactic foams. *Plastics*, 2015, no. 5–6, pp. 36–39. In Rus.
21. Novitckii P.V., Zograf I.A. *Otsenka pogreshnostey rezul'tatov izmerenii* [Error estimate of measuring results]. Leningrad, Energoizdat Publ., 1991. 304 p.
22. Guva A.Ya. *Kratkiy teplofizicheskiy spravochnik* [Brief thermophysical reference book]. Novosibirsk, Sibvuzizdat Publ., 2002. 300 p.
23. Garcia A.L. *Numerical methods for physics*. San Jose CA, CreateSpace Independent Publishing Platform, 2015. 432 p.
24. Babichev N.A. *Fizicheskie velichiny: spravochnik* [Physical quantities: reference book]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 1232 p.

Received: 28 November 2018.

Information about the authors

Viacheslav Yu. Polovnikov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 546.561

ПАРАМЕТРЫ АКТИВНОСТИ НАНОПОРОШКОВ МЕДИ ПРИ ДЛЯТЕЛЬНОМ ХРАНЕНИИ В УСЛОВНО-ГЕРМЕТИЧНОЙ ТАРЕ

Тихонов Дмитрий Владимирович¹,
dv_1@mail.ru

Ильин Александр Петрович¹,
ilyin@tpu.ru

Беспалова Екатерина Александровна²,
katena.bespalova9570@gmail.com

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

² Бийский технологический институт,
659305, Россия, г. Бийск, ул. им. Героя Советского Союза Трофимова, 27.

Актуальность исследования связана с определением параметров активности серии нанопорошков меди после хранения в течение 16 лет в условно-герметичной таре и на их основе получением данных о деградации меди в нанодисперсном состоянии.

Цель: экспериментально определить четыре параметра химической активности серии нанопорошков меди и установить закономерности изменения этих параметров после длительного хранения этих нанопорошков в условно-герметичной таре.

Объект: нанопорошки меди, синтезированные в условиях электрического взрыва проводника в среде аргона.

Методы. Фазовый состав серии нанопорошков меди определяли с использованием дифрактометра «Shimadzu» XRD-700. Размеры и форму частиц анализировали с помощью растрового электронного микроскопа JSM-7500FA «Jeol». Площадь удельной поверхности нанопорошков меди измеряли с помощью метода низкотемпературной адсорбции азота (метод БЭТ). Содержание металлической меди определяли с использованием термогравиметрии при нагревании до 1020 °C со скоростью 10 °/мин. Реакционную способность нанопорошков меди определяли по четырем параметрам активности: температура начала окисления (t_{so} , °C), максимальная скорость окисления (V_{max} , мг/мин), степень окисленности (α , %) и энталпия окисления ΔH , кДж/моль. Для расчета этих параметров использовали деривограф Q-1000 (фирма MOM) и термоанализатор Q600 STD (фирма TA-Instrument).

Результаты. После хранения (16 лет) нанопорошков меди в условно-герметичной таре часть образцов стали пирофорными: их температура окисления понизилась до 19 и 16 °C. В то же время имеются образцы с температурой начала окисления 188 и 190 °C. Максимальная скорость окисления нанопорошков меди составляла $32,3 \cdot 10^{-4}$ мг/с, а минимальная только $5,2 \cdot 10^{-4}$ мг/с. При нагревании до 650 °C энталпия окисления нанопорошков меди для подавляющей части образцов составляла ≈ 1500 Дж/г. Содержание металлической меди в нанопорошках образцов составляло от 46,7 до 73,5 мас. %. Отсутствие корреляционных зависимостей между условиями электрического взрыва и параметрами активности связано, по-видимому, с многопараметрической зависимостью формирования оксидной оболочки на частицах меди: значимыми являются условия пассивирования. Особенностью нанопорошков меди является невозможность формирования защитной плёнки на поверхности частиц: продуктами окисления является кристаллическая фаза CuO и рентгеноаморфный оксид Cu_2O в виде кластеров с характерными размерами 4–6 нм.

Ключевые слова:

Нанопорошок, медь, электрический взрыв, параметры активности, термический эффект, температура начала окисления, хранение, воздух, максимальная скорость окисления, энталпия окисления.

Введение

Медь относится к металлам с низкой активностью и в ряду напряжений находится после водорода [1]. Общепризнано, что вещества в наностоинии имеют новые свойства [2], но в конкретных случаях новые свойства многими учёными отрицаются [3–5].

Одной из основных проблем практического применения нанопорошков меди является сохранение высокого содержания металлической меди и её реакционной способности. Вместе с тем для получения устойчивого нанопорошка меди необходимо после его получения частично окислить и тем самым снизить содержание меди до 95–96 мас. % [2].

Любые нанопорошки являются нестабильными или метастабильными системами «твердое тело –

газ». В сравнении с веществами с низкой дисперсностью нанопорошки металлов имеют высокую реакционную способность [6] и взаимодействуют с окружающей средой [7, 8]. Основным окислителем нанопорошков (НП) металлов являются протоны, которые образуются при диссоциации молекул воды на поверхности наночастиц [9]. Особенностью структуры наночастиц (НЧ) металлов [8, 9], сформированной при пассивировании в воздухе, является наличие двойного электрического слоя (ДЭС): адсорбированные молекулы воды диссоциируют на протоны, которые диффундируют в объем наночастицы, и гидроксид-ионы, которые стабилизируются на поверхности. Последние химически связываются поверхностью НЧ, а протоны окисляют металл, образуя атомы и затем молекулы водорода [10]. Для ряда металлов (алюминий, титан, цирко-

ний и гафний) протоны образуют соответствующие гидриды [10]. При уменьшении диаметра частиц металлов состояние атомов сначала на поверхности, а с диаметром 10–30 нм и в объёме частиц изменяется и переходит в нестабильное состояние [10]. Формирование и природа защитных плёнок на поверхности частиц меди зависит от их диаметра (кривизны поверхности). При уменьшении диаметра до 1 мкм сохраняется диффузионный механизм формирования защитной плёнки, толщина которой составляет 20–40 мкм [11]. Для частиц меди диаметром менее 100 нм в связи с изменением состояния атомов на поверхности структура и состав защитной плёнки также изменяется. Процесс окисления меди в наносостоянии тормозится при формировании двойного электрического слоя, обладающего псевдоёмкостью, с внутренним положительно заряженным слоем. Устойчивость двойного слоя определяет устойчивость нанопорошков меди при хранении. Косвенным подтверждением наличия двойного электрического слоя является тонкий защитный слой 2–10 нм, который не может быть сформирован по диффузионному механизму [8]. Кроме того, с уменьшением диаметра наночастиц меди толщина двойного электрического слоя снижается. При нагревании происходит разрушение двойного электрического слоя, окисление нанопорошка меди и наблюдается пороговое явление, связанное с экстремальным тепловым делением [12].

Описание объекта исследования и методик эксперимента

Нанопорошки меди (НПМ) получали с помощью экспериментальной установки [2, 13], оснащенной механизмом автоматической подачи проводника при частоте следования электровзрывов 0,6 Гц. Принципиальная схема установки приведена на рис. 1. В качестве взрываемого проводника использовали проволоку диаметром 0,35 мм с содержанием меди 99,8 мас. %. В ходе проведения эксперимента зарядная емкость накопителя энергии составляла 2,02 мкФ, а длина взрываемых проводников не изменялась и составляла 80 мм.

В качестве рабочего газа применяли аргон при давлении $1,52 \cdot 10^5$ Па. Взрывы проводников проводили в режиме «быстрого взрыва» (по классификации Беннетта) [13]. Величину удельной введенной энергии (W/W_0) и удельной энергии дуговой стадии (W_d/W_0) регулировали путем изменения зарядного напряжения (U_0), (W – энергия, введенная в проводник на стадии собственно взрыва, W_d – энергия, введенная в проводник на стадии дугового разряда, W_c – энергия сублимации взрываемого проводника). Энергию, введенную в проводник, рассчитывали по данным осциллограмм тока [14, 15]. Изучали порошок, осевший в сборнике нанопорошка (рис. 1, поз. 12) и прошедший пассивирование в среде аргона с контролируемым напуском воздуха.

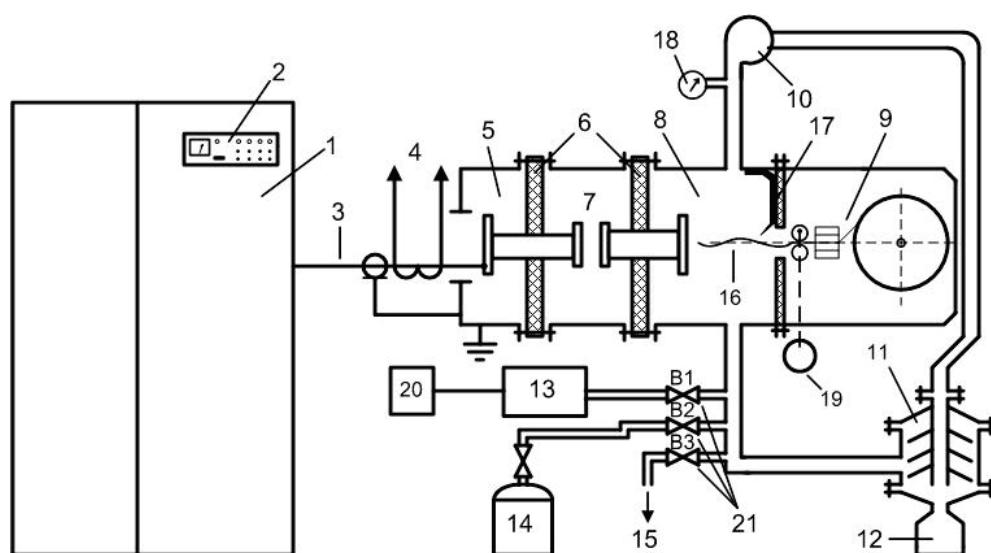


Рис 1. Принципиальная схема установки: 1 – блок питания установки; 2 – пульт управления; 3 – высоковольтные кабели; 4 – токовый шунт; 5 – камера высоковольтного ввода; 6 – проходные изоляторы; 7 – разрядник; 8 – взрывная камера; 9 – механизм подачи проводника; 10 – вентилятор; 11 – фильтр-ловушка нанопорошка; 12 – сборник нанопорошка; 13 – форвакуумный насос; 14 – баллон с газом; 15 – трубопровод для сброса газа в вытяжную вентиляцию; 16 – взрывающийся проводник; 17 – заземленный электрод; 18 – мановакуумметр; 19 – двигатель механизма подачи проводника; 20 – пульт управления форвакуумным насосом; 21 – газовые краны

Fig. 1. Scheme of installation: 1 is the power supply unit; 2 is the control panel; 3 are the high-voltage cables; 4 is the current shunt; 5 is the high-voltage input chamber; 6 are the feedthrough insulators; 7 is the spark-gap; 8 is the explosion chamber; 9 is the mechanism of wire feeding; 10 is the ventilator of gas circulation; 11 is the collection filter for nanopowders; 12 is the collector of nanopowders; 13 is the forevacuum pump; 14 is the gas-cylinder; 15 is the gas discharge line; 16 is the exploding wire; 17 is the grounded electrode; 18 is the manovacuum meter; 19 is the electric motor of mechanism of wire feeding; 20 is the control panel of forvacuum pump; 21 are the gas ball valves

Таблица 1. Параметры синтеза нанопорошков меди в условиях электрического взрыва

Table 1. Parameters of the copper nanopowders synthesis under electric explosion conditions

| Обозначение образца Sample name | U_0 , кВ (kV) | W , Дж (J) | W_d , Дж (J) | W/W_s | W_d/W_s |
|------------------------------------|-----------------|--------------|----------------|---------|-----------|
| Cu-30 | 30 | 548 | 182 | 2,12 | 0,70 |
| Cu-28 | 28 | 500 | 134 | 1,93 | 0,52 |
| Cu-26 | 26 | 453 | 90 | 1,74 | 0,34 |
| Cu-24 | 24 | 404 | 63 | 1,56 | 0,24 |
| Cu-22 | 22 | 366 | 18 | 1,41 | 0,07 |
| Cu-20 | 20 | 319 | 0 | 1,23 | 0 |
| Cu-18 | 18 | 232 | 0 | 0,89 | 0 |

Фазовый состав нанопорошков определяли с использованием рентгеновского дифрактометра «Shimadzu» XRD-7000 (излучение $\text{Cu}_{\text{K}\alpha}$). Размер и форму частиц анализировали с помощью растрового микроскопа JSM-7500FA «Jeol». Площадь удельной поверхности ($S_{\text{уд}}$) нанопорошка измеряли с помощью метода низкотемпературной адсорбции азота (метод БЭТ). Реакционную способность НПМ определяли по четырем параметрам химической активности [16, 17]: температуре начала окисления, максимальной скорости окисления, степени окисленности НПМ и энталпии окисления. Для расчета этих параметров, а также для расчета содержания металлической меди в НПМ использовали термограммы, полученные с помощью дериватографа Q-1000 и термоанализатора Q600 STD при нагревании образцов в воздухе до 1020 °C. [18].

Результаты экспериментов и их обсуждение

После получения НПМ в условиях ЭВП (табл. 1) нанопорошки пассивировали в отдельном боксе малыми добавками воздуха. При этом температуру НПМ контролировали, и она не превышала 40 °C. Пассивированные НПМ нагревали в ячейке термоанализатора. Результаты ДТА приведены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры активности электровзрывных нанопорошков меди после 20 дней хранения

Table 2. Activity parameters of electroexplosive copper nanopowders after 20 days of storage

| Обозначение образца Sample name | Площадь удельной поверхности, $\text{m}^2/\text{г}$ Specific surface area, m^2/g | Температура начала окисления, $t_{\text{ox}, \circ}$, °C Oxidation onset temperature, $t_{\text{ox}, \circ}$, °C | Прирост массы по ТГ, мас. % (до 800 °C) TG mass gain, wt. % (to 800 °C) | Приведенный тепловой эффект ($S/\Delta m$), отн. ед. Reduced thermal effect, ($S/\Delta m$), relative units |
|------------------------------------|---|---|--|--|
| Cu-30 | 6,2±0,2 | 165 | 20,1 | 1,5 |
| Cu-28 | 8,2±0,2 | 170 | 19,4 | 1,4 |
| Cu-26 | 10,2±0,3 | 170 | 19,6 | 1,6 |
| Cu-24 | 5,7±0,2 | 160 | 18,7 | 1,5 |
| Cu-22 | 3,8±0,2 | 170 | 19,8 | 1,5 |
| Cu-20 | 3,7±0,3 | 170 | 20,8 | 1,4 |
| Cu-18 | 3,9±0,1 | 170 | 20,6 | 1,2 |

Согласно данным табл. 2, с увеличением напряжения, подаваемого на проводник, с 18 до 30 кВ дисперсность ($S_{\text{уд}}$) возрастала и проходила через

максимум $10,2 \pm 0,3 \text{ м}^2/\text{г}$ при напряжении 26 кВ. Дальнейшее увеличение напряжения более 28 кВ приводило к уменьшению $S_{\text{уд}}$. Несмотря на различную дисперсность, $S_{\text{уд}}$ изменялась от 3,7 до $10,2 \text{ м}^2/\text{г}$, температура начала окисления оставалась практически постоянной (160–170 °C). При нагревании до 800 °C в среде аргона максимальная скорость окисления меди изменяется не значительно (~11 %), но определённой зависимости от напряжения, приложенного к проводнику, не наблюдалось. Энталпия окисления также изменялась без определенной зависимости от условий электрического взрыва (табл. 2).

Таблица 3. Параметры активности электровзрывных нанопорошков меди после 16 лет хранения

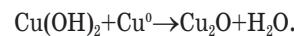
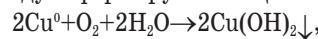
Table 3. Activity parameters of electroexplosive copper nanopowders after 16 years of storage

| № обр. Sample no. | Температура начала окисления ($t_{\text{ox}, \circ}$), °C Oxidation onset temperature, ($t_{\text{ox}, \circ}$), °C | Прирост веса по ТГ до 800 °C, Δm , мас. % TG mass gain to 800 °C, Δm , wt. % | Максимальная скорость окисления (V_{ox}), $\text{мг}/\text{с} \cdot 10^4$ Maximum oxidation rate (V_{ox}), $\text{mg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^4$ | Энталпия окисления до 650 °C, $-\Delta H$, кДж/моль Oxidation enthalpy to 650 °C, $-\Delta H$, kJ/mole | Содержание металлической меди, мас. % Content of metal copper, wt. % |
|----------------------|--|---|--|---|---|
| Cu-30 | 38 | 16,40 | 6,32 | 98,3 | 65,7 |
| Cu-28 | 190 | 7,03 | 32,31 | 95,9 | 47,0 |
| Cu-26 | 16 | 12,40 | 12,23 | 99,9 | 50,7 |
| Cu-24 | 158 | 11,41 | 5,21 | 81,5 | 46,7 |
| Cu-22 | 19 | 14,33 | 8,45 | 96,3 | 58,1 |
| Cu-20 | 172 | 16,09 | 26,37 | 95,4 | 64,2 |
| Cu-18 | 188 | 18,39 | 11,64 | 97,3 | 73,5 |

В табл. 3 приведены параметры активности образцов меди после 16 лет хранения, рассчитанные путем обработки термограмм, полученных с помощью современного оборудования. Порошки меди, даже грубодисперсные, отличаются неустойчивостью при нагревании в воздухе, хотя медь относится к малоактивным металлам [1]. В отличие от нанопорошков алюминия, также хранившихся 16 лет в условно герметичной таре, температура начала окисления которых практически не изменилась, образцы НПМ имеют крайне низкую температуру начала окисления (табл. 3): Cu-22 (19 °C) и Cu-26 (16 °C), т. е. они стали пирофорными после хранения.

В практике хранения нанопорошков меди наблюдалось самопроизвольное их спекание с выделением тепла. Определенной закономерности в изменении температуры начала окисления нанопорошков меди от величины приложенного напряжения, энергии взрыва и энергии дуговой стадии не наблюдается. Фазовый состав образцов НПМ, хранившихся в течении 16 лет, приведён в табл. 4.

Согласно РФА, фазовый состав образцов НПМ представлен кристаллическими фазами: металлической медью и CuO (табл. 4). На меди в массивном состоянии в воздухе формируется защитная пленка [1]:



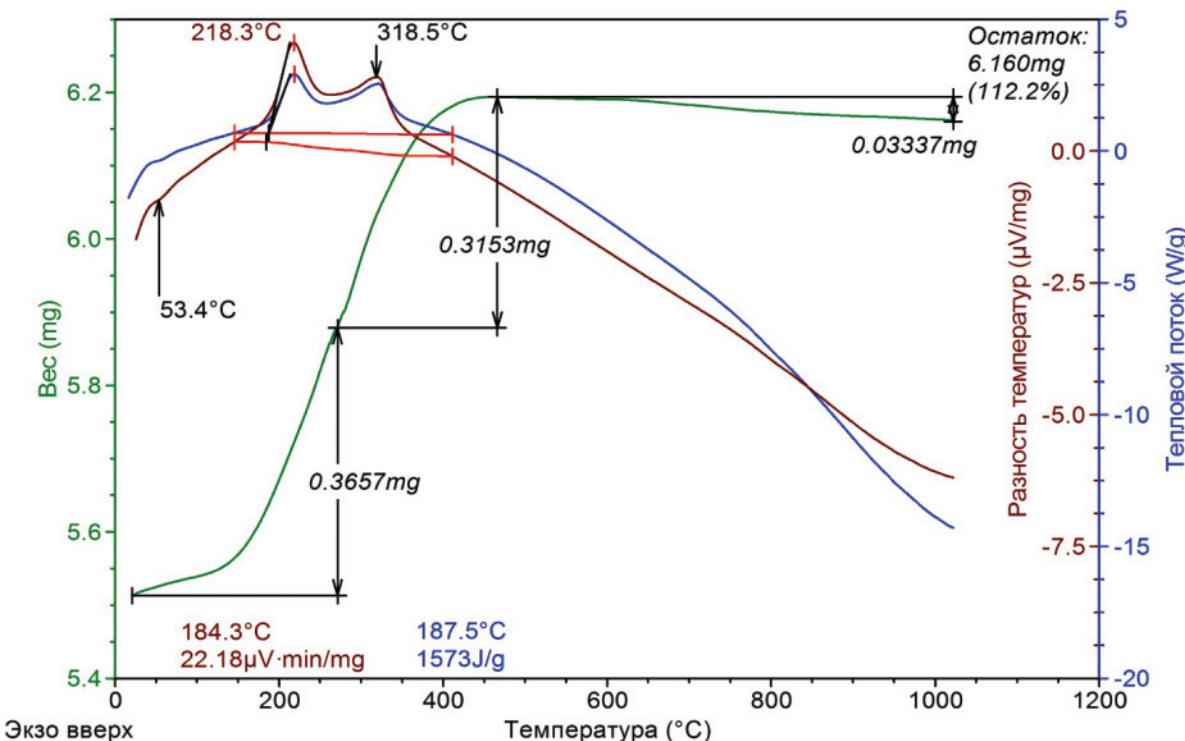


Рис. 2. Термограмма нанопорошка меди (образец Cu-26) после 16 лет хранения: масса образца 5,4920 мг, скорость нагрева 10 °/мин, атмосфера – воздух

Fig. 2. Thermogram of copper nanopowder (sample Cu-26) after 16 years of storage: sample weight is 5,4920 mg, heating rate 10 °/min, atmosphere – air

Таблица 4. Относительная интенсивность 100%-х рефлексов Cu (совпадение с PDF-2, 04-0836) и CuO (совпадение с PDF-2, 01-1117) по данным рентгенофазового анализа после 16 лет хранения (%)

Table 4. Relative intensity of 100 % Cu reflexes (coincidence with PDF-2, 04-0836) and CuO (coincidence with PDF-2, 01-1117) according to X-ray phase analysis after 16 years of storage (%)

| № образца Sample no. | Межплоскостные расстояния, соответствующие максимальным по интенсивности рефлексам D-spacing corresponding to the maximum intensive reflexes | | |
|-------------------------|---|---------------------------|---------------------------|
| | Cu, $d=2,1 \text{ \AA}$ | CuO, $d=2,51 \text{ \AA}$ | CuO, $d=2,31 \text{ \AA}$ |
| Cu-30 | 100 | 11 | 10 |
| Cu-28 | 100 | 11 | 9 |
| Cu-26 | 100 | 12 | 10 |
| Cu-24 | 100 | 14 | 13 |
| Cu-22 | 100 | 10 | 9 |
| Cu-20 | 100 | 6 | 5 |
| Cu-18 | 100 | 6 | 6 |
| Cu ПМС | 100 | 0 | 0 |

При нагревании такой меди даже до 200 °С на поверхности формируется смесь Cu₂O и CuO. При сгорании меди в массивном состоянии в атмосфере воздуха она переходит в CuO. Для наночастиц меди характерно образование CuO при пассивировании и длительном хранении (табл. 4). Этот экспериментальный результат объясняется повышенной реакционной способностью атомов меди на поверхности наночастиц, связанной с высокой кривизной поверхности [6, 7].

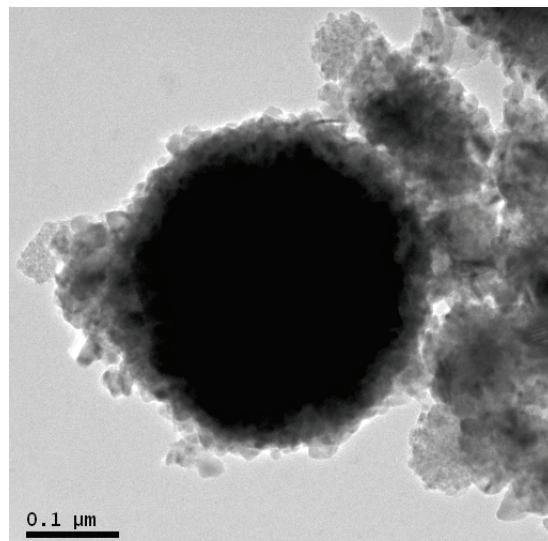


Рис. 3. Микрофотография наночастиц и частицы меди диаметром ~300 нм после пассивирования в воздухе

Fig. 3. Micrograph of nanoparticles and copper particles with a diameter of ~300 nm after passivation in air

На рис. 3 видно, что оксидный слой состоит из кластеров размером 4–6 нм, отделенных друг от друга поверхностью раздела, что облегчает доступ окислителей к поверхности металлической меди. К тому же кроме оксида CuO, кристаллизующегося в моноклинной решетке ($a=0,46837 \text{ нм}$,

$b=0,34226$ нм, $c=0,51288$ нм) [19], не исключена возможность образования рентгеноаморфного оксида Cu_2O , вероятность образования которого термодинамически разрешена.

Заключение

Согласно результатам термического анализа исходных НПМ (табл. 2) с повышением напряжения (энергии) на взрывающемся проводнике с 18 до 30 кВ площадь удельной поверхности проходит через максимум, равный $10,2 \pm 0,3 \text{ м}^2/\text{г}$. Этому же образцу соответствует приведённый тепловой эффект, равный 1,6 отн. ед. Для серии образцов НПМ температура начала окисления в пределах погрешности дифрактометра постоянна: $160 \pm 5^\circ\text{C}$, т. е. не зависит от дисперсности (S_{yd}). Такая ситуация с t_{ho} объясняется формированием двойного электрического слоя на поверхности наночастиц меди [3, 11, 12]. В отличие от двойного электрического слоя в коллоидной химии на наночастицах меди двойной электрический слой формируется необратимо, т. е. в результате химической реакции разложения адсорбированной воды. Образующиеся протоны, способные к диффузии, проникают внутрь наночастицы, образуя положительно заряженный предвнешний слой. Оставшиеся на поверхности гидроксид-ионы образуют отрицательно заряженный внешний слой. Толщина двойного электрического слоя по данным электронной микроскопии составляет 2–10 нм [2, 3]. После хранения НПМ в течение 16 лет в условно герметичной таре (табл. 3) наиболее заметно для образцов изменилась t_{ho} : 2 образца стали пирофорными и содержание металлической меди в образце Cu-24 осталось 46,7 мас. %, а в образце Cu-28 – 47,0 мас. %. В процессе хранения в двойном электрическом слое процессы переноса заряда и массопереноса, по-видимому, не прекращаются.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Химическая энциклопедия / под ред. И.Л. Куняянца. – М.: Изд-во «Советская энциклопедия», 1992. – Т. 3. – 639 с.
- Effects of main particle diameter on improving particle flowability for compressed packing fraction in a smaller particle admixing system / M. Yoshida, A. Misumi, J. Oshitani, K. Gotoh, A. Shimosaka, Y. Shirakawa // Advanced Powder Technology. – 2017. – V. 28. – P. 2542–2548.
- Евстифеева Е.Н., Новикова А.А. Получение наночастиц меди термическим разложением комплекса формиата меди с тризтиламином // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2017. – № 3. – С. 135–139.
- Гусев А.И. Наноматериалы,nanoструктуры, нанотехнологии. – М.: Физматгиз, 2005. – 416 с.
- Wang L, Hu C, Shao L. The antimicrobial activity of nanoparticles: present situation and prospects for the future // Int J Nanomedicine. – 2017. – № 12. – P. 1227–1249.
- Qi W.H., Wang M.P. Size and shape dependent lattice parameters of metallic nanoparticles // J. Nanopart. Res. – 2005. – V. 7. – № 1. – P. 51–57.
- The thermal stability of high-energy ball-milled nanostructured Cu / J.M. Tao, X.K. Zhu, R.O. Seatlergood, C.C. Koch // Materials and Design. – 2012. – V. 49. – № 9. – P. 22–26.
- Hauffe K. Oxydation von Metallen und Metalllegierungen. – Berlin: Springer, 1957. – 329 S.
- Ильин А.П., Трушникова Л.Ф., Родкевич Н.Г. Электрохимические свойства электровзрывных энергонасыщенных порошков меди и серебра // Физика и химия обработки материалов. – 1995. – № 3. – С. 122–125.
- Connection between nanostructured materials' size-dependent melting and thermodynamic properties of bulk materials / W. Luo, K. Su, K. Li, Q. Li // Solid State Commun. – 2011. – V. 151. – № 3. – P. 229–233.
- Dreizin E.L. On the Mechanism of Asymmetric Aluminum Particle Combustion // Combustion and Flame. – 1999. – V. 117. – № 4. – P. 841–850.
- Пороговые явления в нанопорошках / А.П. Ильин, Л.О. Толбanova (Poot), В.В. Ан, Д.В. Тихонов // Изв. Вузов. – 2006. – № 8. – С. 550–552.
- Bennet F.D. High-temperature Exploding Wires // Progress in High-temperature Physics and Chemistry. – N.Y.: Pergamon Press, 1968. – V. 2. – 463 p.
- Осциллографическое определение энергии электрического взрыва проволочек / И.Ф. Кварцхава, В.В. Бондаренко, А.А. Плютто, А.А. Чернов // ЖЭТФ. – 1956. – Т. 31. – № 5. – С. 745–751.
- Искольдский А.М., Пикус В.К., Эпельбаум Я.Г. Электрический взрыв проводников. Устойчивость фронта фазового пре-

Проведённые исследования, таким образом, дают основания утверждать, что термическая устойчивость нанодисперсных порошков меди в значительной степени зависит от их структурно-энергетического состояния больше, чем от дисперсности (табл. 1, 2). Численные величины параметров активности не коррелируют с условиями их получения (табл. 1, 2), но остаются индивидуальными для каждого нанопорошка. Нанопорошки и наночастицы с двойным электрическим слоем [3, 8, 9], согласно экспериментальным результатам по длительному хранению, следует отнести к нестабильным системам. Поэтому при демонстрации свойств нанопорошков меди необходимо указывать время их хранения, условия хранения, и это время следует ввести в систему параметров активности в качестве пятого параметра (τ). Ранее опубликованные результаты экспериментов по свойствам нанопорошков металлов необходимо оценивать критически [4–7, 20, 21], т. к. в них отсутствуют данные по времени хранения.

Выводы

- Неустойчивость нанопорошков меди при хранении приводит к появлению их пирофорности в воздухе.
- Устойчивость нанопорошков меди после 16 лет хранения в условно-герметичной таре не имеет определенной зависимости от относительных величин введенной энергии в проводник (W/W_s) и энергии дуговой стадии (W_d/W_s).
- Причина низкой термической устойчивости связана с формированием, на поверхности частиц оксида CuO , кристаллизующегося в виде кластеров (4–6 нм), которые не образуют сплошной плёнки и не защищают медь от окисления.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект № 11.1928.2017/4.6.

- вращения. Препринт № 32 ИА и ЭТСО АН СССР. – Новосибирск: ИА и Э, 1976. – 42 с.
16. Gleiter H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure // Acta mater. – 2000. – V. 48. – P. 1–29.
 17. Characterization of Aluminium Powders. Parameters of Reactivity of Aluminum Powders / A.P. Ilyin, A.A. Gromov, V.V. An, F. Faubert et al. //Propellants, Explosives, Pyrotechnics. – 2002. – V. 27. – № 6. – P. 361–364.
 18. Уэндландт У. Термические методы анализа / пер. с англ. под ред. В.А. Степанова, В.А. Берштейна. – М.: Мир, 1978. – 526 с.
 19. Химическая энциклопедия / под ред. И.Л. Кунянца. – М.: Изд-во «Советская энциклопедия», 1990. – Т. 2. – 783 с.
 20. Rezaei P., Rezaei M., Meshkani F.. Low temperature CO oxidation over mesoporous iron and copper mixed oxides nanopowders synthesized by a simple one-pot solid-state method // Process Safety and Environmental Protection. – 2018. – № 119. – P. 379–388.
 21. Биологические эффекты воздействия свежеприготовленных и суточных водных дисперсий наночастиц меди и оксида меди на бактерии *E. coli* / О.В. Захарова, А.А. Гусев, Ю.В. Антибоева, С.Ю. Перова // Российские нанотехнологии. – 2018. – Т. 13. – № 3–4. – С. 745–751.

Поступила 24.10.2018 г.

Информация об авторах

Тихонов Д.В., кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Ильин А.П., доктор физико-математических наук, профессор отделения естественных наук Школы базового инженерного образования Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Беспалова Е.А., студентка Бийского технологического института.

UDC 546.561

ACTIVITY PARAMETERS OF COPPER NANOPOWDER AFTER LONG STORAGE IN CONDITIONAL-HERMETIC PACKAGE

Dmitriy V. Tikhonov¹,

dv_1@mail.ru

Alexander P. Ilyin¹,

ilyin@tpu.ru

Ekaterina A. Bespalova²,

katena.bespalova9570@gmail.com

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

² Biysk Institute of Technology,
27, Trofimof street, Biysk, 659305, Russia.

Relevance of the research is related to determination of parameters of copper nanopowders series activity after 16 years storage in an air-tight container.

The main aim of the research is to determine by the experiment four parameters of chemical activity of copper nanopowders series and to establish the laws of change in these parameters after long storage of these nanopowders in the air-tight container.

Object: copper nanopowders, produced by wire explosion technique in argon atmosphere.

Methods. Phase content of copper nanopowders series was determined «Shimadzu» XRD-700 diffractometer. Sizes and shapes of nanoparticles were investigated by reflection electron microscopy JSM-750FA Jeol. Specific surface areas of nanopowders were determined by means of low temperature nitrogen adsorption (BET). Metal copper content was determined by thermogravimetry after heating up to 1250 °C with heating speed 10°/min. Activity of copper nanopowders was characterized by four parameters of activity.

Results. After storage (16 years) of copper nanopowders in the air-tight container, some samples became pyrophoric: their oxidation temperature dropped to 19 and 16 °C. At the same time, there are samples with oxidation start temperature of 188 and 190 °C. Maximum oxidation rate of copper nanopowders was $32,3 \cdot 10^{-4}$ mg/s, and the minimum only $5,2 \cdot 10^{-4}$ mg/s. When copper nanopowders are heated to 650 °C, the enthalpy of their oxidation for the most part of the samples is ≈ 1500 kJ/mol. The content of metallic copper in nanopowders of the samples ranged from 46,7 to 73,5 wt. %. The absence of correlation dependencies between the conditions of electric explosion and the parameters of activity is apparently related to the multiparameter dependence of an oxide shell formation on copper particles: the conditions of passivation are significant. A feature of copper nanopowders is the impossibility of forming a protective film on the particle surface: oxidation product is crystalline CuO phase and roentgenomorphic Cu₂O phase in the form of 4–6 nm clusters.

Key words:

Nanopowder, copper, electrical explosion, parameters of activity, thermal effect, oxidation start temperature, storage, air, maximum oxidation rate, enthalpy of oxidation.

This work was financially supported by The Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Project no. 11.1928.2017/4.6. The experimental part was carried out at Tomsk Polytechnic University within the framework of Tomsk Polytechnic University Competitiveness Enhancement Program grant.

REFERENCES

1. Khimicheskaya entsiklopediya [Chemical encyclopedia]. Ed by I.L. Knunyants. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1992. Vol. 3, 639 p.
2. Yoshida M., Misumi A., Oshitani J., Gotoh K., Shimosaka A., Shirakawa Y. Effects of main particle diameter on improving particle flowability for compressed packing fraction in a smaller particle admixing system. *Advanced Powder Technology*, 2017, vol. 28, pp. 2542–2548.
3. Evstifeeva E.N., Novikova A.A. Production of copper nanoparticles by thermal decomposition of a complex of copper format with trimethylamine. *International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2017, no. 3, pp. 135–139. In Rus.
4. Gusev A.I. Nanomaterialy, nanostruktury, nanotekhnologii [Nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 2005. 416 p.
5. Wang L., Hu C., Shao L. The antimicrobial activity of nanoparticles: present situation and prospects for the future. *Int J Nanomedicine*, 2017, no. 12, pp. 1227–1249.
6. Qi W.H., Wang M. P. Size and shape dependent lattice parameters of metallic nanoparticles. *J. Nanopart. Res.*, 2005, vol. 7, no. 1, pp. 51–57.
7. Tao J.M., Zhu X.K., Seatlergood R.O., Koch C.C. The thermal stability of high-energy ball-milled nanostructured Cu. *Materials and Design*, 2012, vol. 49, no. 9, pp. 22–26.
8. Hauffe K. *Oxydation von Metallen und Metallegierungen* [Metal oxidation]. Berlin, Springer, 1957. 390 p.
9. Ilin A.P., Trushina L.F., Rodkevich N.G. Electrochemical properties of electric blasting energy-saturated powders of copper and silver. *Physics and Chemistry of Materials Processing*, 1995, no. 1, pp. 122–125. In Rus.
10. Luo W., Su K., Li K., Li Q. Connection between nanostructured materials' size-dependent melting and thermodynamic properties of bulk materials. *Solid State Commun.*, 2011, vol. 151, no. 3, pp. 229–233.
11. Dreizin E.L. On the Mechanism of Asymmetric Aluminum Particle Combustion. *Combustion and Flame*, 1999, vol. 117, no. 4, pp. 841–850.

12. Ilin A.P., Tolbanova (Root) L.O., An V.V., Tihonov D.V. Threshold phenomena in nanopowders. *Bulletin of the higher educational institutions*, 2006, no. 8, pp. 550–552. In Rus.
13. Bennet F.D. High-temperature Exploding Wires. *Progress in High-temperature Physics and Chemistry*. N.Y., Pergamon Press, 1968. Vol. 2, 463 p.
14. Kvartskhava I.F., Bondarenko V.V., Plyutto A.A., Chernov A.A. Oscillographic determination of electrical explosion energy of wires. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1956, vol. 31, no. 5, pp. 745–751. In Rus.
15. Iskoldsky A.M., Pikus V.K., Epelbaum Ya.G. *Elektrichesky vzryv provodnikov. Ustoychivost fronta fazovogo prevrashcheniya* [Electric explosion of conductors. Stability of the phase transformation on front]. Novosibirsk, IA i EH Publ., 1976. 42 p.
16. Gleiter H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure. *Acta mater.*, 2000, vol. 48, pp. 1–29.
17. Ilyin A.P., Gromov A.A., An V.V., Faubert F. Characterization of Aluminium Powders. T. Parameters of Reactivity of Aluminum Powders. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2002, vol. 27, no. 6, pp. 361–364.
18. Uehndlandt U. *Termicheskie metody analiza* [Thermal Methods of Analysis]. Translated from English. Eds. V.A. Stepanova, V.A. Bershteyna. Moscow, Mir Publ., 1978. 526 p.
19. *Khimicheskaya entsiklopediya* [Chemical encyclopedia]. Ed. by I.L. Knunyants. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1990. Vol. 2, 783 p.
20. Rezaei P., Rezaei M., Meshkani F. Low temperature CO oxidation over mesoporous iron and copper mixed oxides nanopowders synthesized by a simple one-pot solid-state method. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018, no. 119, pp. 379–388.
21. Zaharova O.V., Gusev A.A., Antiboeva Yu.V., Perova S.Yu. Biological effects of freshly prepared and daily water dispersions of copper nanoparticles and copper oxide on *E. coli* bacteria. *Russian nanotechnology*, 2018, vol. 13, no. 3–4, pp. 745–751. In Rus.

Received: 24 October 2018.

Information about the authors

Dmitriy V. Tikhonov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexander P. Ilyin, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Ekaterina A. Bespalova, student, Biysk Institute of Technology.

Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Корректура и перевод на английский язык *С.В. Жаркова*
Дизайн обложки *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива
Валерия Касаткина

Руководство для авторов и образец оформления статьи: izvestiya.tpu.ru

Подписано к печати 20.05.2019. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 23,96. Уч.-изд. л. 21,67.
Заказ 120-19. Тираж 500 экз.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ