

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 329, № 4, 2018

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА.
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Редакционная коллегия

Семилетов И.П., гл. редактор, д-р геогр. наук (Россия)
Рихванов Л.П., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Оствальд Р.В., канд. хим. наук (Россия)
Савичев О.Г., д-р геогр. наук (Россия)
Покровский О.С., канд. геол.-минерал. наук (Франция)
Старостенко В.И., д-р физ.-мат. наук (Украина)
Конторович А.Э., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Шварцев С.Л., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Никитенков Н.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Силкин В.М., д-р физ.-мат. наук (Испания)
Коротеев Ю.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Уленев О.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Борисов А.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Коршунов А.В., д-р хим. наук (Россия)
Пестряков А.Н., д-р хим. наук (Россия)
Тойпель У., Dsc (Германия)
Джин-Чун Ким, Dsc (Южная Корея)
Ильин А.П., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Заворин А.С., д-р техн. наук (Россия)
Ханьялич К., Dsc (Нидерланды)
Маркович Д.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Алексеев С.В., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Воропай Н.И., д-р техн. наук (Россия)
Кочегуров А.И., канд. техн. наук (Россия)
Руи Д., PhD (Португалия)
Зиатдинов Р.А., канд. физ.-мат. наук (Южная Корея)
Спицын В.Г., д-р техн. наук (Россия)
Муравьев С.В., д-р техн. наук (Россия)
Пойлов В.З., д-р техн. наук (Россия)
Лотов В.А., д-р техн. наук (Россия)
Софронов В.Л., д-р хим. наук (Россия)
Бузник В.М., д-р хим. наук (Россия)
Захаров Ю.А., д-р хим. наук (Россия)
Антипенко В.Р., д-р хим. наук (Россия)
Голик В.И., д-р техн. наук (Россия)
Абуталипова Е.М., д-р техн. наук (Россия)
Полищук В.И., д-р техн. наук (Россия)
Хамитов Р.Н., д-р техн. наук (Россия)
Зюев А.М., д-р техн. наук (Россия)
Кирыанова 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, 2018

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

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

Учредителем является Томский политехнический университет.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

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

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

Volume 329, № 4, 2018

**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)
Shvartsev S.L., 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 SCOPE

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

- Лабораторные исследования кислотных составов для обработки коллекторов, характеризующихся различной карбонатностью и структурой пустотного пространства горных пород
Мартюшев Д.А.
- 6
- Определение оптимального угла подъема лопастей на спинке лапы шарошечного долота для горизонтального бурения
Гиниятов Д.С., Ямалиев В.У.
- 13
- Исследование влияния осложняющих факторов на эффективность винтовых штанговых насосов
Бикбулатова Г.И., Исаев А.А., Болтнева Ю.А.
- 21
- Геологическая модель Викуловских отложений с учетом анализа связности коллектора и данных по горизонтальным скважинам
Боженюк Н.Н., Белкина В.А., Стрекалов А.В.
- 30
- Влияние состава дисперсионной среды на свойства высокопарафинистых дисперсных систем, обработанных ультразвуком
Ануфриев Р.В., Волкова Г.И., Юдина Н.В.
- 45
- Экологические риски от влияния токсичных элементов в атмосферном воздухе на основе изучения снежного покрова в районе расположения Томской ГРЭС-2
Осипова Н.А., Таловская А.В., Филимоненко Е.А., Языклов Е.Г., Новиков С.А.
- 54
- Элементный состав лишайника на шифере как биоиндикатор загрязнения атмосферы агломерации г. Горно-Алтайска
Робертус Ю.В., Рихванов Л.П., Ситникова В.А., Савенко К.С., Большунова Т.С.
- 70
- Водопритоки в подземные горные выработки под влиянием внешних граничных условий при разработке угольных месторождений (на примере шахты Алексиевская)
Пургина Д.В., Кузеванов К.И.
- 79
- Особенности выполнения деформационного мониторинга инженерных сооружений в условиях вечной мерзлоты
Уставич Г.А., Аврунев Е.И., Сальников В.Г., Попов В.К.
- 97
- Возможность применения индуктивно-импульсного генератора в электрогидравлическом источнике сейсмических колебаний
Пустынников С.В., Хан В.
- 110
- Многомерная модель системы электропитания погружного технологического оборудования
Букреев В.Г., Шандарова Е.Б., Рулевский В.М.
- 119
- Геохимические критерии выявления коллекторов и прогноза их нефтегазоносности в терригенных отложениях Пур-Тазовской нефтегазоносной области
Исаева Е.Р., Ворошилов В.Г., Тимкин Т.В., Mansour Ziail
- 132
- Испытания новой альтернативной электрической печи для обжига вермикулитовых концентратов
Нижегородов А.И., Брянских Т.Б., Гаврилин А.Н., Мойзес Б.Б., Градобоев А.В., Вавилова Г.В., Tlusty J., Тузикова В.
- 142
- Применение коэффициента детерминации для сравнения осциллограмм отклика силового трансформатора, полученных при диагностике методом наносекундных низковольтных импульсов
Ковригин Б.Л., Лавринович А.В.
- 154
- Оптимизация режимов шарошечного бурения регулированием расстояния от снаряда до забоя
Урнш В.В., Саруев Л.А., Саруев А.Л.
- 162

CONTENTS

- Laboratory studies of acid compositions for treating reservoir, characterized by various carbonate content and void structure of rocks
Martyushev D.A.
- 6
- Definition of optimum angle of elevation of blades on a back of leg of a roller-cone bit for horizontal drilling
Giniyatov D.S., Yamaliyev V.U.
- 13
- Influence of complicating factors on a rod pump productivity
Bikbulatova G.I., Isaev A.A., Boltneva Yu.A.
- 21
- Geological model of the Vikulovskaya suit deposits, including analysis of a manifold connectivity and the data on horizontal wells
Bozhenyuk N.N., Belkina V.A., Strekalov A.V.
- 30
- Influence of dispersion medium composition on properties of wax disperse systems after sonication
Anufriev R.V., Volkova G.I., Yudina N.V.
- 45
- Ecological risks caused by toxic elements impact on ambient air determined in the study of the snow cover in Tomsk GRES-2 area
Osipova N.A., Talovskaya A.V., Filimonenko E.A., Yazikov E.G., Novikov S.A.
- 54
- Elemental composition of lichen on roofing slate as bioindicator of air pollution in Gorno-Altaysk
Robertus Yu.V., Rikhvanov L.P., Sitnikova V.A., Savenko K.S., Bolshunova T.S.
- 70
- Water inflow into mine under the influence of external boundary conditions at coal deposit exploitation (Kuzbass)
Purgina D.V., Kuzevanov K.I.
- 79
- Features of deformation monitoring of engineering structures in permafrost conditions
Ustavich G.A., Avrunev E.I., Salnikov V.G., Popov V.K.
- 97
- Possibility of application of inductance-capacitance oscillator in electro-hydraulic source of seismic vibrations
Pustynnikov S.V., Han W.
- 110
- Power supply system model of remote processing equipment
Bukreev V.G., Shandarova E.B., Rulevskiy V.M.
- 119
- Geochemical criterions for identifying reservoirs and predicting their petroleum potential (Vankor field)
Isaeva E.R., Voroshilov V.G., Timkin T.B., Mansour Ziail
- 132
- Testing a new alternative electric furnace for vermiculite concentrates heat treatment
Nizhegorodov A.I., Bryanskikh T.B., Gavrilin A.N., Moyzes B.B., Gradoboev A.V., Vavilova G.V., Tlusty J., Tuzikova V.
- 142
- Comparison of power transformer response waveforms obtained by nanosecond low-voltage impulse testing using determination coefficient
Kovrigin B.L., Lavrinovich A.V.
- 154
- Optimization of pellet impact drilling regimes by regulation of spacing between a drill bit and a hole bottom
Urnish V.V., Saruev L.A., Saruev A.L.
- 162

УДК 622.276

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КИСЛОТНЫХ СОСТАВОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ КОЛЛЕКТОРОВ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХСЯ РАЗЛИЧНОЙ КАРБОНАТНОСТЬЮ И СТРУКТУРОЙ ПУСТОТНОГО ПРОСТРАНСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

Мартюшев Дмитрий Александрович,
martyushevdi@inbox.ru

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Россия, 614990, г. Пермь, пр. Комсомольский, 29.

Актуальность работы обусловлена тем, что продуктивные карбонатные отложения нефтяных месторождений Пермского края характеризуются значительным разнообразием структурно-генетических типов пород и специфическим строением пустотного пространства. Разработка залежей со сложным строением пустотного пространства сопровождается трудностями в реализации высокоэффективной системы заводнения и, как следствие, снижением пластового давления и коэффициента продуктивности скважин. Для увеличения продуктивности скважин в карбонатных коллекторах проводят кислотное воздействие, эффективность которого зависит от карбонатности и особенностей структуры пустотного пространства обрабатываемых пород.

Цель работы: на основании лабораторных исследований оценить эффективность применяемых кислотных составов на нефтяных месторождениях Пермского края, характеризующихся различной карбонатностью и структурой пустотного пространства горных пород.

Методами исследования являлись прибор для определения карбонатности горных пород Карбонатомер КМ-04М, фильтрационные установки с моделированием пластовых условий УИК-5ВГ и АFS-300 и установка микрофокусной рентгеноסקопии.

Результаты. Для каждого типа пустотного пространства проведено моделирование кислотного воздействия с использованием двух распространенных составов, которые применяются на территории Пермского края, с определением коэффициента изменения проницаемости и рентгеномографическими исследованиями. Рентгеномографические эксперименты на одном образце керна выполнены дважды: до и после моделирования кислотного воздействия. Практически на всех образцах с изначально равномерно-поровой структурой пустотного пространства проведение кислотного воздействия привело к образованию выраженного высокопроводящего канала фильтрации – «червоточины». Фильтрационные исследования, проведенные на трещиноватых образцах Гагаринского месторождения, ни в одном случае не привели к сколь либо значимому результату: кислотные составы проходили сквозь трещины, не приводя к увеличению ни общей пустотности, ни проницаемости образцов. Установлено, что проникновение кислотного состава в зоны развития микротрещиноватости может привести к изменению направления кислотного воздействия; закачка кислотного состава в интервалы с выраженной трещиноватостью не приводит к высокой эффективности обработки. Установлено, что структура пустотного пространства и карбонатность горных пород нефтяных месторождений Пермского края являются факторами, которые определяют эффективность кислотного воздействия.

Ключевые слова:

Кислотные обработки, карбонатные коллектора, структура пустотного пространства, томографические исследования, фильтрационные исследования, микротрещиноватость, коэффициент восстановления проницаемости.

Введение

Значительная доля запасов углеводородов (около 65 % всех остаточных извлекаемых запасов) на территории Пермского края приурочена к карбонатным отложениям турнейско-фаменского и башкирского возраста. По данным [1–4], к основным особенностям данных коллекторов следует относить значительное разнообразие структурно-генетических типов пород, слагающих продуктивные пласты, а также специфическое строение их пустотного пространства. Для рассматриваемых объектов характерной чертой является снижение продуктивности скважин вследствие ухудшения энергетического состояния залежей, ввиду малоэффективной системы поддержания пластового давления [5–8]. В таких условиях зачастую прибегают к различным геолого-техническим мероприятиям [9, 10]. Одним из самых распространенных и простых химических методов, направленных на увеличение коэффициента продуктивности добывающих скважин, является проведение кислотных обработок. Несмотря на простоту метода и большой опыт проведения обработок, стоит серьезно относиться к планированию кислотного воздействия, так как по статистике око-

ло 40–45 % проведенных операций не достигают ожидаемого эффекта [11, 12].

Наличие в ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» значительного накопленного опыта проведения кислотных обработок по различным технологиям в различных геолого-физических условиях обуславливает необходимость проведения анализа и выделение критериев эффективного применения данного метода интенсификации добычи нефти.

Для решения поставленной задачи проведена серия лабораторных исследований с привлечением современных фильтрационных установок, таких как УИК-5ВГ и АFS-300, а также с целью изучения пустотного пространства рассматриваемых объектов и визуализации воздействия кислотных составов на горную породу (образование «червоточин») использована микрофокусная рентгеноסקопия [13–16].

При решении поставленной задачи использовались образцы керна карбонатных продуктивных отложений (одного возраста) нефтяных месторождений и два кислотных состава, которые наиболее распространены и применяются в настоящее время в ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ».

На начальном этапе исследований проведены лабораторные опыты в свободном объеме, включающие в себя: эффективность замедлителей, которые используются в тестируемых составах; оценка времени нейтрализации кислотных составов горной породой; коррозионная активность кислотных составов; взаимодействие с пластовыми флюидами (вода и нефть). Оба кислотных состава в этой серии экспериментов продемонстрировали положительные результаты.

Важно отметить, что характерной особенностью нефтяных месторождений Пермского края является различие в карбонатности (содержание кальцита, доломита и нерастворимого осадка) и в строении пустотного пространства горных пород в зависимости от их географического расположения. На рис. 1 представлена карта Пермского края с месторождениями, по которым изучалась карбонатность и строение пустотного пространства горных пород. Стоит отметить, что месторождения, расположенные на юге Пермского края, характеризуются идентичным строением пустотного пространства и карбонатностью горных пород и поэтому они условно объединены в южную группу ме-

сторождений. Из представленных моделей по южной группе месторождений видно, что преобладает поровая структура, без явно выраженных каверн и трещин. Исследуемая структура пустотного пространства месторождений, находящихся на севере Пермского края, характеризуется своим разнообразием. В ходе томографии выделены образцы с явно выраженной трещиноватостью (Гагаринское месторождение), микротрещиноватостью (Озерное месторождение), с равномерной пористостью (Маговское месторождение и южная группа месторождений) и неравномерной пористостью (Уньвинское месторождение и месторождение им. Сухарева).

Томография образцов ядра карбонатных отложений Пермского края продемонстрировала сложность строения их пустотного пространства. Как видно из рис. 1, продуктивные отложения, расположенные в относительной близости друг от друга, характеризуются самой разнообразной структурой пустотного пространства.

С учетом разнообразной структуры пустотного пространства карбонатных коллекторов Пермского края проведены исследования эффективности кислотного воздействия. Рентгеномографиче-

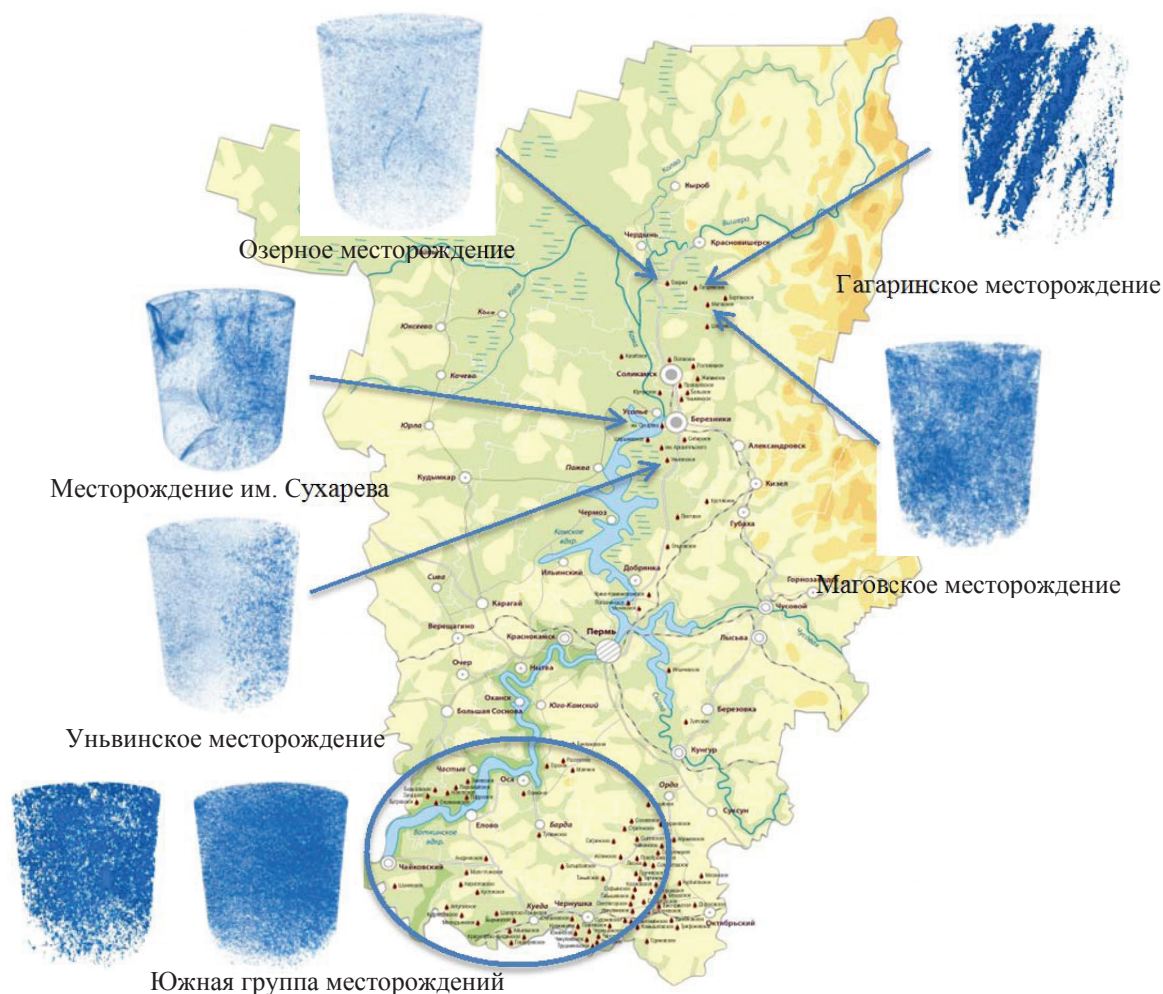


Рис. 1. Структура пустотного пространства горных пород нефтяных месторождений Пермского края

Fig. 1. Structure of the rocks void in the oil fields of the Perm Krai

ские эксперименты на одном образце керна выполнены дважды: до и после моделирования кислотного воздействия. Использование 3D-моделей образцов керна позволяет визуализировать и учесть структуру пустотного пространства до моделирования кислотной обработки и более полно и всесторонне подойти к анализу результатов и эффективности этого воздействия.

Оценка карбонатности горных пород

Карбонатность горных пород – содержание кальцита, доломита и нерастворимого осадка, является важным параметром, от которого зависит эффективность кислотного воздействия. Карбонатность горных пород определялась с помощью прибора Карбонатомера КМ-04М. На рис. 2. представлена диаграмма соотношения «кальцит–доломит–нерастворимый осадок» для различных нефтяных месторождений Пермского края.

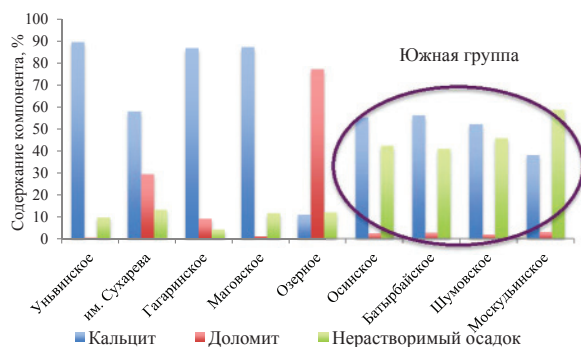


Рис. 2. Карбонатность горных пород нефтяных месторождений Пермского края

Fig. 2. Carbonate content of rocks of oil deposits of the Perm Krai

Как следует из анализа представленных данных, максимальное содержание кальцита, обуславливающее высокую эффективность кислотного воздействия, характерно для образцов керна Уньвинского, Гагаринского и Маговского месторождений. Для месторождения им. Сухарева и Озерного месторождения характерно повышенное содержание доломита, менее эффективно реагирующего с соляной кислотой, нежели кальцит. Для месторождений южной группы отмечается значительное содержание нерастворимого осадка, что является фактором, снижающим эффективность кислотного воздействия.

Исходя из данных о карбонатности горных пород и томографических исследований образцов горных пород проведено моделирование кислотного воздействия.

Проведение фильтрационных исследований

Основным параметром, характеризующим эффективность кислотного воздействия по данным фильтрационных экспериментов, принята величина коэффициента восстановления проницаемости. Данный коэффициент представляет собой отношение проницаемости образца по нефти после моде-

лирования кислотной обработки к значению этой проницаемости до воздействия [17–23].

Практически на всех образцах с изначально равномерно-поровой структурой пустотного пространства проведение кислотного воздействия привело к образованию выраженного высокопроницающего канала фильтрации – «червоточины». В качестве примера на рис. 3 представлены результаты рентгеновской томографии таких образцов после обработок.

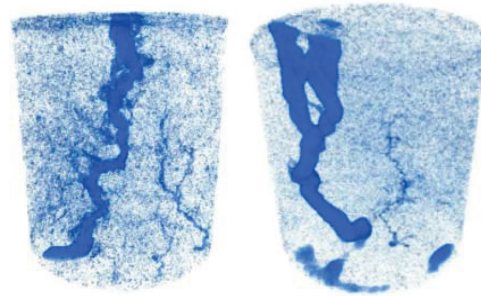


Рис. 3. Структуры пустотного пространства образцов после кислотного воздействия

Fig. 3. Structures of the void space of the samples after acid treatment

Значительный интерес представляют результаты фильтрационных экспериментов на трещиноватых образцах Гагаринского месторождения. Проведение серии таких опытов ни в одном случае не привело к сколь-либо значимому результату: кислотные составы проходили сквозь трещины, не приводя к увеличению ни общей пустотности, ни проницаемости образцов (рис. 4). В целом эффективность обработки следует считать низкой (таблица).

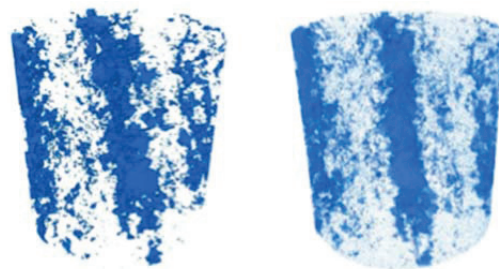


Рис. 4. Изменения структуры пустотного пространства трещиноватого образца

Fig. 4. Changes in the structure of the fractured sample voids

Моделирование кислотной обработки на образцах керна, характеризующихся наличием микротрещин, также сопровождалось образованием высокопроницающего канала: слева образец керна до кислотного воздействия, справа – после (рис. 5).

Образцы керна южной группы месторождений и Маговского месторождения характеризуются выраженной поровой структурой пространства; поры четко выраженные, достаточно крупные и равномерно распределены по объему образца. Как следует из анализа результатов томографии, в ходе

кислотного воздействия образовался высокопроводящий канал: слева образец керна до кислотного воздействия, справа – после (рис. 6). Визуально более отчетливо высокопроводящий канал выделяется на срезах (рис. 7), нежели на 3D-модели пустот.

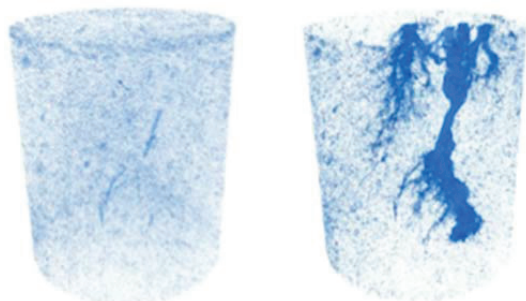


Рис. 5. Изменение структуры пустотного пространства образца с микротрещиноватостью

Fig. 5. Change in the void structure of the sample with microfractures

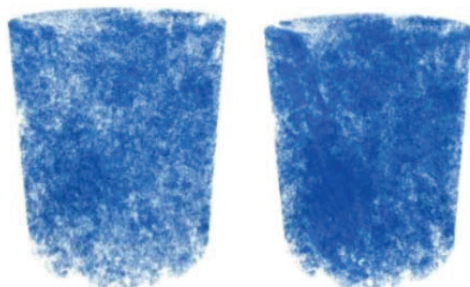


Рис. 6. Изменение структуры пустотного пространства образца с выраженной поровой структурой

Fig. 6. Change in the void structure of a sample with a pronounced pore structure

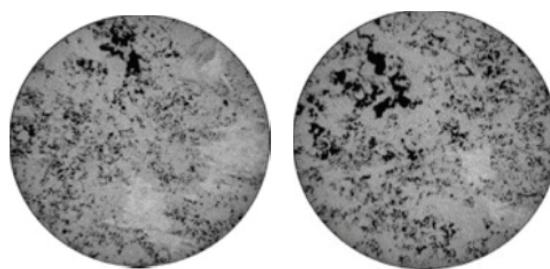


Рис. 7. Изменение структуры пустотного пространства образца с выраженной поровой структурой (срезы)

Fig. 7. Change in the void structure of a sample with a pronounced pore structure (slices)

Обобщенные результаты по изменению проницаемости образцов керна в результате моделирования на них кислотных обработок представлены в таблице.

Из полученных данных можно сделать вывод, что структура пустотного пространства и карбонатность горных пород нефтяных месторождений Пермского края являются факторами, которые обуславливают эффективность кислотного воздействия. Наименьший прирост проницаемости после кислотного моделирования отмечается на месторождении им. Сухарева, горная порода которого характеризуется повышенным содержанием доломита и нерастворимого осадка, и на Гагаринском месторождении, для которого характерно наличие явно выраженной трещиноватости. Таким образом, проведение кислотных обработок рассмотренными составами на данных месторождениях является нецелесообразным мероприятием. Для остальных рассматриваемых объектов получены значительные приросты коэффициента восстановления проницаемости.

Таблица. Изменение проницаемости образцов керна в результате моделирования на них кислотных обработок

Table. Results of the change in permeability of core samples due to simulation of acid treatments on them

Месторождение Field	Количество опытов, КС1/КС2 Number of experiments, acid composition1/acid composition2	Объем прокачки кислотного состава в объемах пор Volume of pumping acid composition in the pore volume	Диапазон изменения коэффициента проницаемости/среднее значение Range of change in permeability change coefficient/average value
Уньвинское Unvinskoe	7/7	1-2	$\frac{54,7 - 4795,1}{708,6} / \frac{36,8 - 3407,7}{757,4}$
им. Сухарева Sukharev	5/5		$\frac{2,4 - 18,1}{5,9} / \frac{2,4 - 92,1}{11,2}$
Гагаринское Gagarinskoe	5/5		$\frac{0,5 - 6,6}{2,4} / \frac{0,06 - 7,13}{2,8}$
Маговское Magovskoye	6/6		$\frac{144,7 - 4771,0}{1209,7} / \frac{8562,8 - 56160,5}{18563,9}$
Озерное Ozernoye	7/7		$\frac{100,2 - 2297,2}{833,1} / \frac{0,9 - 679,2}{267,8}$
Южная группа Southern group	12/12		$\frac{13,2 - 501,8}{202,7} / \frac{16,7 - 39487,9}{1114,7}$

Также стоит отметить, что наличие в горной породе микротрещиноватости (техногенной или естественной) влияет на направление образовавшегося канала фильтрации: направление канала изменяется после достижения плоскости развития трещины (рис. 5).

Заключение

Таким образом, выполненные фильтрационные и томографические исследования по моделированию кислотного воздействия на карбонатные отложения месторождений Пермского края позволили установить следующее:

- продуктивные карбонатные отложения месторождений Пермского края характеризуются

разнообразной и сложной структурой пустотного пространства;

- кислотное воздействие необходимо проводить с учетом карбонатности и строения пустотного пространства горных пород;
- проникновение кислотного состава в зону развития микротрещиноватости может привести к изменению направления кислотного воздействия, что необходимо учитывать, особенно вблизи водонасыщенных интервалов пласта;
- проведение кислотных обработок рассмотренными составами на месторождении им. Сухарева и Гагаринском месторождении, в связи с незначительным приростом коэффициента проницаемости, является нецелесообразным мероприятием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Викторин В.Д. Влияние особенностей карбонатных коллекторов на эффективность разработки нефтяных залежей. – М.: Недра, 1988. – 150 с.
2. Денк С.О. Нетипичные продуктивные объекты Пермского Предуралья. – Пермь: ПермНИПИнефть, 1997. – 328 с.
3. Путилов И.С. Разработка технологий комплексного изучения геологического строения и размещения месторождений нефти и газа. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 285 с.
4. Определение параметров трещиноватости пород на основе комплексного анализа данных изучения керна, гидродинамических и геофизических исследований скважин / С.С. Черепанов, И.Н. Пономарева, А.А. Ерофеев, С.В. Галкин // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 2. – С. 94–96.
5. Оценка влияния естественной трещиноватости коллектора на динамику продуктивности добывающих скважин Озерного месторождения / В.А. Мордвинов, Д.А. Мартюшев, Т.С. Ладейщикова, Н.П. Горланов // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2015. – № 14. – С. 32–38.
6. Мордвинов В.А., Мартюшев Д.А., Пузиков В.И. Оценка влияния естественной трещиноватости коллектора на динамику продуктивности добывающих скважин сложнопостроенной нефтяной залежи // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 11. – С. 120–122.
7. Лекомцев А.В., Мордвинов В.А. К оценке забойных давлений при эксплуатации скважин электроцентробежными насосами // Научные исследования и инновации. – 2011. – Т. 5. – № 4. – С. 29–32.
8. К прогнозированию темпов снижения добычи нефти по данным истории разработки нефтяных залежей / М.К. Анурьев, Т.М. Гуляева, А.В. Лекомцев, Д.В. Чернышев // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2013. – Т. 12. – № 6. – С. 93–100.
9. 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. Колычев // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2015. – № 15. – С. 81–89.
10. Распов А.В., Новокрещенных Д.В. Анализ результатов применения методов интенсификации на карбонатных коллекторах месторождений Пермского края // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2014. – № 10. – С. 73–82.
11. Modeling and simulation of wormhole formation during acidization of fractured carbonate rocks / Piyang Liu, Jun Yao, Gary Douglas Couplés, Jingsheng Ma, Hai Sun // Journal of Petroleum Science and Engineering. – June 2017. – V. 154. – P. 284–301.
12. Distinguishing between carbonate and non-carbonate precipitates from the carbonation of calcium-containing organic acid leachates / R.M. Santos, Yi Wai Chiang, J. Elsen, T. van Gerven // Hydrometallurgy. – August 2014. – V. 147–148. – P. 90–94.
13. Опыт исследования керна карбонатных отложений методом рентгеновской томографии / А.А. Ефимов, Я.В. Савицкий, С.В. Галкин, С. Шапиро // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2016. – № 18. – С. 23–32.
14. Савицкий Я.В. Современные возможности метода рентгеновской томографии при исследовании керна нефтяных и газовых месторождений // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2015. – № 15. – С. 28–37.
15. X-ray microtomography of hydrochloric acid propagation in carbonate rocks / A.C. Machado, T.J.L. Oliveira, F.B. Cruz, R.T. Lopes, I. Lima // Applied Radiation and Isotopes. – February 2015. – V. 96. – P. 129–134.
16. Numerical simulation and X-ray imaging validation of wormhole propagation during acid core-flood experiments in a carbonate gas reservoir / Alireza Safari, Mojtaba Moradi Dowlatabad, Ali Hassani, Fariborz Rashidi // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – March 2016. – V. 30. – P. 539–547.
17. Влияние характеристик образцов и условий проведения экспериментов на эффективность применения кислотных составов / В.И. Галкин, Г.П. Хижняк, А.М. Амиров, Е.А. Гладких // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 9. – С. 30–33.
18. Lan-Anh Phan Thi, Huu-Tuan Do, Shang-Lien Lo. Enhancing decomposition rate of perfluorooctanoic acid by carbonate radical assisted sonochemical treatment // Ultrasonics Sonochemistry. – September 2014. – V. 21. – Iss. 5. – P. 1875–1880.
19. Tomohito Kameda, Masahito Tochinal, Toshiaki Yoshioka. Treatment of hydrochloric acid using Mg–Al layered double hydroxide intercalated with carbonate // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. – 25 July 2016. – V. 39. – P. 21–26.
20. Naizhen Liu, Ming Liu. Simulation and analysis of wormhole propagation by VES acid in carbonate acidizing // Journal of Petroleum Science and Engineering. – February 2016. – V. 138. – P. 57–65.
21. Snoeck Ch., Pellegrini M. Comparing bioapatite carbonate pre-treatments or isotopic measurements: P. 1. Impact on structure and chemical composition // Chemical Geology. – 6 December 2015. – V. 417. – P. 394–403.
22. Burgos-Cara A., Ruiz-Agudo E., Rodriguez-Navarro C. Effectiveness of oxalic acid treatments for the protection of marble surfaces // Materials & Design. – 5 February 2017. – V. 115. – P. 82–92.
23. Carbonate acidizing: Modeling, analysis, and characterization of wormhole formation and propagation / Mehdi Ghommem, Weishu Zhao, S. Dyer, Xiangdong Qiu, D. Brady // Journal of Petroleum Science and Engineering. – July 2015. – V. 131. – P. 18–33.

Поступила 01.11.2017 г.

Информация об авторах

Мартюшев Д.А., младший научный сотрудник Научно-образовательного центра «Геология и разработка нефтяных и газовых месторождений» Пермского национального исследовательского политехнического университета.

UDC 622.276

LABORATORY STUDIES OF ACID COMPOSITIONS FOR TREATING RESERVOIR, CHARACTERIZED BY VARIOUS CARBONATE CONTENT AND VOID STRUCTURE OF ROCKS

Dmitry A. Martyushev,

martyushevdi@inbox.ru

Perm National Research Polytechnic University,
29, Komsomolskiy avenue, Perm, 614990, Russia.

The relevance of the research is caused by the fact that the productive carbonate deposits of oil fields of Perm Krai are characterized by a considerable variety of structural-genetic types of rocks and void specific structure. The exploration of deposits with void complex structure is accompanied by the difficulties in implementing a highly efficient water flooding system and, as a consequence, reducing reservoir pressure and well productivity. To increase wells productivity in carbonate reservoirs the acid treatment is carried out. The effectiveness of acidic exposure is advisable to perform taking into account the peculiarities of the void structure and the carbonation of the rocks being treated.

The main aim of the study is to carry out the laboratory studies for assessing the effectiveness of acidic compounds in the oil fields of Perm Krai, characterized by different carbonate content and the structure of rocks void.

The methods: a device for determining the carbonate content of rocks, carbonatometer KM-04M, filtration units with simulation of formation conditions of UIP-5VG and AFS-300 and microfocus fluoroscopy.

The results. For each type of void the authors have simulated the acid effect using two common compositions applied in Perm Krai, determining a permeability change factor and with X-ray tomography studies. X-ray tomography experiments on a single core sample were performed twice: before and after modeling the acid effect. The acidic effect almost on all samples with an initially uniformly porous structure of the void, led to formation of a pronounced highly conducting filtration channel – the «wormhole». The filtration studies carried out on fractured samples of the Gagarinskoe field did not lead to any significant result: the acid compositions passed through the cracks without leading to an increase in either the total voidness or the permeability of the samples. It was determined that acid composition penetration into microfractures development zone can lead to a change in the acidic effect direction; acid composition injection into intervals with pronounced fracturing does not lead to high processing efficiency. It was determined that the void structure and the carbonate content of the rocks of the oil fields in Perm Krai are the factors that determine the effectiveness of the acid effect.

Key words:

Acid treatments, carbonate reservoirs, void structure, tomography studies, filtration research, microfractures, coefficient of permeability recovery.

REFERENCES

- Victorin V.D. *Vliyaniye osobennostey karbonatnykh kolektorov na effektivnost razrabotki neftyanykh zalezhey* [Influence of features of carbonate reservoirs on the efficiency of development of oil deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 150 p.
- Denk S.O. *Netipichnye produktivnye obekty Permskogo Preduralya* [Unusual productive objects of the Perm Ural region]. Perm, PermNIPIneft Publ., 1997. 328 p.
- Putilov I.S. *Razrabotka technology kompleksnogo izucheniya geologicheskogo stroeniya i razmeshcheniya mestorozhdeniy nefti i gaza* [Development of technologies for a comprehensive study of the geological structure and location of oil and gas fields]. Perm, Perm National Research Polytechnic University Publ. house, 2014. 285 p.
- Cherepanov S.S., Ponomareva I.N., Erofeev A.A., Galkin S.V. Determination of fracture parameters of rocks on the basis of complex analysis of core data, hydrodynamic and geophysical studies of wells. *Oil Industry*, 2014, no. 2, pp. 94–96. In Rus.
- Mordvinov V.A., Martyushev D.A., Ladeyschikova T.S., Gorlanov N.P. Evaluation of the effect of the natural fracturing of the reservoir on the dynamics of the productivity of the producing wells of the Ozeroye deposit. *Bulletin PNIPU. Geology. Oil and gas and mining*, 2015, no. 14, pp. 32–38. In Rus.
- Mordvinov V.A., Martyushev D.A., Puzikov V.I. Evaluation of the effect of the natural fracturing of the reservoir on the dynamics of the productivity of producing wells of a complexly built oil deposit. *Oil Industry*, 2014, no. 11, pp. 120–122. In Rus.
- Lekomtsev A.V., Mordvinov V.A. To the evaluation of bottomhole pressures during well operation by electric centrifugal pumps. *Scientific researches and innovations*, 2011, vol. 5, no. 4, pp. 29–32. In Rus.
- Anuriev M.K., Gulyaeva T.M., Lekomtsev A.V., Chernyshev D.V. To predict the rate of decline in oil production according to the history of the development of oil deposits. *Bulletin PNIPU. Geology. Oil and gas and mining*, 2013, vol. 12, no. 6, pp. 93–100. In Rus.
- Ilyushin P.Yu., Rakhimzyanov R.M., Soloviev D.Yu., Kolychev I.Yu. Analysis of geological and technical measures to increase the productivity of production wells in the oil fields of the Perm Territory. *Bulletin PNIIP. Geology. Oil and gas and mining*, 2015, no. 15, pp. 81–89. In Rus.
- Raspopov A.V., Novokreshcheny D.V. Analysis of the results of application of the methods of intensification on the carbonate reservoirs of the Perm Krai deposits. *Bulletin PNIPU. Geology. Oil and gas and mining*, 2014, no. 10, pp. 73–82. In Rus.
- Piyang Liu, Jun Yao, Gary Douglas Couples, Jingsheng Ma, Hai Sun. Modeling and simulation of wormhole formation during acidization of fractured carbonate rocks. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, June 2017, vol. 154, pp. 284–301.
- Santos R.M., Yi Wai Chiang, Elsen J., Van Gerven T. Distinguishing between carbonate and non-carbonate precipitates from the carbonation of calcium-containing organic acid leachates. *Hydrometallurgy*, August 2014, vol. 147–148, pp. 90–94.
- Efimov A.A., Savitsky Ya.V., Galkin S.V., Shapiro S. Experience in the study of the core of carbonate deposits by the X-ray tomography method. *Bulletin PNIIP. Geology. Oil and gas and mining*, 2016, no. 18, pp. 23–32. In Rus.
- Savitsky Ya.V. Modern possibilities of the method of X-ray tomography in the study of cores of oil and gas deposits. *Bulletin PNIPU. Geology. Oil and gas and mining*, 2015, no. 15, pp. 28–37. In Rus.
- Machado A.C., Oliveira T.J.L., Cruz F.B., Lopes R.T., Lima I. X-ray microtomography of hydrochloric acid propagation in car-

- bonate rocks. *Applied Radiation and Isotopes*, February 2015, vol. 96, pp. 129–134.
16. Alireza Safari, Mojtaba Moradi Dowlatabad, Ali Hassani, Fari-borz Rashidi. Numerical simulation and X-ray imaging validation of wormhole propagation during acid core-flood experiments in a carbonate gas reservoir. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, March 2016, vol. 30, pp. 539–547.
 17. Galkin V.I., Khizhnyak G.P., Amirov A.M., Gladkikh E.A. Influence of characteristics of samples and conditions of carrying out of experiments on efficiency of application of acid compositions. *Oil industry*, 2015, no. 9, pp. 30–33. In Rus.
 18. Lan-Anh Phan Thi, Huu-Tuan Do, Shang-Lien Lo. Enhancing decomposition rate of perfluorooctanoic acid by carbonate radical assisted sonochemical treatment. *Ultrasonics Sonochemistry*, September 2014, vol. 21, Iss. 5, pp. 1875–1880.
 19. Tomohito Kameda, Masahito Tochinai, Toshiaki Yoshioka. Treatment of hydrochloric acid using Mg–Al layered double hydroxide intercalated with carbonate. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 25 July 2016, vol. 39, pp. 21–26.
 20. Naizhen Liu, Ming Liu. Simulation and analysis of wormhole propagation by VES acid in carbonate acidizing. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, February 2016, vol. 138, pp. 57–65.
 21. Snoeck Ch., Pellegrini M. Comparing bioapatite carbonate pretreatments or isotopic measurements: P. 1. Impact on structure and chemical composition. *Chemical Geology*, 6 December 2015, vol. 417, pp. 394–403.
 22. Burgos-Cara A., Ruiz-Agudo E., Rodriguez-Navarro C. Effectiveness of oxalic acid treatments for the protection of marble surfaces. *Materials & Design*, 5 February 2017, vol. 115, pp. 82–92.
 23. Mehdi Ghommem, Weishu Zhao, Dyer S., Xiangdong Qiu, Brady D. Carbonate acidizing: Modeling, analysis, and characterization of wormhole formation and propagation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, July 2015, vol. 131, pp. 18–33.

Received: 1 November 2017.

Information about the authors

Dmitry A. Martyushev, junior researcher, Perm National Research Polytechnic University.

УДК 622.24.05

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО УГЛА ПОДЪЕМА ЛОПАСТЕЙ НА СПИНКЕ ЛАПЫ ШАРОШЕЧНОГО ДОЛОТА ДЛЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО БУРЕНИЯ

Гиниятов Данил Саматович¹,
giniyatovds@yandex.ru

Ямалиев Виль Узбекович²,
vilyzich@yandex.ru

¹ Научно-производственное предприятие ООО НПП «БУРИНТЕХ»,
Россия, 450029, г. Уфа, ул. Юбилейная, 4/1.

² Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Россия, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработать шарошечного долота с системой дополнительной механической очистки для интенсификации процесса выноса выбуренной породы при горизонтальном бурении и уменьшения износа вооружения и калибрующей части долота.

Цель исследования: определение оптимального угла подъема винтовой поверхности лопастей системы дополнительной механической очистки шарошечного долота, соответствующего максимальной интенсивности процесса осевого транспортирования бурового шлама.

Объект: процесс транспортирования бурового шлама при различных значениях угла подъема наклонной поверхности.

Методика: экспериментальные стендовые исследования изменения времени осевого транспортирования различных образцов бурового шлама пяти типов горных пород (песчаных, глинистых, карбонатных, сульфатных и галоидных) в зависимости от угла подъема наклонной поверхности; статистический и регрессионный анализ полученных экспериментальных данных.

Результаты. Разработан и изготовлен экспериментальный стенд для исследования изменения времени осевого транспортирования шлама в зависимости от угла подъема наклонной поверхности. Разработана методика определения оптимального значения угла подъема лопастей на спинке лапы шарошечного долота, соответствующего максимальной интенсивности транспортирования образцов бурового шлама. Проведены экспериментальные исследования и статистически обработаны результаты исследования осевого транспортирования образцов бурового шлама пяти типов горных пород при различных значениях угла подъема наклонной поверхности. С достоверностью 99 % установлено, что оптимальное значение угла подъема лопастей на спинке лапы шарошечного долота с системой дополнительной механической очистки забоя горизонтальной скважины лежит в пределах 18–22° при бурении интервалов, представленных песчаными, глинистыми, карбонатными, сульфатными и галоидными горными породами, при промывке раствором на водной основе.

Ключевые слова:

Горизонтальная скважина; оседание бурового шлама; транспортирование выбуренной породы; винтовые лопасти; угол подъема.

Введение

Своевременное удаление выбуренной породы при бурении горизонтальных скважин значительно осложняется в сравнении с процессом очистки ствола при вертикальном бурении. При горизонтальном расположении скважины поток промывочной жидкости воздействует на частички выбуренной породы перпендикулярно направлению их оседания. Все это ухудшает эффективность очистки ствола скважины потоком промывочной жидкости и приводит к оседанию бурового шлама на нижней стенке скважины, образуя шламовые подушки не только по всему стволу горизонтальной скважины, но и в области работы долота [1–6].

Бурение в условиях несвоевременного выноса бурового шлама в наддолотное пространство обуславливает повторное перемалывание уже выбуренной породы, что влечет за собой снижение ресурса вооружения породоразрушающего инструмента. В зависимости от свойств разрушаемой горной породы недостаточная очистка забоя скважины порождает дополнительные осложнения. Так, при бурении твердых и абразивных горных пород

вышеописанный процесс приводит к повышенному износу цилиндрической части долота, а при бурении глинистых пород – к образованию сальников [7–14].

С целью интенсификации процесса выноса выбуренной породы из застойных зон в области работы долота горизонтальной скважины, с которыми не справляется традиционная система промывки, предложено применение системы дополнительной механического транспортирования выбуренной горной породы в наддолотное пространство.

Техническое решение дополнительного механического транспортирования заключается в выполнении винтовых лопастей на поверхности спинок лап шарошечного долота, предназначенных для перемещения выбуренной породы по нижней части стенки скважины, подобно перемещению шлама при шнековом бурении [15].

Цель статьи – определение оптимального угла подъема винтовой поверхности лопастей системы дополнительной механической очистки шарошечного долота, соответствующего максимальной интенсивности осевого транспортирования образцов

бурового шлама из пяти типов горных пород (песчаных, глинистых, карбонатных, сульфатных и галоидных).

Шарошечное долото с системой дополнительной механической очистки для горизонтального бурения

На рис. 1 представлено шарошечное долото для горизонтального бурения с системой дополнительной механической очистки, заключающейся в выполнении на спинке лапы 2–3 рядов винтовых лопастей, цилиндрические поверхности которых защищены от абразивного износа рядом запрессованных твердосплавных зубков. Цилиндрические поверхности винтовых лопастей имеют номинальный диаметр долота, что обеспечивает открытие дополнительных каналов между стенкой ствола скважины и спинками лап шарошечного долота для истечения промывочной жидкости и выноса бурового шлама в наддолотное пространство.

Система механической очистки долота не является основной, а предназначена для очистки застойных зон, с которыми не справляется существующая промывка долота. Поэтому предлагаемая система механической очистки названа дополнительной. Скоростной напор промывочной жидкости способствует перемещению выбуренной породы по винтовым лопастям на спинке лапы долота и создает дополнительный запас надежности по выносу шлама в наддолотное пространство.



Рис. 1. Шарошечное долото для горизонтального бурения

Fig. 1. Roller-cone bit for horizontal drilling

В процессе бурения и соответственного вращения породоразрушающего инструмента винтовые лопасти выносят частички выбуренной породы в наддолотное пространство за счет шнекового эффекта и предотвращают повторное перемалывание их на забое скважины, тем самым снижая износ вооружения. Цилиндрические поверхности винтовых лопастей, имеющих номинальный диаметр и армирование, стабилизируют положение долота внутри ствола и дополнительно калибруют поперечное сечение горизонтальной скважины, что снижает ударные нагрузки на опорные элементы шарошек, соответственно, увеличивая их ресурс и ресурс всего долота в целом.

Характеристика объекта исследований

На рис. 2 показана секция шарошечного долота с системой дополнительной механической очистки, включающая шарошку – 1 и лапу – 2, на которой выполнены два ряда лопастей – 3 и 4. На других секциях также выполнены два или три ряда лопастей, которые размещены на лапах так, чтобы обеспечить полное перекрытие стенки скважины в пределах высоты долота. Основным вопросом при разработке данного долота является определение угла подъема β винтовых поверхностей лопастей – 3, 4 на спинках лап – 2.

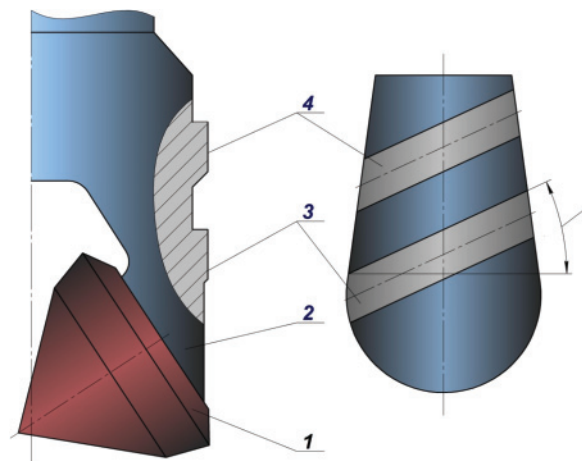


Рис. 2. Секция шарошечного долота с системой дополнительной механической очистки: 1 – шарошка, 2 – лапа, 3 – лопасть 1-го ряда, 4 – лопасть 2-го ряда

Fig. 2. Roller-cone bit section with additional mechanical cleaning system: 1 is the roller-cone, 2 is the leg, 3 is the first-row blade, 4 is the second-row blade

С целью обоснования выбора величины угла подъема β винтовой поверхности лопасти проведены аналитические исследования влияния величины угла на механическое транспортирование выбуренной породы из области работы долота [16, 17]. В результате получена зависимость осевой силы F , под действием которой происходит транспортирование породы, от величины угла β подъема винтовых лопастей на спинке лапы долота (рис. 3).

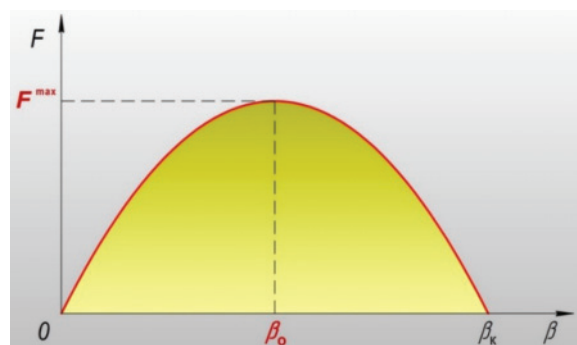


Рис. 3. Общая зависимость величины осевой силы от угла подъема

Fig. 3. General dependence of axial force value on an elevation angle

С увеличением угла β осевая сила F растет и, достигая своего максимума, уменьшается до нулевого значения. При этом нулевое значение осевой силы F соответствует критическому значению угла подъема β_k , при котором происходит остановка скольжения шлама относительно поверхности лопасти и начало его вращения вместе с лопастью и с долотом в целом. При значении угла подъема β меньше критического β_k шлам продолжает скользить относительно винтовой поверхности лопасти и перемещается вдоль стенки скважины под действием осевой силы F . При этом сила F достигает своего максимального значения F^{\max} в точке перегиба и соответствует оптимальному значению угла подъема β_0 [18].

Аналитическими исследованиями установлено [18], что оптимальное значение угла подъема β_0 зависит также от коэффициентов внешнего трения шлама по металлу лопасти f и по горной породе стенки скважины f_d . При этом увеличение коэффициента трения шлама по металлу лопасти f приводит к уменьшению максимального значения осевой силы F_0 и оптимального значения угла подъема β_0 . Это обосновывает выбор оптимального значения угла подъема β_0 также в зависимости от типа разбуриваемых горных пород, что требует проведения экспериментальных исследований.

Экспериментальный стенд и методика исследования

Аналитические исследования взаимодействия горной породы и винтовой поверхности лопасти велись в двумерной плоскости. В экспериментальной модели концентричное вращение лопасти относительно оси скважины заменяется поступательным движением, и для достижения перемещения лопасти относительно стенки скважины выбрана модель транспортерной ленты.

Направляющая, имитирующая лопасть, устанавливается под углом β к транспортерной ленте, имитирующей стенку скважины. При движении лента захватывает исследуемый образец горной породы и транспортирует ее в сторону направляющей. В последующем начинается скольжение горной породы по направляющей, имитируя процесс транспортирования бурового шлама по винтовой поверхности лопасти.

На основе вышеописанной модели разработан и изготовлен экспериментальный стенд для исследования изменения времени осевого транспортирования шлама в зависимости от угла подъема наклонной поверхности (рис. 4).

Экспериментальный стенд имеет следующую конструкцию: лента – 1 приведена во взаимодействие с ведомым барабаном – 2 и ведущим барабаном – 3, которые установлены через подшипники качения на осях – 4 и 5 соответственно. Ось – 4 зафиксирована на опорах ведомого барабана – 6, а ось – 5 – на опорах ведущего барабана – 7. Направляющая – 8 зафиксирована над лентой – 1 с помощью опор – 9 и 10. При этом опора – 10 и направляющая – 8 выполнены с возможностью измене-

ния положения направляющей – 8 относительно опоры – 10 с целью регулирования угла β . Ведущий барабан – 3 приведен во взаимодействие через ременную передачу – 11 со шкивом – 12 смонтированного на выходном валу – 13 редуктора – 14. Входной вал редуктора – 15 соединен с валом – 16 электродвигателя – 17 через муфту – 18. Электродвигатель – 17 питается от сети и включается в нее через вилку – 19. При этом в электросеть между электродвигателем – 17 и вилкой – 19 включен тумблер – 20, который переключается между режимами «включен» и «выключен» с помощью переключателя – 21.

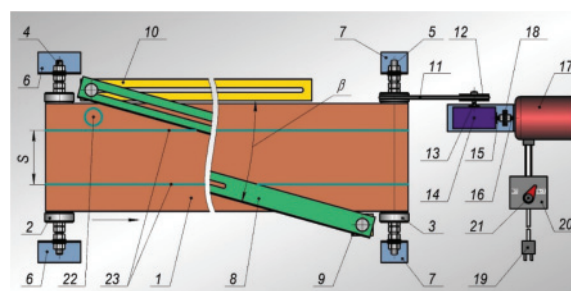


Рис. 4. Экспериментальный стенд для исследования изменения времени осевого транспортирования шлама в зависимости от угла подъема наклонной поверхности. 1 – лента; 2 – ведомый барабан; 3 – ведущий барабан; 4, 5 – оси барабанов; 6, 7 – опоры барабанов; 8 – направляющая; 9 – опора направляющей; 10 – регулируемая опора направляющей; 11 – ремень; 12 – шкив; 13 – выходной вал; 14 – редуктор; 15 – входной вал; 16 – вал электродвигателя; 17 – электродвигатель; 18 – муфта; 19 – вилка; 20 – тумблер; 21 – переключатель; 22 – зона загрузки; 23 – линии отсчета

Fig. 4. Test bench for studying the time change in rock transportation depending on the value of the elevation angle of the inclined surface: 1 is the tape; 2 is the driven drum; 3 is the lead drum; 4, 5 are the drum axes; 6, 7 are the drum supports; 8 is the guide; 9 is the guide support; 10 is the adjustable guide rail; 11 is the belt; 12 is the pulley; 13 is the output shaft; 14 is the reducer; 15 is the input shaft; 16 is the motor shaft; 17 is the motor; 18 is the coupling; 19 is the electric socket; 20 is the toggle; 21 is the switch; 22 is the loading zone; 23 are the reference lines

Экспериментальный стенд работает следующим образом. При подключении вилки – 19 к электросети и включении тумблера – 20 электродвигатель – 17 приводится в действие и через муфту – 18 вращает входной вал – 15 редуктора – 14. Выходной вал – 13 редуктора – 14 через шкив – 12 и ременную передачу – 11 вращает ведущий барабан – 3. Ведущий барабан – 3 приводит в движение ленту – 1, которая с противоположной стороны стенда приведена во взаимодействие с ведомым барабаном – 2, имеющим возможность свободного вращения через подшипники качения. При этом лента – 1 приходит в движение и транспортирует породу из зоны загрузки – 22 в направлении, которое указано стрелкой на рис. 4.

Методология проведения опыта на экспериментальном стенде выглядит следующим образом. На-

правляющая – 8 устанавливается относительно транспортной ленты – 1 на исследуемое значение угла подъема β , и в зону загрузки – 22 укладывается исследуемый буровой шлам. При этом буровой шлам представляет собой измельченную горную породу, смешанную с водой до получения однородной массы. После включения электродвигателя – 17 начинается движение ленты – 1, которая захватывает буровой шлам и транспортирует его по рабочей поверхности направляющей – 8. При достижении буровым шламом первой линии отсчета – 23 засекается время начала опыта, а достижение шламом второй линии отсчета – 23 знаменует окончание опыта. Далее электродвигатель – 17 отключается, а полученное время осевого транспортирования шлама t заносится в журнал.

Результаты экспериментальных исследований

Экспериментальное исследование представляет собой пять параллельных однофакторных экспериментов с регулируемым фактором – углом подъема наклонной поверхности β , равным: 15° , 20° , 25° , 30° и 35° . Исследование проводилось отдельно для образцов пяти типов горных пород: глинистого песчаника, ангидрита, известняка, песчаника среднезернистого с карбонатным цементом и углистого сланца. Переменным откликом выбрано время осевого транспортирования образцов бурового шлама на постоянное расстояние $S=100$ мм (рис. 4).

Все ряды полученных значений времени осевого транспортирования проверены на нормальность распределения по критерию Шапиро–Уилка. Установлено, что вид распределения всех полученных значений времени осевого транспортирования не противоречит нормальному закону [19, 20].

Для всех рядов значений времени осевого транспортирования определены границы доверительных интервалов с надежностью 99 %. К дальнейшему анализу привлекались значения времени осевого транспортирования, входящие в соответствующие доверительные интервалы. Полученные в ходе опытов значения времени транспортирования пересчитывались в осевую скорость движения шлама, исходя из постоянного расстояния между линиями отсчета S .

По значениям осевой скорости транспортирования бурового шлама и соответствующим значениям угла подъема винтовой поверхности лопасти построена точечная диаграмма и линия регрессии, описывающая зависимость осевой скорости транспортирования шлама от угла подъема. На рис. 5–9 приведены результаты экспериментальных исследований для образцов из пяти типов горных пород.

Из полученных графиков на рис. 5–9 видно, что вид зависимости, полученной экспериментальным путем, совпадает с видом, полученным при аналитических исследованиях (рис. 3), также имеет точку экстремума, в которой интенсивность выноса бурового шлама является максимальной.

Указанная точка экстремума соответствует оптимальному значению угла подъема наклонной поверхности β_0 . При этом из графиков видно, что оптимальное значение угла подъема β_0 находится в диапазоне 18 – 22° при бурении интервалов, представленных песчаными, глинистыми, карбонатными, сульфатными и галоидными горными породами, при промывке раствором на водной основе.

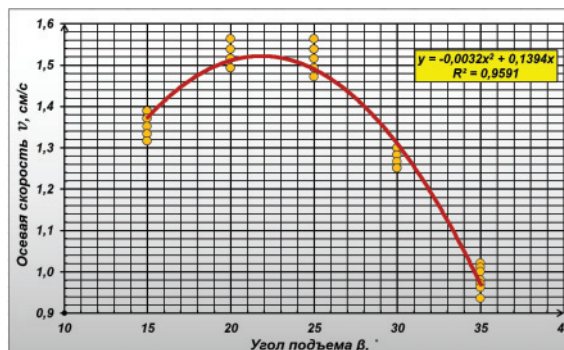


Рис. 5. Осевая скорость транспортирования шлама в зависимости от угла подъема для глинистого песчаника

Fig. 5. Axial transport rate depending on the elevation angle for clay sandstone

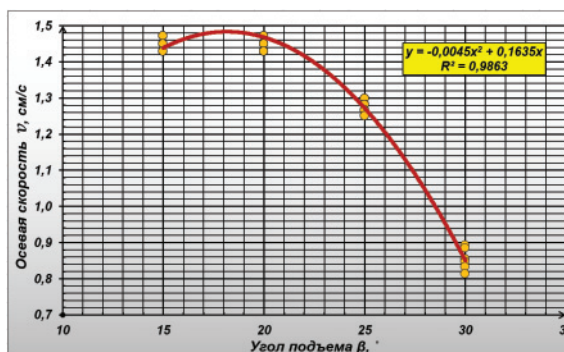


Рис. 6. Осевая скорость транспортирования шлама в зависимости от угла подъема для ангидрида

Fig. 6. Axial transport rate depending on the elevation angle for anhydride

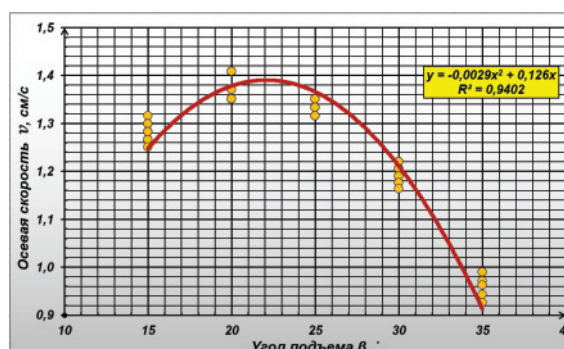


Рис. 7. Осевая скорость транспортирования шлама в зависимости от угла подъема для известняка

Fig. 7. Axial transport rate depending on the elevation angle for limestone

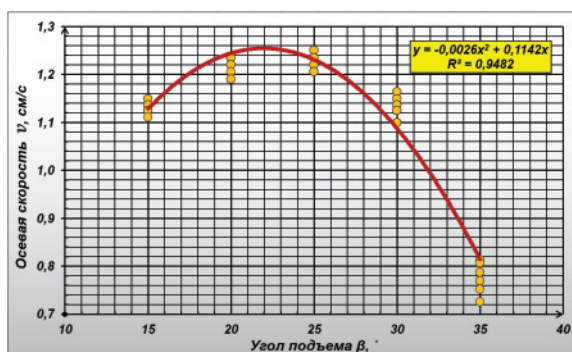


Рис. 8. Осевая скорость транспортирования шлама в зависимости от угла подъема для песчаника с карбонатным цементом

Fig. 8. Axial transport rate depending on the elevation angle for sandstone with carbonate cement

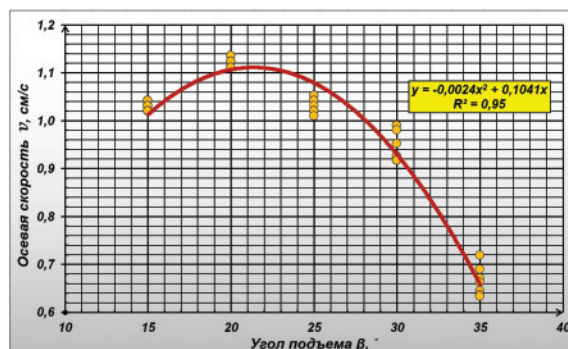


Рис. 9. Осевая скорость транспортирования шлама в зависимости от угла подъема для углистого сланца

Fig. 9. Axial transport rate depending on the elevation angle for coal shale

Выводы

- 1) Разработан и изготовлен экспериментальный стенд для исследования изменения времени осевого транспортирования шлама в зависимости от угла подъема наклонной поверхности.
- 2) Разработана методика определения оптимального значения угла подъема лопастей на спинке лапы шарошечного долота, соответствующего максимальной интенсивности транспортирования образцов бурового шлама.
- 3) Проведены экспериментальные исследования и статистически обработаны результаты исследо-

вания осевого транспортирования образцов бурового шлама пяти типов горных пород при различных значениях угла подъема наклонной поверхности. С достоверностью 99 % установлено, что оптимальное значение угла подъема лопастей на спинке лапы шарошечного долота с системой дополнительной механической очистки забоя горизонтальной скважины лежит в пределах 18–22° при бурении интервалов, представленных песчаными, глинистыми, карбонатными, сульфатными и галоидными горными породами, при промывке раствором на водной основе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калинин А.Г., Григорян Н.А., Султанов Б.З. Бурение наклонных скважин: справочник. – М.: Недра, 1990. – 348 с.
2. Jurgens R., Bitto R., Henderson B. Horizontal drilling and completions: a review of available technology // Petroleum Engineer International. – 1991. – № 2. – P. 14–21.
3. Joshi S. Horizontal well technology. – Tulsa: Penn Well Publ. Company, 1991. – 535 p.
4. Kennedy J.L. Drilling around the World // Oil and Gas J. – 1974. – V. 72. – № 38. – P. 128–148.
5. Meehan D.H. Technology vital for horizontal well success // Oil and Gas J. – 1995. – XII. – V. 93. – № 50. – P. 18–22.
6. Tanggial M.J. Horizontal flow drilling requires focus on well control // Oil and Gas J. – 1994. – V. 92. – № 24. – P. 119–123.
7. Афиян В.Ю. Основные факторы, влияющие на эффективность очистки ствола наклонно-направленной скважины от шлама // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XVII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых. – Томск: Изд-во НИТПУ, 2013. – С. 198–201.
8. Горпинченко В.А., Дильмиев М.Р. Применение синтетического полимерного волокна для увеличения эффективности выноса шлама при бурении долотами PDC // Бурение и нефть. – 2010. – № 6. – С. 6–8.
9. О необходимости учета вибраций при конструировании элементов бурильной колонны / М.Ф. Залаев, В.У. Ямалиев, Е.М. Абуталипова, А.Н. Авренюк // Химическое и нефтегазовое оборудование. – 2016. – № 9. – С. 45–48.
10. Попов А.Н. Разрушение горных пород. – Уфа: УГНТУ, 2009. – 152 с.
11. Сериков Д.Ю. Повышение эффективности шарошечного бурового инструмента с косозубым вооружением. – М.: Нефть и газ, 2015. – 378 с.
12. Besson A., Burr B., Dillard S. On the cutting edge // Oilfield review. – 2000. – № 3. – P. 36–57.
13. Centala P., Challa V., Durairajan B. Bit design – top to bottom // Oilfield review. – 2011. – № 2. – P. 4–17.
14. Unique bit design improves hydraulics and performance / H. Cholet, G. Baron, R. Larayres, J. Brisac // World Oil. – October, 1977. – № 5 – P. 63–65.
15. Катанов Б.А., Сафохин М.С. Режущий буровой инструмент. – М.: Машиностроение, 1976. – 168 с.
16. Попов А.Н., Булюкова Ф.З., Гиниятов Д.С. Механическая очистка зоны работы шарошечного долота в горизонтальной скважине // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2015. – № 4. – С. 41–44.
17. Шарошечное долото для горизонтального бурения: пат. Рос Федерация № 2539472 ПА; заявл. 11.10.2013; опубл. 20.01.2015, Бюл. № 2. – 8 с.
18. Гиниятов Д.С., Ямалиев В.У. Исследование угла подъема винтовой поверхности при механическом транспортировании выбуренной породы из зоны работы долота // Нефтегазовое дело. – 2015. – № 4. – С. 29–35.
19. Адлер В.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1971. – 284 с.
20. Ишемгузин И.Е., Шайдаков В.В., Ишемгузин Е.И. Обработка информации о надежности нефтепромысловых машин при малой выборке. – Уфа: УНИ, 2007. – 41 с.

Поступила 09.11.2017 г.

Информация об авторах

Гиниятов Д.С., инженер-конструктор Центра разработки Научно-производственного предприятия ООО НПП «БУРИНТЕХ».

Ямалиев В.У., доктор технических наук, профессор кафедры машин и оборудования нефтяных и газовых промыслов Уфимского государственного нефтяного технического университета.

UDC 622.24.05

DEFINITION OF OPTIMUM ANGLE OF ELEVATION OF BLADES ON A BACK OF LEG OF A ROLLER-CONE BIT FOR HORIZONTAL DRILLING

Danil S. Giniyatov¹,
giniyatovds@yandex.ru

Vil U. Yamaliyev²,
vilyzich@yandex.ru

¹ «BURINTEKH», Scientific and production enterprise, Limited Liability Company,
4/1, Yubileynaya street, Ufa, 450029, Russia.

² Ufa State Petroleum Technical University,
1, Kosmonavtov street, Ufa, 450062, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to develop a roller-cone bit with the system of additional mechanical cleaning for intensification of rock carrying out at horizontal drilling and corresponding reduction of wear of arms and a calibrating part of a chisel. **The aim** of the research is to define an optimum angle of elevation of blades on a back of leg of a roller-cone bit corresponding to the maximum intensity of axial transportation of drill cuttings.

Object: axial transportation of drill cuttings at various values of an elevation angle of an inclined surface.

Methods: experimental stand investigations of time change of axial transportation of drill cuttings various samples from five types of rocks (sandy, clay, carbonate, sulphatic and haloid) depending on the elevation angle of the inclined surface; statistical and regression analysis of the obtained experimental data.

Results. The authors have developed and produced the test bench for studying the time change of axial transportation of drill cuttings depending on the elevation angle of the inclined surface. The technique of experimental works on determining the optimum value of the elevation angle of blades on a back of a paw of the roller-cone bit corresponding to the maximum intensity of drill cuttings samples transportation was developed. The authors carried out the pilot studies and processed statistically the results of investigation of axial transportation of drill cuttings samples of five types of rocks (sandy, clay, carbonate, sulphatic and haloid) at various values of the elevation angle of the inclined surface. It was determined with the 99 % degree of certainty that the optimum value of the elevation angle of the blades on a back of a paw of the roller-cone bit with the system of additional mechanical cleaning of a horizontal well face lies within 18–22° when drilling the intervals presented by sandy, clay, carbonate, sulphatic and haloid rocks when washing with water-based solution.

Key words:

Horizontal hole, subsidence of drill cuttings, transportation of drilled solids, screw-shaped fans, angle of elevation.

REFERENCES

1. Kalinin A.G., Grigoryan N.A., Sultanov B.Z. *Burenie naklonnykh skvazhin: spravochnik* [Drilling of inclined wells: a guide]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 348 p.
2. Jurgens R., Bitto R., Henderson B. Horizontal drilling and completions: a review of available technology. *Petroleum Engineer International*, 1991, no. 2, pp. 14–21.
3. Joshi S. *Horizontal well technology*. Tulsa, Penn Well Publ. Company, 1991. 535 p.
4. Kennedy J.L. Drilling around the World. *Oil and Gas Journal*, 1974, vol. 72, no. 38, pp. 128–148.
5. Meehan D. H. Technology vital for horizontal well success. *Oil and Gas Journal*, 1995, vol. 93, no. 50, pp. 18–22.
6. Tanggial M.J. Horizontal flow drilling requires focus on well control. *Oil and Gas Journal*, 1994, vol. 92, no. 24, pp. 119–123.
7. Afiyan V.Yu. Osnovnye faktory, vliyayushchie na effektivnost ochistki stvola naklonno-napravlennoy skvazhiny ot shlama [The main factors influencing the efficiency of cleaning the wellbore of a directional well from slurry]. *Problemy geologii i osvoeniya nedr: Trudy XVII Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni akademika M.A. Usova studentov i molodykh uchenykh* [Problems of geology and mineral resources development: Proc. of the XVII International Symposium named after Academician M.A. Usov of students and young scientists]. Tomsk, NITPU Publ., 2013. pp. 198–201.
8. Gorpichenko V.A., Dilmiev M.R. Using of synthetic polymeric fiber to increase efficiency of cuttings lifting during drilling with pdc bits. *Drilling and oil*, 2010, no. 6, pp. 6–8. In Rus.
9. Zalyaev M.F., Yamaliyev V.U., Abutalipova E.M., Avrenyuk A.N. O neobkhodimosti ucheta vibratsii pri konstruirovanii elementov burilnoy kolonny [On the need to take vibrations into account when constructing elements of a drill string]. *Khimicheskoe i neftegazovoe oborudovanie*, 2016, no. 9, pp. 45–48.
10. Popov A.N. *Razrushenie gornykh porod* [Destruction of rocks]. Ufa, UGNTU Publ., 2009. 152 p.
11. Serikov D.Yu. *Povyshenie effektivnosti sharoshechnogo burovogo instrumenta s kosozubym voruzheniem* [Increasing the efficiency of roller-type drilling tools with helical arms]. Moscow, Nedra Publ., 2015. 378 p.
12. Besson A., Burr B., Dillard S. On the cutting edge. *Oilfield review*, 2000, no. 3, pp. 36–57.
13. Centala P., Challa V., Durairajan. B. Bit design – top to bottom. *Oilfield review*, 2011, no. 2, pp. 4–17.
14. Cholet H., Baron G., Larayres R., Brisac J. Unique bit design improves hydraulics and performance. *World Oil*, October, 1977, no. 5, pp. 63–65.
15. Katanov B.A., Safokhin M.S. *Rezhushchiy burvoy instrument* [Cutting Drilling Tools]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 168 p.
16. Popov A.N., Bulyukova F.Z., Giniyatov D.S.. Mechanical cleaning of working area of a rolling cutter drill bit in a horizontal well. *Construction of Oil and Gas Wells on-Land and off-Shore*, 2015, no. 4, pp. 41–44. In Rus.
17. Popov A.N., Giniyatov D.S., Bulyukova F.Z. *Sharoshechnoe dolo to dlya gorizontalnogo bureniya* [Roller bit for horizontal drilling]. Patent RF, no. 2539472 RA, 2015.

18. Giniyatov D.S., Yamaliev V.U. The study of the elevation angle of the screw-type surface in mechanical transportation of the drill cuttings from the bit operation zone. *Oil and gas business*, 2015, no. 4, pp. 29–35. In Rus.
19. Adler V.P., Markova E.V., Granovsky Yu.V. *Planirovanie ehksperimenta pri poiske optimalnykh uslovy* [Planning an experiment when searching for optimal conditions]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 284 p.
20. Ishemguzhin I.E., Shaydakov V.V., Ishemguzhin E.I. *Obrabotka informatsii o nadezhnosti neftepromyslovykh mashin pri maloy vyborke* [Processing information on the reliability of oilfield machines with a small sample]. Ufa, UNI Publ., 2007. 41 p.

Received: 9 November 2017.

Information about the authors

Danil S. Giniyatov, design engineer, Development centre, «BURINTEKH», Scientific and production enterprise, Limited Liability Company.

Vil U. Yamaliyev, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technical University.

УДК 622.276:53

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСЛОЖНЯЮЩИХ ФАКТОРОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВИНТОВЫХ ШТАНГОВЫХ НАСОСОВ

Бикбулатова Голия Ильдусовна¹,

agni-ngo@mail.ru

Исаев Анатолий Андреевич²,

isaeff-oil@yandex.ru

Болтнева Юлия Анатольевна¹,

boltneva1julia@mail.ru

¹ Альметьевский государственный нефтяной институт,
Россия, 423458, г. Альметьевск, ул. Ленина, 2.

² ООО УК «Шешмаойл»,
Россия, 423458, ул. Ленина, 15.

Актуальность. В Российской Федерации наибольшее распространение штанговые винтовые насосные установки получили в Урало-Поволжье и, прежде всего, в Республике Татарстан, поскольку они позволяют добывать пластовую жидкость повышенной вязкости с содержанием механических примесей и газа.

Цель исследования: установить влияние осложняющих факторов, таких как наличие механических примесей, повышенная вязкость, обводненность пластовой жидкости, на эффективность эксплуатации установок штанговых винтовых насосов; определить закономерности снижения наработки колонны штанг и эластомера насоса.

Объекты. Большинство установок штанговых винтовых насосов эксплуатируются в скважинах, вскрывших пласты башкирского яруса и верейского горизонта. Они отличаются высокой вязкостью нефти и наличием водонефтяной эмульсии. Проведенный анализ химических свойств проб нефти из 188 скважин ОАО «Шешмаойл», ОАО «Кондурчанефть» и ОАО «Иделойл», показал, что средняя вязкость добываемой жидкости составляет 610 мПа·с. При этом значительная доля приходится на скважины, добывающие пластовую жидкость вязкостью более 500 мПа·с.

Методы. Накопленный объем эксплуатационных данных на скважинах башкирского яруса и верейского горизонта, оборудованных штанговыми винтовыми насосными установками, позволяет установить снижение наработки насосных штанг при росте вязкости откачиваемой жидкости, что обусловлено существенным ростом гидравлических сопротивлений вращательному движению колонны штанг. Статистика ремонтов штанговых винтовых установок выявила закономерность степени износа эластомера в зависимости от количества накопленных оборотов ротора, обводненности продукции, содержания механических примесей в добываемой жидкости, давления насыщения, уровня жидкости в скважине.

Результаты. Определены основные осложняющие факторы, снижающие эффективность работы штангового насоса. Установлены основные причины отказов штанговых винтовых насосных установок. Выявлено, что причинами обрывов являются: низкое качество изготовления полированных штоков, отклонение штанг от геометрических параметров различной структуры, твердости, химического состава штанг (заводской брак). Обрыв по резьбе штанги или полированных штоков обусловлен недостаточным моментом свинчивания резьбового соединения или изгибом в области головки штанги. Обрывы полированных штоков, происходящие в месте расположения устьевого сальника, связаны с усталостным напряжением. Усталостный излом возникает в результате постоянно действующих деформационных усилий. Основной причиной, вызывающей набухание эластомера, является эксплуатация насоса с давлением на приеме ниже давления насыщения. Данный фактор вызывает насыщение материала эластомера газами, заклинивание ротора в статоре, и, как следствие, обрыв колонны штанг или полированного штока.

Ключевые слова:

Штанговая винтовая насосная установка, эффективная эксплуатация, осложняющие факторы, наработка штанг, обрыв, износ эластомера, обводненность, механические примеси, обороты ротора.

Введение

Установки штанговых винтовых насосов с наземным приводом (УШВН) находят все большее распространение в нефтедобывающих регионах мира, в том числе Российской Федерации, Республике Казахстан и др. Малая металло- и энергоемкость используемого оборудования, надежность и безопасность оборудования, достаточно высокие значения напора и подачи делают этот способ механизированной добычи нефти конкурентоспособным по отношению к традиционным [1–3].

В Российской Федерации наибольшее применение УШВН получили в Урало-Поволжье и, прежде всего, в Республике Татарстан (РТ), поскольку они позволяют добывать пластовую жидкость повышенной вязкости с содержанием механических примесей и газа [4–7].

Применению УШВН на нефтяных месторождениях посвящено достаточное количество работ, в которых неоднозначно оценивается эффективность эксплуатации установок. В связи с этим проведен анализ эксплуатации УШВН в целом по месторождениям РТ.

Распределение ремонтов по основным причинам отказов

На территории РТ открыто 144 нефтяных месторождения, из них в разработке находится 120 месторождений, причем доля запасов нефти с вязкостью более 300 мПа·с составляет в них 8,9 % [8–10].

За время эксплуатации на скважинах, оборудованных УШВН, было проведено более 2500 ремонтов. Распределение ремонтов по основным причинам отказа подземного и наземного оборудования представлено на рис. 1, из которого видно, что 25,8 % ремонтов на скважинах с УШВН связаны с обрывом вращательной колонны (обрыв штанг, полированных штоков и штанговых переводников), 24,8 % – проведением геолого-технических мероприятий (оптимизация, дострел пласта, обработка призабойных зон и пр.), а также с выходом из строя штанговых винтовых насосов, в том числе из-за заклинивания ротора или штанг (4,7 %), износа эластомера (11,2 % от всех ремонтов) и отказа ротора (3,1 %)

Основное число установок ШВН находится в скважинах, вскрывших пласты башкирского яруса и верейского горизонта (56,5 %). Они отличаются высокой вязкостью нефти и наличием водонефтяной эмульсии.

Проведенный анализ химических свойств проб нефти из 188 скважин ОАО «Пешмаойл», ОАО «Кондурчанефть» и ОАО «Иделойл», эксплуатируемых УШВН, показал, что средняя вязкость нефти скважин составляет 610 мПа·с. При этом значительная доля приходится на скважины, добываю-

щие пластовую жидкость вязкостью более 500 мПа·с (43 %).

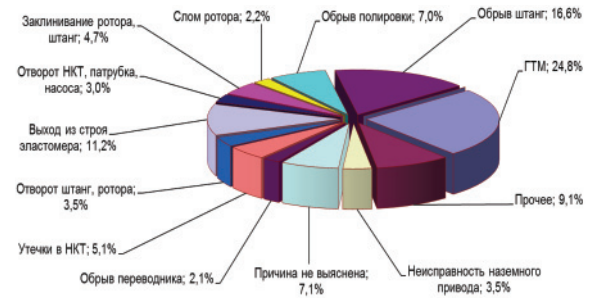


Рис. 1. Распределение отказов УШВН по основным причинам отказа подземного и наземного оборудования

Fig. 1. Distribution of refuses of setting of sucker rod spiral pump (SRSP) on principal reasons of refuse of underground and surface equipment

Влияние вязкости на отказы вращательных колонн [11–13] УШВН устанавливалось на основе промысловых данных и методов статистического анализа. Характер снижения наработки колонны штанг с ростом вязкости можно аппроксимировать экспоненциальной зависимостью ($R^2=0,954$)

$$N=341,56 \cdot e^{-0,177\mu}, \quad (1)$$

где μ – динамическая вязкость, мПа·с.

Заметное снижение наработки штанг наблюдается при наличии в скважине жидкости вязкостью 300 мПа·с. При величине вязкости 900 мПа·с наработка штанговой колонны снижается до 63 дня, что обусловлено существенным ростом гидравлических сопротивлений.

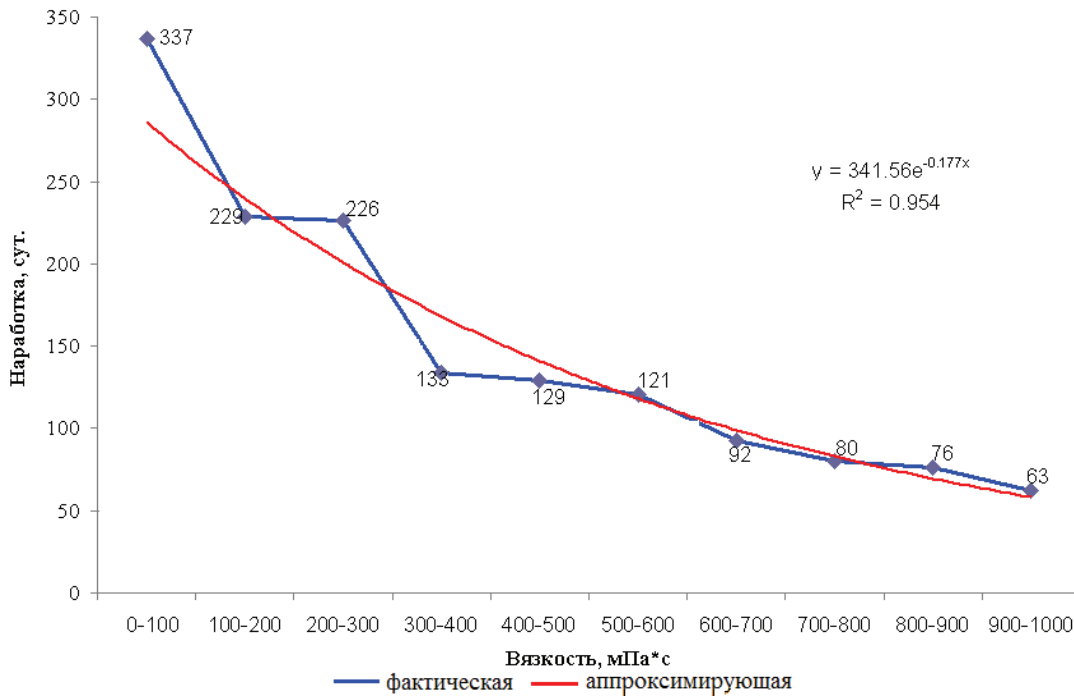


Рис. 2. Зависимость наработки штанг от вязкости добываемой нефти

Fig. 2. Dependence of rod work on the produced oil viscosity

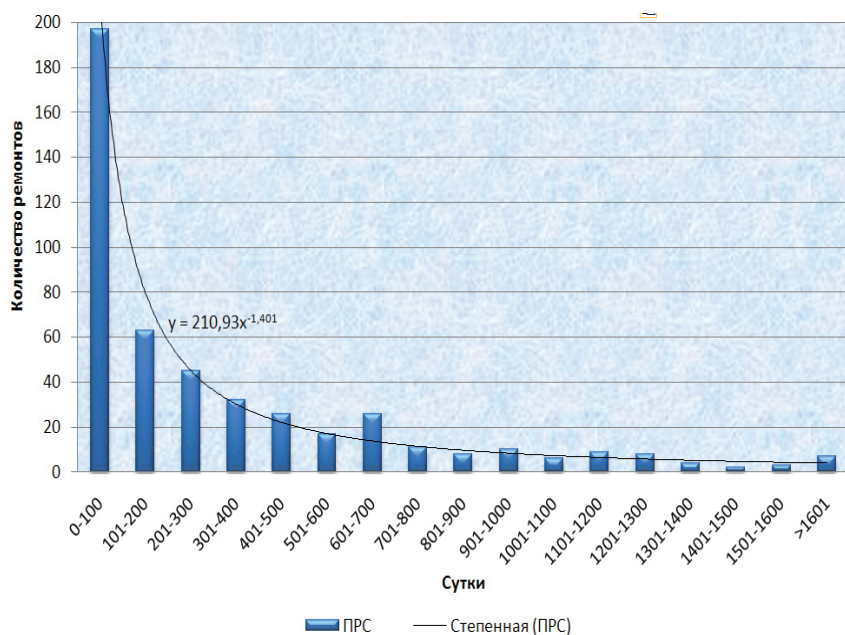


Рис. 3. Распределение числа подземного ремонта скважин (ПРС) в зависимости от наработки

Fig. 3. Distribution of a number of underground repair of mining holes depending on work

Построенная диаграмма согласно формуле (1) свидетельствует о снижении наработки штанг на отказ по мере увеличения вязкости (рис. 2).

Межремонтный период скважин, оборудованных УШВН, ниже по сравнению с другими видами механизированной добычи (2). Наибольшая интенсивность отказов (рис. 3) насосного оборудования УШВН приходится на первые 90–100 суток работы.

Далее интенсивность снижается по степенному закону:

$$N_1 = 210,93T^{-1,401}, \quad (2)$$

где N_1 – количество ремонтов; T – период работы, сут.

Оценка влияния условий эксплуатации на долговечность эластомеров скважинных винтовых насосов для добычи нефти

Еще одной из причин ремонтов УШВН являются неисправности эластомера насоса [14–17]. При этом выход из строя эластомеров происходит в основном в начальный период эксплуатации (до 90 суток), а также на скважинах с наработкой свыше 365 суток. Ниже приведено распределение количества ремонтов винтовых насосов по причине износа эластомеров и времени наработки (рис. 4).

Отказы в первые 90 суток эксплуатации свидетельствуют прежде всего о преобладающем влиянии заводских дефектов, а по истечении 1 года – об износе эластомера.

Скорость изнашивания эластомера штангового винтового насоса зависит от давления на приеме и выходе из насоса, частоты вращения ротора, физико-химических свойств перекачиваемой жидкости и первоначального натяга в паре.

С целью установления скорости износа эластомеров были проанализированы установки, рабо-

тающие в благоприятных условиях: при давлении насыщения ($P_{нас}$) ниже давления на приеме насоса ($P_{пр}$) $P_{нас} < P_{пр}$, без наличия механических примесей в откачиваемой жидкости, с динамическим уровнем выше глубины спуска насоса более 100 м. Степень изнашивания эластомера, в зависимости от количества оборотов с момента спуска насоса до его извлечения, представлена в табл. 1. Содержание механических примесей по этому фонду скважин составило в среднем около 50 мг/л. Износ эластомера определялся следующим способом: анализировались акты стендовых испытаний ШВН до внедрения и после извлечения, затем сравнивались показатели расхода при напоре 1000 м.

Таблица 1. Степень изнашивания эластомера при благоприятных условиях эксплуатации скважин

Table 1. Elastomer wear out degree at favorable conditions of well operation

Обороты (млн) Turnover (million)	Выборка (количество насосов) Sampling (number of pumps)	Степень износа Wear degree (%)
до/up to 21	12	28,95
21–42	8	37,75
более/more than 42	38	28,24
Общее (среднее) General (average)	58	29,5

Из табл. 1 видно, что при благоприятных условиях эксплуатации скважин происходит естественный износ эластомера.

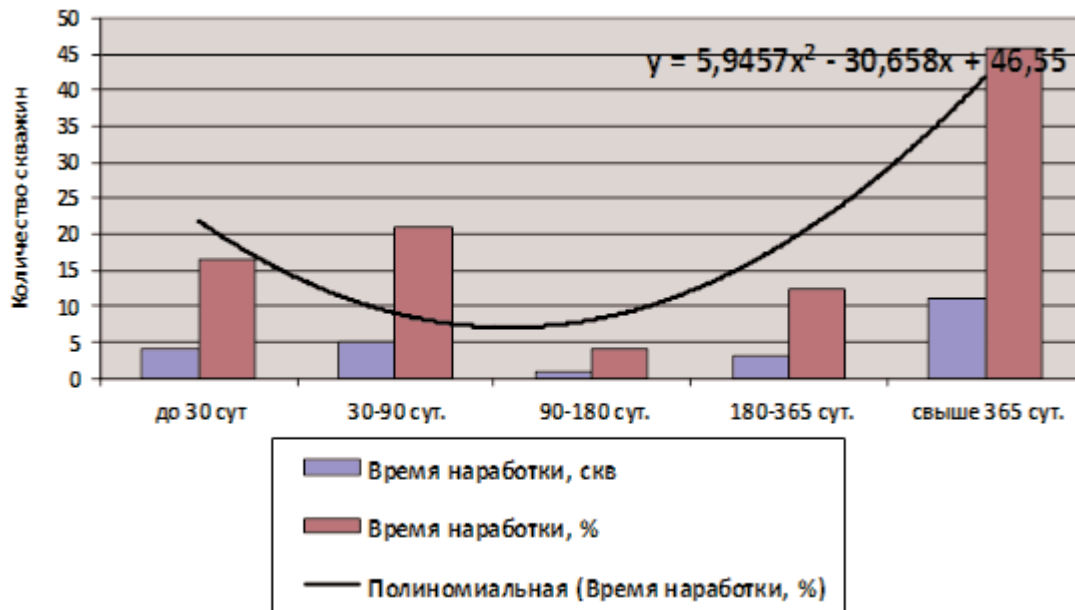


Рис. 4. Распределение количества ремонтов винтовых насосов по причине износа эластомеров и времени наработки

Fig. 4. Distribution of amount of repairs of spiral pumps due to elastomer wear out and operating time

Таблица 2. Степень изнашивания эластомера при наличии в скважинной продукции механических примесей

Table 2. Elastomer wear out degree at mechanical admixtures in the downhole products

Обороты (млн) Turnover (million)	Выборка Sampling	Степень износа Wear degree (%)
до/up to 21	16	66,4
21–42	2	72
более/more than 42	31	64,4
Общее (среднее) General (average)	49	67,6

Присутствие в скважинной продукции механических примесей увеличивает степень износа эластомеров в 2 раза, по сравнению с благоприятными условиями эксплуатации скважины (табл. 2). Среднее содержание механических примесей в рассматриваемых случаях составило около 470 мг/л.

Таблица 3. Степень изнашивания эластомера при эксплуатации скважин без учета механических примесей и при $P_{нас} > P_{пр}$

Table 3. Elastomer wear out degree at well operation not taking into account mechanical admixtures and at $P_{нас} > P_{пр}$

Обороты (млн) Turnover (million)	Выборка Sampling	Степень износа Wear degree (%)
до/up to 21	6	24,28
21–42	2	19,5
более/more than 42	23	41,37
Общее (среднее) General (average)	31	36,42

Степень износа эластомера в условиях $P_{нас} > P_{пр}$ и содержании механических примесей в скважинной продукции резко возрастает. С увеличением

оборотов ротора возрастает влияние давления насыщения на износ эластомера.

В табл. 4 приведена информация по износу эластомеров в условиях выделения газа на приеме насосов и присутствия механических примесей в скважинной продукции, показывающая синергический эффект их влияния.

Таблица 4. Степень изнашивания эластомера при эксплуатации скважин с учетом механических примесей и при $P_{нас} > P_{пр}$

Table 4. Elastomer wear out degree at well operation taking into account mechanical admixtures and at $P_{нас} > P_{пр}$

Обороты (млн) Turnover (million)	Выборка Sampling	Степень износа Wear degree (%)
до/up to 21	5	94,3
21–42	1	44
более/more than 42	20	67,8
Общее (среднее) General (average)	26	72,1

При определении влияния степени обводнённости нефти на износ эластомера рассматривались данные по 81 скважине (табл. 5).

Обводнение в диапазоне от 40 до 80 % практически не влияет на износ эластомера, однако если в скважинной продукции присутствуют механические примеси, износ увеличивается в 2–3 раза (табл. 6).

Выборка в данном случае составила 44 скважины. Выявлено, что наиболее сильный износ происходит в скважинах в интервале обводненности от 80 до 98 %. В табл. 7 приведены данные о степени износа эластомеров при $P_{нас} > P_{пр}$, с содержанием механических примесей и с учетом обводненности скважинной продукции. Выборка составила 23 насоса.

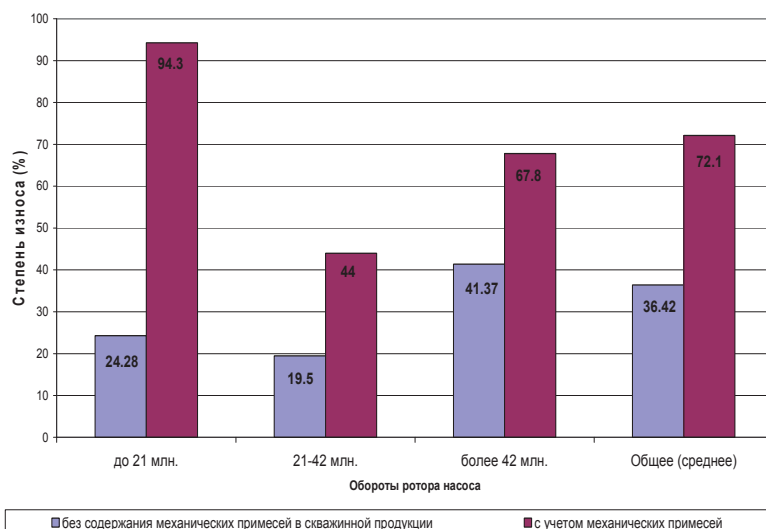


Рис. 5. График износа эластомера при $P_{нас} > P_{пр}$ и содержании механических примесей

Fig. 5. Chart of elastomer wear out at $P_{нас} > P_{пр}$ and content of mechanical admixtures

Таблица 5. Распределение степени износа эластомеров при благоприятных условиях эксплуатации в зависимости от обводненности

Table 5. Distribution of elastomer wear out degree at favourable operating conditions depending on water content

Обороты (млн) Turnover (million)	Выборка Sampling	Степень износа Wear degree (%)	Выборка Sampling	Степень износа Wear degree (%)	Выборка Sampling	Степень износа Wear degree (%)
	Малообводненные скважины (0–40 %) Low-watered wells (0–40 %)		Среднеобводненные скважины (40–80 %) Medium-watered wells (40–80 %)		Высокообводненные скважины (80–98 %) Highly-watered wells (80–98 %)	
до/up to 21	8	25,7	10	19	4	13,7
21–42	8	32,7	5	9,4	2	32
более/more than 42	13	28,6	17	29,6	14	24,4
Общее (среднее) General (average)	29	29,0	32	19,3	20	23,4

Таблица 6. Степень изнашивания эластомера при наличии в обводненной скважинной продукции механических примесей

Table 6. Elastomer wear out degree at mechanical admixtures in watered downhole products

Обороты (млн) Turnover (million)	Выборка Sampling	Степень износа (%) Wear degree (%)	Выборка Sampling	Степень износа (%) Wear degree (%)	Выборка Sampling	Степень износа (%) Wear degree (%)
	Малообводненные скважины (0–40 %) Low-watered wells (0–40 %)		Среднеобводненные скважины (40–80 %) Medium-watered wells (40–80 %)		Высокообводненные скважины (80–98 %) Highly-watered wells (80–98 %)	
до/up to 21	11	61,3	3	68	1	89
21–42	2	72	0	0	0	0
более/more than 42	19	58,9	5	75,3	3	63
Общее (среднее) General (average)	32	64,1	8	71,7	4	76,0

Таблица 7. Степень изнашивания эластомера при эксплуатации скважин с механическими примесями и при $P_{нас} > P_{пр}$

Table 7. Elastomer wear out degree at well operation with mechanical admixtures and at $P_{нас} > P_{пр}$

Обороты (млн) Turnover (million)	Выборка Sampling	Степень износа (%) Wear degree (%)	Выборка Sampling	Степень износа (%) Wear degree (%)	Выборка Sampling	Степень износа (%) Wear degree (%)
	Малообводненные скважины (0–40 %) Low-watered wells (0–40 %)		Среднеобводненные скважины (40–80 %) Medium-watered wells (40–80 %)		Высокообводненные скважины (80–98 %) Highly-watered wells (80–98 %)	
до/up to 21	2	100	1	89	1	89
21–42	1	44	0	0	0	0
более/more than 42	14	62,5	3	63,8	1	72
Общее (среднее) General (average)	17	68,8	4	76,4	2	80,5

Таблица 8. Степень изнашивания эластомера при эксплуатации скважин без механических примесей и при $P_{нас} > P_{пр}$
Table 8. Elastomer wear out degree at well operation without mechanical admixtures and at $P_{нас} > P_{пр}$

Обороты (млн) Turnover (million)	Выборка Sampling	Степень износа (%) Wear degree (%)	Выборка Sampling	Степень износа (%) Wear degree (%)	Выборка Sampling	Степень износа (%) Wear degree (%)
	Малообводненные скважины (0–40 %) Low-watered wells (0–40 %)		Среднеобводненные скважины (40–80 %) Medium-watered wells (40–80 %)		Высокообводненные скважины (80–98 %) Highly-watered wells (80–98 %)	
до/up to 21	4	35,7	3	9	0	0
21–42	1	29	1	10	0	0
более/more than 42	15	44,3	7	37,1	1	30
Общее (среднее) General (average)	20	36,3	11	18,7	1	30,0

Данные табл. 7 свидетельствуют, что содержание механических примесей и высокое содержание газа в откачиваемой жидкости резко увеличивают износ эластомера вне зависимости от степени обводненности скважинной продукции.

При отсутствии в жидкости механических примесей износ уменьшается в несколько раз (табл. 8).

Основные осложняющие факторы, влияющие на эффективность работы штангового винтового насоса

Анализ причин ремонтов установок штанговых винтовых насосов показал [18–20], что отказы вызываются низким качеством изготовления полированных штоков, отклонением штанг от геометрических параметров, заложенных в ГОСТ 13877 и АРІ, различающейся структуры, твердости и химического состава штанг (заводской брак).

Обрыв по резьбе штанги или полированных штоков обусловлен в основном недостаточным моментом свинчивания резьбовых соединений или наличием изгиба в области головки штанги.

Возможными причинами отворотов штанг являются:

- отсутствие или неэффективная работа тормоза обратного вращения наземного привода при остановке УШВН;
- недостаточное усилие крепления резьбового соединения штанг;
- ошибочное подключение по фазам к источнику во время запуска электродвигателя;
- неправильная подгонка ротора;
- вибрация штанг;
- кривизна скважины;
- возникновение крутящего момента, вызывающего дополнительное свинчивание или развинчивание соединения.

Обрывы полированных штоков в основном происходят в месте расположения сальника и связаны с усталостным напряжением. Усталостный излом возникает в результате постоянно действующих деформационных усилий и влияния температуры. Перегрев происходит вследствие отсутствия смазки в сальниковой коробке. Уменьшение диаметра полированного штока вызван истиранием по причине перезатяжки и перекоса (неравномерной затяжки) грядбуксы сальникового узла.

Отвороты НКТ происходили в основном около насоса. Основная причина – недостаточное крепление резьб НКТ. Отворот происходит в случае заклинивания ротора насоса после посадки на ограничительный штифт. Анкер, работающий на скручивание, устраняет опасность отвинчивания НКТ. При небольшой глубине спуска ШВН достаточным мероприятием по предотвращению отворота труб является свинчивание резьбы с максимальным допустимым усилием.

В результате неправильной подгонки ротора произошло 42 ремонта (1,7 %). Ротор ШВН может упираться на ограничительный штифт вследствие:

- динамического растяжения колонны насосных штанг от сил тяжести жидкости и самой колонны;
- неправильной подгонки ротора относительно статора, которая происходит из-за ошибок в расчете высоты подъема ротора;
- недостаточной чувствительности индикатора веса;
- ошибок в замеры длины колонны НКТ.

На срок службы насоса влияет повышенная вибрация ротора, зависящая от группы посадки ротора в статоре, частоты оборотов колонны и количества штанговых центраторов. С увеличением плотности посадки и скорости вращения ($>200 \text{ мин}^{-1}$) срок службы эластомера сокращается.

Одна из основных причин, вызывающих набухание эластомера, – эксплуатация с давлением на приём штангового винтового насоса ниже давления насыщения, что приводит к проникновению газов в материал эластомера и заклиниванию ротора в статоре. Данный фактор также может вызвать обрыв колонны штанг и полированных штоков. К примеру, в ООО УК «Шешмайл» по этой причине произошло 44,6 % ремонтов.

При уменьшении забойного давления ниже давления насыщения происходит снижение коэффициента продуктивности по нефти, увеличение вязкости нефти, увеличения обводненности и снижение нефтеотдачи в целом. Падение динамического уровня ниже величины $H_{подв} - H_{дин} < 100 \text{ м}$ приводит к износу эластомера, насос начинает работать в условиях сухого трения, не обеспечивая необходимое охлаждение и смазку. Работа винтового насоса в таких условиях вызывает перегрев эластомера, в результате чего эластомер увеличивается в размере и происходит его разрыв [10, 13]. Такие факты

зафиксированы на 202 внедренных УШВН в ООО УК «Шешмайл» (66,8 % от общего количества).

Заключение

1. Установлено снижение наработки насосных штанг в среднем с 337 до 63 дней при росте вязкости откачиваемой жидкости с 60 до 1000 мПа·с из-за существенного роста гидравлических сопротивлений вращению колонны штанг.
2. Основными причинами выхода из строя УШВН являются обрывы штанг и полированных штоков, а также износ эластомера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исаев А.А., Архипов К.И. Анализ эксплуатации скважин, оборудованных установками винтовых штанговых насосов с наземными приводами: проблемы, пути решения // Ученые записки Альметьевского государственного нефтяного института. – 2010. – № 8. – С. 77–84.
2. Реализация проекта энергосбережения при механизированной добыче в ОАО «Самотлорнефтегаз» / С.Д. Шевченко, И.Я. Чудийович, М.Н. Каверин, В.П. Тарасов // Научно-технический вестник ОАО «НК РОСНЕФТЬ». – 2014. – № 3. – С. 18–24.
3. Молчанов А.Г. Пути дальнейшего совершенствования штанговых скважинных насосных установок // Научный журнал по геофизике. Бурение и нефть – 2014. – № 2. – С. 3–10.
4. Яценко И.Г., Полищук Ю.М. Трудноизвлекаемые запасы нефти Волго-Уральской нефтегазоносной провинции // Нефтепромысловое дело. – 2008. – № 8. – С. 11–18.
5. Мищенко И.Т., Бравичев Т.Б., Николаев А.И. Выбор способа эксплуатации скважин нефтяных месторождений с трудноизвлекаемыми запасами. – М.: Изд-во «Недра», 2005. – 448 с.
6. Clegg J.D., Bucaram S.M., Hein N.W.J. Recommendations and Comparisons for Selecting Artificial-Lift Methods // J. Pet. Technol. – 1993. – V. 45. – № 12. – P. 1128–1167.
7. Artificial lift practice for heavy oil production with sand control / A. Petrov, A. Mikhailov, K. Litvinenko, R. Ramazanov // SPE Russian Oil and Gas Conference and Exhibition. – Moscow, Russian Federation, 2010, 26–28 October. – P. 386–393.
8. Нагусев А.В., Макаренко А.Н., Силкин А.В. Результаты применения винтовых насосов при добыче высоковязких нефтей с трудноизвлекаемыми запасами // Интервал. Передовые нефтегазовые технологии. – 2002. – № 8. – С. 5–6.
9. Saveth K.J., Klein S.T., Fisher K.B. A Comparative Analysis of Efficiency and Horsepower between Progressing Cavity Pumps and Plunger Pumps // SPE Production Operations Symposium. – Oklahoma City, Oklahoma, 1987, 8–10 March. – P. 87–93.
10. Eson R. Optimizing Mature Oil Fields through the Utilization of Alternative Artificial Lift Systems // SPE Western Regional Meeting. – Long Beach, California, 1997, 25–27 June. – P. 28–34.
11. Cowlagi C.S. Single screw pumps for oil industry // Chemistry Engineering World. – 1989. – V. 24. – № 9. – P. 47–48.
12. Исаев А.А., Архипов К.И. Выявление факторов, снижающих работоспособность насосных штанг (на примере нефтяных

3. Осложняющими факторами, влияющими на работоспособность УШВН, являются заводские дефекты и естественный износ при длительной (свыше 365 суток) эксплуатации.
4. Наличие механических примесей в добываемой продукции вызывает увеличение скорости износа статора насоса более чем в 2 раза, особенно в интервале обводненности скважинной жидкости 80–98 %.
5. Падение динамического уровня в скважине ниже величины $H_{\text{подв}} - H_{\text{дин}} < 100$ м вызывает отказ УШВН, обусловленный износом эластомера.

- компаний Республики) // Территория нефтегаз. – 2015. – № 5. – С. 46–52.
13. Долговечность штанг при эксплуатации скважин установками штанговых винтовых насосов и разработка центраторов для насосных штанг / А.А. Исаев, В.И. Малыхин, А.А. Шарифуллин, Н.А. Бородин, Л.А. Афанасьева, Л.Р. Хасанов // Ресурсы Европейского Севера. Технологии и экономика освоения. – 2016. – № 2. – С. 16–26.
14. Оценка влияния условий эксплуатации на долговечность эластомеров скважинных винтовых насосов для добычи нефти / И.И. Мути, В.М. Валовский, Б.В. Аристов, Н.М. Исакова, И.А. Шайдуллина // Интервал. Передовые нефтегазовые технологии. – 2004. – № 4–5. – С. 31–37.
15. Stachowiak G.W., Batchelor A.W. Abrasive, Erosive and Cavitation Wear // Tribology Series. – 1993. – V. 24. – P. 557–612.
16. The mathematical simulation of thermal processes in the conditions of radiant energy stream influence on powder systems with peritectic type exothermal reactions / V.V. Skorokhod, V.P. Solntsev, V.L. Baranov, E.G. Frolova // Materials and Coatings for Extreme Performances, Investigations, Applications, Ecologically Safe Technologies for their Production and Utilization. – Katsiveli-town, Crimea, Ukraine, 2002. – P. 139–145.
17. Тимашев Э.О., Ямалиев В.У. Анализ причин разрушения эластомеров обойм винтовых насосов // Электронный журнал «Нефтегазовое дело». – 2005. – № 2. URL: http://ogbus.ru/authors/Timashev/Timashev_1.pdf (поступила 20.10.2017).
18. Orchard B. Performance factors for progressing cavity pumps // World Pumps. – 2005. – V. 2005. – P. 36–38.
19. Особенности работы винтовых установок в условиях повышенного газосодержания / Э.В. Абрамова, Р.И. Вахитова, Д.В. Мазанкина, А.М. Азизов // Научно-технический журнал «Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов». – 2017. – № 3. – С. 32–38.
20. Анализ отказов элементов глубинного штангового насоса / М.Л. Галимуллин, С.С. Орешков, М.С. Габдрахимов, Л.М. Зарипова // Современные технологии в нефтегазовом деле–2016. Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 60-летию филиала УГНТУЦ г. Октябрьский. – г. Октябрьский: УГНТУЦ, 2016. – С. 42–48.

Поступила 27.10.2017 г.

Информация об авторах

Бикбулатова Г.И., кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазового оборудования и технологии машиностроения Альметьевского государственного нефтяного института.

Исаев А.А., кандидат технических наук, ведущий инженер отдела инноваций и экспертизы ООО УК «Шешмайл».

Болтнева Ю.А., старший преподаватель кафедры нефтегазового оборудования и технологии машиностроения Альметьевского государственного нефтяного института.

UDC 622.276:53

INFLUENCE OF COMPLICATING FACTORS ON A ROD PUMP PRODUCTIVITY

Golia I. Bikbulatova¹,
agni-ngo@mail.ru

Anatoliy A. Isaev²,
isaeff-oil@yandex.ru

Yulia A. Boltneva¹,
boltneva1julia@mail.ru

¹ Almeteyevsk State Oil Institute,
2, Lenin street, Almeteyevsk, 423458, Russia.

² Sheshmaoil, Management Company LLC,
15, Lenin street, Almeteyevsk, 423458, Russia.

Relevance. In the Russian Federation rod screw pumps installations are widely used in the Ural-Volga region and first of all in the Republic of Tatarstan as they allow extracting reservoir liquid of the increased viscosity with the content of mechanical impurity and gas.

The main aim of the research is to determine the effect of complicating factors, such as the presence of mechanical impurities, increased viscosity, water cut of formation fluid, on operational efficiency of rod screw pumps; determine the regularities in reducing the operating time of the rod column and the elastomer of the pump.

Objects. The main number of rod screw pumps is in wells, which have opened the layers of the Bashkirian stage and the Verean horizon. They are distinguished by high viscosity of oil and presence of water-oil emulsion. The analysis of the chemical properties of oil samples from 188 wells in Sheshmaoil, Kondurchaneft and Ideoloyl, operated by rod screw pumps, showed that the average viscosity of oil wells is 610 mPa·s. At the same time, a significant proportion falls on the wells producing reservoir fluid with a viscosity of more than 500 mPa·s.

Methods. The accumulated volume of operational data on Bashkirian and Vereisk horizon wells equipped with rod screw pumps allows determining the operating time of the rod pumps reduction with an increase in viscosity of the fluid caused by a significant growth in hydraulic resistance to rotary motion of the rod string. The carried out statistical analysis of the rod screw pumps repair determined the regularity of wearout degree of the elastomer depending on a number of accumulated rotor speed, water content, content of mechanical impurities in the produced fluid, saturation pressure, fluid level in the well and with favorable conditions.

Results. We defined the main complicating factors which influence the efficiency of rod pump operation. The analysis of the rod screw pumps repair causes shown that low quality of polished rods produced by the manufacturer, rod deviation from geometric parameters of different structures, hardness, chemical composition of rods (factory defect) are often the causes of breaks. Open threaded rod or polished rod was primarily due to insufficient torque screwing the threaded connection or a bend in the rod head. The breakage of polished rods mainly occur in the oil seal and due to fatigue voltage. The fatigue fracture occurs as a result of permanent deformation forces and temperature action. One of the main causes of the elastomer swelling is the maintenance with pressure at the reception of rod screw pumps below the saturation pressure. It leads to saturation of elastomer material with gases and rotor jamming in the stator which can turn into breakages of the rod string and polished rod.

Key words:

Rod screw pumps installations, effective maintenance, complicating factors, operating time of the rods, breakage, wearout of the elastomer, water content, mechanical impurities, rotor speed.

REFERENCES

1. Isaev A.A., Arkhipov K.I. Analysis of operation of wells equipped with screw rod pumps with ground drives: problems, solutions. *Scientists scraps Almeteyevsk State Oil Institute*, 2010, no. 8, pp. 77–84. In Rus.
2. Shevchenko S.D., Chudiyovich I.Ya., Kaverin M.N., Tarasov V.P. Realization of the project of energy saving at mechanized extraction in JSC «Samotlorneftegaz». *Scientific and technical bulletin of OJSC «NK ROSNEFT»*, 2014, no. 3, pp. 18–24. In Rus.
3. Molchanov A.G. Ways of further sophistication of well rod pump rigs. *Scientific Journal of Geophysics Drilling and Oil*, 2014, no. 2, pp. 3–10. In Rus.
4. Yashchenko I.G., Polishchuk Yu.M. Hardly recoverable oil reserves of the Volga-Ural oil and gas province. *Oilfield engineering*, 2008, no. 8, pp. 11–18. In Rus.
5. Mishchenko I.T., Bravichev T.B., Nikolaev A.I. *Vybor sposoba ekspluatatsii skvazhin neftyanykh mestorozhdeniy s trudnoizvlekaemimi zapasami* [The choice of a way to exploit wells in oil fields with hard-to-recover reserves]. Moscow, Nedra Publ., 2005. 448 p.
6. Clegg J.D., Bucaram S.M., Hein N.W.J. Recommendations and Comparisons for Selecting Artificial-Lift Methods. *J. Pet. Technol.*, 1993, vol. 45, no. 12, pp. 1128–1167.
7. Petrov A., Mikhailov A., Litvinenko K., Ramazanov R. Artificial lift practice for heavy oil production with sand control. *SPE Russian Oil and Gas Conference and Exhibition: Materiali vserossiyskoy neftegazovoi konferencii I vystavki*. Proc. of the conference. Moscow, 2010, 26–28 October. pp. 386–393.
8. Nagusev A.V., Makarenko A.N., Silkin A.V. Results of application of screw pumps for extraction of high-viscosity oils with hard-to-recover reserves. *Interval. Advanced oil and gas technologies*, 2002, no. 8, pp. 5–6. In Rus.
9. Saveth K.J., Klein S.T., Fisher K.B. A Comparative Analysis of Efficiency and Horsepower Between Progressing Cavity Pumps and Plunger Pumps. *SPE Production Operations Symposium*, Proc. of the conference. Oklahoma City, Oklahoma, 1987, 8–10 March. pp. 87–93.
10. Eson R. Optimizing Mature Oil Fields Through the Utilization of Alternative Artificial Lift Systems. *SPE Western Regional Meeting*.

- ting, Proc. of the conference. Long Beach, California, 1997, 25–27 June. pp. 28–34.
11. Cowlagi C.S. Single screw pumps for oil Industry. *Chemistry Engineering World*, 1989, vol. 24, no. 9, pp. 47–48.
 12. Isaev A.A., Arkhipov K.I. Determination of factors decreasing working efficiency of pump rods (in the context of oil companies of the Republic of Tatarstan). *Territory of oil and gas*, 2015, no. 5, pp. 46–52. In Rus.
 13. Isaev A.A., Malykhin V.I., Sharifullin A.A., Borodin N.A., Afanasyeva L.A., Khasanov L.R. Endurance of rods under PCP operation of wells and development of centralizers for sucker rods. *Resources of the European North. Technologies and economics of development*, 2016, no. 2, pp. 16–26. In Rus.
 14. Mutin I.I., Valovsky V.M., Aristov B.V., Iskhakova N.M., Shaydullina I.A. Estimation of the influence of operating conditions on the durability of elastomers of borehole screw pumps for oil production. *Interval. Advanced oil and gas technologies*, 2004, no. 4–5, pp. 31–37. In Rus.
 15. Stachowiak G.W., Batchelor A.W. Abrasive, Erosive and Cavitation Wear. *Tribology Series*, 1993, vol. 24, pp. 557–612.
 16. Skorokhod V.V., Solntsev V.P., Baranov V.L., Frolova E.G. The mathematical simulation of thermal processes in the conditions of radiant energy stream influence on powder systems with peritectic type exothermal reactions. *Materials and Coatings for Extreme Performances, Investigations, Applications, Ecologically Safe Technologies for their Production and Utilization*. Proc. of the conference. Ukraine, Crimea, Katsiveli-town, 2002. pp. 139–145.
 17. Timashev E.O., Yamaliev V.U. Analysis of the causes of destruction of elastomers of screw pump cages. *Electronic Journal «Oil and Gas engineering»*, 2005, no. 2. In Rus. Available at: http://ogbus.ru/authors/Timashev/Timashev_1.pdf (accessed 20 October 2017).
 18. Orchard B. Performance factors for progressing cavity pumps. *World Pumps*, 2005, vol. 2005, pp. 36–38.
 19. Abramova E.V., Vakhitova R.I., Mazankina D.V., Azizov A.M. Features of the operation of screw installations in conditions of increased gas content. *Scientific and technical journal «Problems of collecting, preparing and transporting oil and oil products»*, 2017, no. 3, pp. 32–38. In Rus.
 20. Galimullin M.L., Orekeshev S.S., Gabdrakhimov M.S., Zaripova L.M. Analiz otkazov elementov glubinnogo shtangovogo nasosa [Analysis of failures of elements of deep rod pump]. *Modern technologies in oil and gas business-2016. Collection of works of the international scientific and technical conference dedicated to 60th anniversary of the branch UGNTUTS Oktyabrskiy*. Oktyabrsk, 2016. pp. 42–48.

Received: 27 October 2017.

Information about the authors

Golia I. Bikbulatova, Cand. Sc., associate professor, Almet'yevsk State Oil Institute.

Anatoliy A. Isaev, leading engineer, Sheshmaoil, Management Company LLC.

Yulia A. Boltneva, senior lecturer, Almet'yevsk State Oil Institute.

УДК 553.26.036(571.1212)

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВИКУЛОВСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ С УЧЕТОМ АНАЛИЗА СВЯЗНОСТИ КОЛЛЕКТОРА И ДАННЫХ ПО ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ СКВАЖИНАМ

Боженюк Надежда Неониловна¹,
bojenuk_nn@mail.ru

Белкина Валентина Александровна¹,
belkina@tsogu.ru

Стрекалов Александр Владимирович¹,
hydrasym@mail.ru

¹ Тюменский индустриальный университет,
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Мельникайте, 70.

Актуальность. Отложения викуловской свиты Красноленинского свода, обладая высокой продуктивностью, характеризуются сложным геологическим строением. При этом большое число залежей разбурены редкой сеткой скважин, причем зачастую крайне неравномерной, следствием чего является значимый недостаток эмпирической информации для построения адекватной трёхмерной геологической модели, и тем более гидродинамической.

Цель работы: усовершенствование методики построения трёхмерных геологических моделей, учитывающей неравномерность замеров, критерии связности коллектора и данные по горизонтальным скважинам, позволяющей заметно повысить точность геологической модели, и, как следствие, заметно уменьшить число итераций процесса создания гидродинамической модели.

Методы исследования: методы литологического анализа состава горных пород, разделения циклов накопления отложений по литологическим характеристикам на циклиты, детальной корреляции, адаптации результатов вариограммного анализа по разбуренным участкам на не разбуренные, геостиринга по горизонтальным скважинам, критериев связности коллектора, построения трёхмерных геологических и гидродинамических моделей.

Результаты. На основе анализа кернового материала выделено по три циклита в пластах $ВК_1$ и $ВК_2$ изучаемого месторождения, что позволило провести детальную корреляцию с выделением трёх пачек в каждом из этих пластов. Использование параметров вариограммы, полученных на участках с более высокой плотностью замеров и наличием сейсморазведочных данных, привлечение данных по горизонтальным стволам позволило заметно уточнить структурный каркас и трёхмерные геологические модели литологии, фильтрационно-ёмкостных свойств и нефтенасыщенности. Перечисленные модели показали хорошую согласованность с внешними данными. Повышение точности геологических моделей существенно уменьшило вычислительную сложность построения гидродинамической модели.

Ключевые слова:

Нефтегазовая геология, месторождение, пласт, трёхмерная геологическая модель, связность коллектора, геостиринг, неопределённость.

Введение

Нижнемеловые отложения викуловской свиты являются важным продуктивным объектом Красноленинского свода Западной Сибири. Впервые продуктивность викуловской свиты доказана изучением керна из Лорбинской скважины № 35 около 50 лет назад. Затем нефтеносность свиты подтвердилась данными по скважинам № 38 и 31. По результатам геологоразведочных работ в последующие годы залежи углеводородов открыты практически на всех локальных поднятиях-ловушках Красноленинского свода [1]. Большое число залежей, приуроченных к викуловской свите, в настоящее время находятся на поздней стадии разработки. Широко применяемая в мире и в Западной Сибири система форсированного отбора и заводнения приводит к образованию значительных недраенируемых зон, а также к формированию так называемых трудноизвлекаемых запасов. Повышение эффективности разработки таких запасов возможно только на основе детальных геологических и гидродинамических моделей (ГМ и ГДМ). С другой стороны, некоторые из этих залежей разбурены до-

вольно плотной сеткой скважин, охвачены данными 2D и 3D сейсморазведки, что является информационной базой создания таких моделей. Тем не менее для получения адекватных моделей необходимо привлекать и другие виды эмпирической, косвенной и априорной информации. В настоящее время с целью повышения эффективности разработки ведётся бурение горизонтальных скважин (ГС). Но набор алгоритмов, использующих замеры и в ГС при трёхмерном геологическом моделировании, в настоящее время явно недостаточен. В настоящей статье рассмотрен алгоритм создания ГМ и ГДМ для одной из залежей викуловской свиты. В предлагаемой методике, кроме данных по горизонтальным стволам, в качестве априорной информации используется гипотеза о связности коллектора.

В административном отношении изучаемый район находится в Октябрьском районе Ханты-Мансийского автономного округа Тюменской области (рис. 1). Согласно [2], моделируемое месторождение расположено в северной части Красноленинского нефтегазозносного района (НГР) на границе центральной части Красноленинской нефтега-

зоносной области (НГО). Месторождение открыто в 1992 г. после опробования первой скважины, где установлена промышленная нефтеносность викуловской свиты. В тектоническом отношении рас-

сматриваемый участок находится на Западно-Сибирской плите, в пределах Уват-Ханты-Мансийского срединного массива рифейского геосинклинального комплекса, на северо-западе Красноле-



Рис. 1. Обзорная карта района работ [2]

Fig. 1. Survey map of the area of works [2]

нинского выступа, образовавшегося в период байкальского этапа складчатости, переработанной герцинским тектоногенезом. Данный участок является структурой дейтероорогенного этапа развития в виде выступов-горстов фундамента.

Как видно из рис. 2, аптский бассейн, к которому приурочены продуктивные отложения викуловской свиты, представляет собой обширную переходную область от аллювиально-дельтовой равнины к морскому побережью, на котором довольно широко развиты авандельтовые образования.

Отложения викуловской свиты имеют морской генезис. Породы накапливались за счет приливно-отливной энергии и представлены разнопорядково-ритмичным переслаиванием песчаников, алевролитов и глинистых разностей. Осадконакопление викуловской свиты проходило в центральной части внутреннего мелководного изолированного бассейна. Осадки нижней части свиты накапливались на этапе регрессивного цикла развития, сменившегося при накоплении верхней части свиты на трансгрессивный [3].

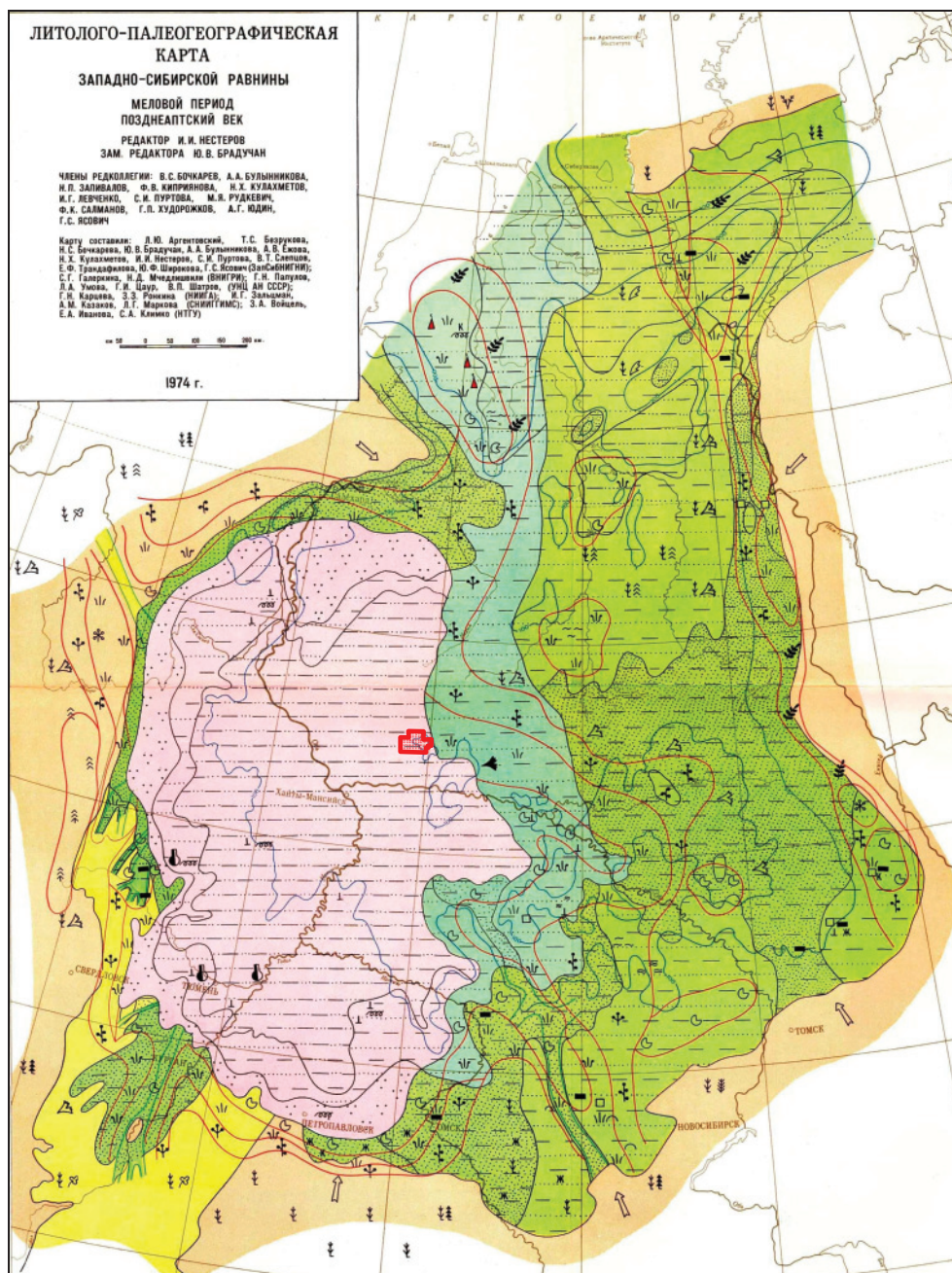


Рис. 2. Литолого-палеогеографическая карта Западно-Сибирской равнины. Меловой период позднеаптский век (под ред. И.И. Нестерова, 1974)

Fig. 2. Lithologic paleogeographic map of the West Siberian Plain. Cretaceous late Aptian century

На рассматриваемом месторождении на момент создания геологической модели пробурено 34 скважины, из них 3 разведочные, 13 поисковых и 18 эксплуатационных (в том числе 8 горизонтальных) скважин, причём расположены они крайне неравномерно. В период создания модели продолжалось разбуривание месторождения несколькими буровыми бригадами в двух участках, данные по этим скважинам постоянно добавлялись в проект и учитывались при построении модели. На всей площади месторождения выполнены сейсморазведочные работы МОГТ-3D.

Детальная корреляция

Для создания 3D ГМ проведён анализ сейсмических исследований, данных ГИС, описания и исследований керна, результатов опробования пласта и др. Одной из первых задач для проведения детальной корреляции отложений является изучение условий и процессов осадконакопления и выделение основных фациальных элементов разреза. Условия седиментации обуславливают закономерности пространственной неоднородности коллекторов пласта и степень их сложности. В пласте VK_1 , согласно проведенному анализу керна, выделено три седиментационных цикла, в которых отражена последовательность перехода осадков дистальных частей фронта дельты в отложения проделты (рис. 3).

Общая корреляция объекта проведена с выделением основных маркирующих горизонтов (кровля и подошва пласта VK_1 , кровля и подошва пласта VK_2), а затем детальная – с выделением пачек (рис. 4).

Проведение данных границ обусловлено допущением геостатистики, основным инструментом моделирования в рамках данной работы, в связи с

небольшим количеством скважинных данных относительно площади исследования, о стационарности и репрезентативности данных в пределах одного слоя. Выделены следующие маркеры:

1. Пласт VK_1 .
 - а) Кровля VK_1 (пачка VK_1^a) – кровля викуловской свиты, соответствует сейсмическому горизонту «М». Местоположение кровли маркируется по однонаправленному перегибу диаграмм ПС и ГК в сторону линии чистых глин.
 - б) Кровля VK_1^b – маркируется по увеличению значений ГК и отклонению ПС к линии глин, в большей части скважин (70 %) пачка сильно заглинизирована, что обусловлено снижением гидродинамической активности среды седиментации для данного трансгрессивного периода.
 - в) Кровля VK_1^c – положение маркера пачки соответствует перегибу диаграмм ПС и ГК в сторону линии песков. Является первым и наиболее выдержанным циклитом образования трансгрессивного пласта VK_1 , в большей части скважин, что логично, обладает наилучшими ФЕС (зоны ухудшения коллекторских свойств связаны с вторичными изменениями).
2. Подошва пласта VK_1 – переходная пачка VK_1^2 . Трансгрессивная переходная глинисто-карбонатная зона. Маркируется по повышению гамма активности и повышению сопротивления, в случае с карбонатизированной частью.
3. Пласт VK_2 .
 - а) Кровля VK_2 (пачка VK_2^a) – последний циклит образования пласта VK_2 , частично заглинизирован, вследствие перехода осадконакопления в трансгрессивную фазу.

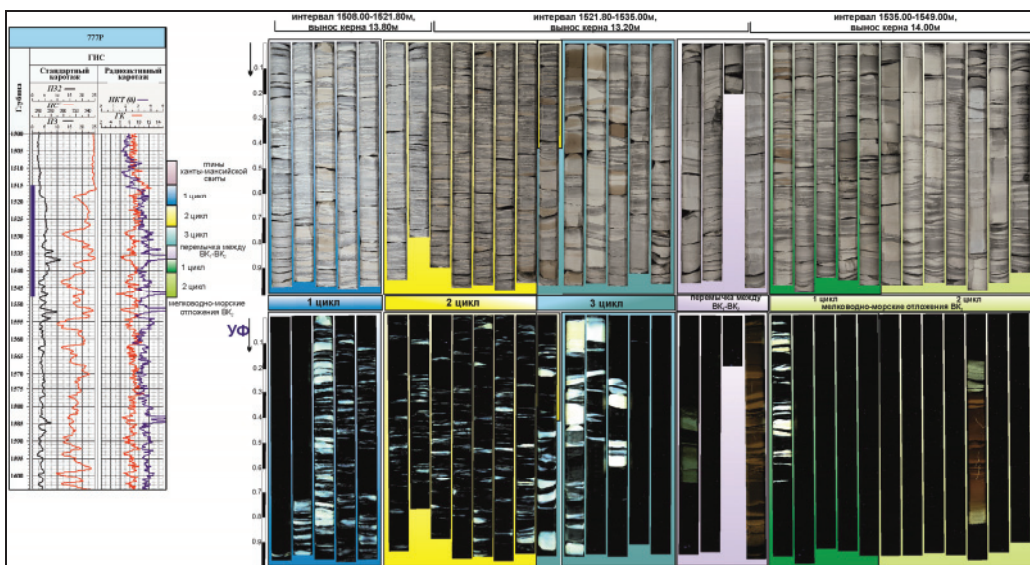


Рис. 3. Выделение седиментационных циклов в отложениях пластов VK_1 , VK_2 [4]

Fig. 3. Allocation of sedimentation cycles in deposits of VK_1 , VK_2 layers

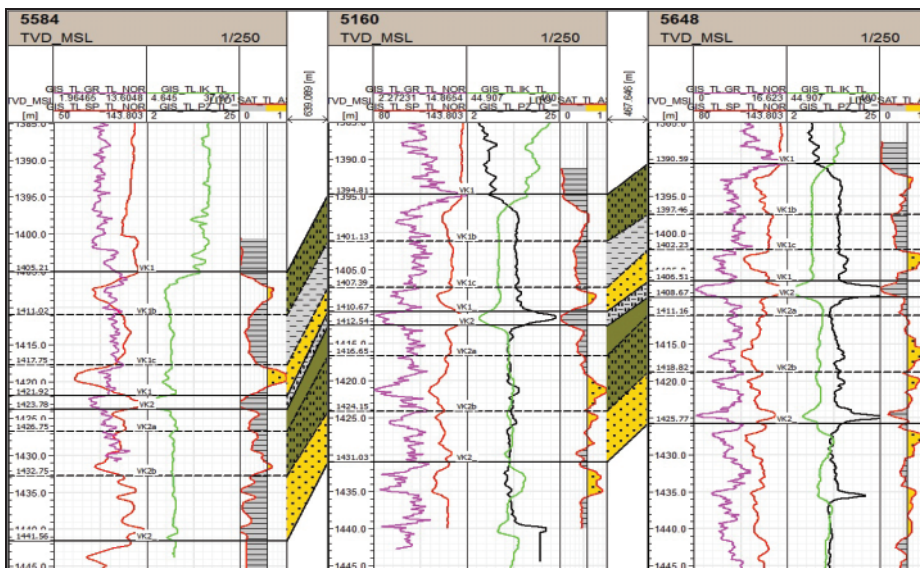


Рис. 4. Детальная схема корреляции пластов VK_1 и VK_2 викуловской свиты

Fig. 4. Detailed scheme of correlation of layers VK_1 , VK_2 of Vikulovskaya suite

- b) Кровля VK_2^b – маркируется по характерному перегибу диаграмм ГЖ и ПС к линии песков. Для данной пачки в целом характерно улучшение ФЭС.
 - с) Кровля VK_2^c – первый циклит регрессивного пласта VK_2 . Прослеживается по характерному понижению гамма активности и собственной поляризации. Практически повсеместно этот циклит (85 % скважин) представлен водонасыщенными по ГИС породами.
4. Подошва VK_2 – выделяется по отклонению ПС к линии чистых глин, снижению сопротивления, взаимнообратному перегибу диаграмм ИК и ПС.

Подтвердить корректность выделенных прослоев на этапе корреляции можно анализом геологостатистических разрезов (ГСР) по скважинным данным. Пример контроля качества корреляции по пластам VK_1 и VK_2 по ГСР представлен на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что ГСР с учётом результатов детальной корреляции имеет более изрезанный вид, что хорошо согласуется со сменой циклитов, установленной по ядерным данным.

Построение структурного каркаса

В связи со слабой изученностью рассматриваемой территории, обусловленной низкой степенью

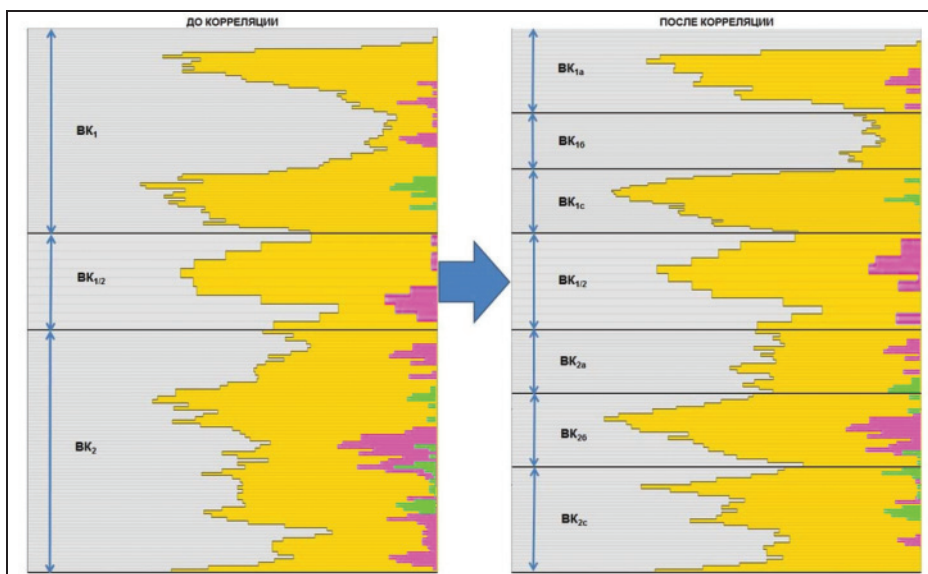


Рис. 5. Геолого-статистический разрез объекта VK

Fig. 5. Geological and statistical section of VK object

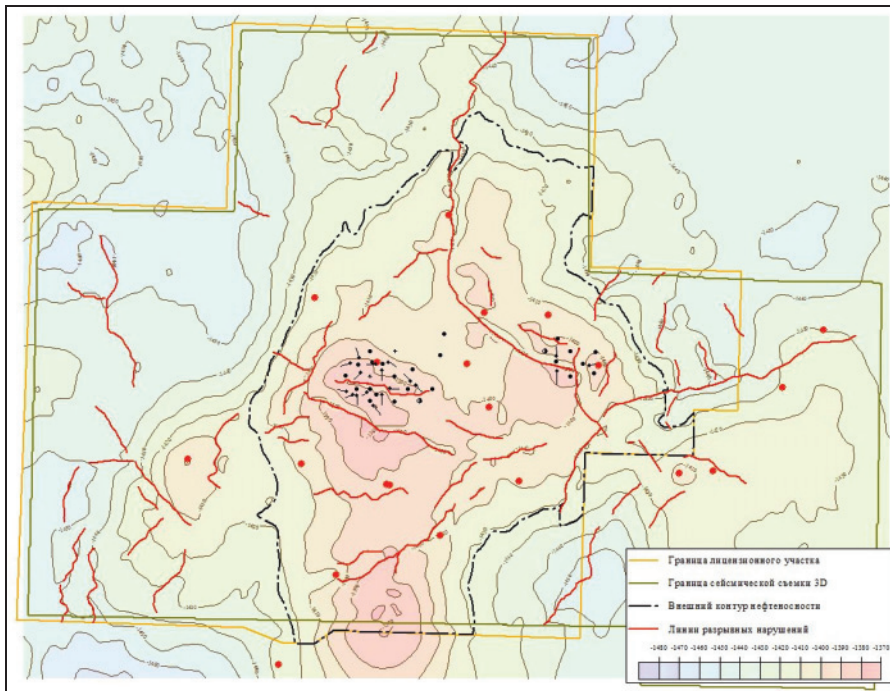


Рис. 6. Структурная карта по кровле пласта VK_1 (авторская модель)

Fig. 6. Structural map on layer VK_1 (author's model)

и, что ещё очень важно, существенной неравномерностью сети скважин на месторождении, построение структурного каркаса модели проведено с учетом анализа неопределенности данных.

Учет геологической неоднородности по всей площади пласта позволяет повысить достоверность прогноза строения пластов в межскважинном пространстве, увеличить точность подсчета запасов в областях, слабо изученных бурением, и более обоснованно подходить к составлению проектного документа для дальнейшего разбуривания месторождения.

Построение структурной карты осуществляется в несколько этапов:

1. Для проведения вариограммного анализа разбуренного участка месторождения полученная по результатам интерпретации сейсмических материалов карта горизонта VK_1 преобразуется в куб абсолютных отметок, при наличии участков, не охарактеризованных сейсмическими данными, проводится интерполяция (за пределами лицензионного участка). Далее для анализа структурных особенностей разбуренной части и построения вариограммы с полученного куба снимаются значения абсолютных отметок в атрибуты скважин.
2. Далее рассчитывается куб расстояний, в котором значение в каждой ячейке есть расстояние до ближайшей скважины. Дальнейшие расчёты ведутся в предположении, что изменчивость тем выше, чем удалённее участок от участка с фактической информацией и чем глубже от дневной поверхности. В соответствии с этим

предположением, получена зависимость изменчивости от удаленности точек с фактической информацией и глубины.

3. Затем проводятся многовариантные (стохастические) расчеты структурной карты кровли с учетом подобранных рангов согласно вариограммному анализу и вариативности отклонений, которые дают набор реализаций с минимальными отличиями в разбуренной зоне, но с различным поведением структуры вне разбуренной части. В конечном итоге по вероятностному подходу отбираются реализации, попавшие в диапазон $P50 \pm 5\%$ (где P – вероятность), и проводится их осреднение (рис. 6).

4. Далее структурная карта строится с использованием в качестве тренда осредненной карты, полученной на предыдущем шаге, и модели разломов, определенных по сейсмическим данным. При этом модель разломов является детерминистической в связи высоким диапазоном неопределенности положения разломов.

Таким образом, удалось уточнить геометрию структурной поверхности на неразбуренных участках месторождения, используя свойства поверхности по разбуренной части. Впоследствии это привело к изменению контуров нефтеносности месторождения и уменьшению геологических запасов залежи.

Литолого-петрофизическое моделирование

В связи с тем, что образование пород происходило в условиях волнового/ штормового побережья, количество и степень отсортированности

песчаного материала контролировалось удаленностью от источника сноса и силой штормовых явлений, поэтому в данной работе отложения пласта ВК₁ рассматриваются как условно монофациальные. На данном участке отсутствуют отложения врезанной долины.

Для воспроизведения адекватной изменчивости пород пласта построение куба литологии проведено комбинированным способом в 2 этапа. На первом этапе создан трендовый куб литологии детерминистическим способом, на втором – итоговый куб литологии одним из стохастических способов – индикаторным методом. В свою очередь, алгоритм создания трендового куба литологии состоит из нескольких шагов: вначале строятся карты общих и эффективных толщин по скважинным данным, которые вычисляются экстраполяцией с учетом изменчивости значений разбуренной части в неразбуренную. По этим картам вычисляется карта коэффициента песчаности. Следующим этапом является создание ГСР и трендового куба литологии по ГСР и карте песчаности. Далее проводится вариограммный анализ, согласно которому на изучаемом объекте установлена зональная анизотропность, что весьма характерно для биотурбированных отложений и отложений с резко изменчивым генезисом, которые не могут быть описаны только геометрической анизотропией [5]. По результатам вариограммного анализа строятся эллипсоиды рангов.

Затем моделируется куб литологии индикаторным методом с учетом 3D тренда и эллипсоидов рангов, полученных на предыдущем шаге [6]. Моделирование «плотного» литотипа проводится по тому же принципу и интерполируется внутри «палеопесчаника», что обусловлено его происхождением. Особенностью построения эллипсоида рангов «плотного» литотипа является то, что эта литологическая разность зачастую распространена спорадически.

Так как породы викуловской свиты не обладают хорошими коллекторскими характеристиками (высокая неоднородность, мелкозернистость осадка), то даже незначительное увеличение количества глинистого материала, увеличение в его составе количества хлорита и гидрослюды приводит к тому, что значения, как пористости, так и проницаемости, резко уменьшаются. Еще одним фактором, существенно ухудшающим ФЕС пород или превращающим породу в неколлектор, является карбонатизация. В отложениях викуловской свиты карбонатный материал присутствует повсеместно. Это или небольшая примесь в цементе, или тонкие невыдержанные слойки с карбонатным цементом, или достаточно выдержанные прослои существенно карбонатизированной породы. Выдержанный как в разрезе, так и по латерали прослой приурочен к перемычке между пластами ВК₁ и ВК₂. В пределах пласта ВК₁, как правило, присутствует несколько существенно карбонатизированных или с базальным карбонатным цементом пе-

счано-алевритовых прослоев толщиной от 5–15 см до 1 м. Их протяженность по латерали сложно оценить из-за большого расстояния между разведочными скважинами, можно предположить, что они протягиваются на расстояние от нескольких метров до первых десятков метров.

По керновым данным скважины № 777П сопоставлены эффективные толщины отложений пластов ВК₁ и ВК₂. Наибольшую долю песчано-алевритовых прослоев имеют отложения нижнего цикла пласта ВК₁ и породы пласта ВК₂ – это 62 и 53 % соответственно. В среднем цикле доля песчано-алевритовых пород минимальна и составляет 28 %. Необходимо учитывать высокую неоднородность, характерную для песчано-алевритовых пород викуловского горизонта. Несмотря на то, что песчано-алевритовые прослои составляют более половины разреза верхней части пласта ВК₂, эффективных нефтенасыщенных толщин лишь 2 %.

Для пласта ВК₁ открытая пористость изменяется от 2,0 до 29,5 %, проницаемость изменяется от $0,01 \cdot 10^{-3}$ до $124 \cdot 10^{-3}$ мкм², водоудерживающая способность изменяется в пределах 22–80,3 %. Для коллекторов ВК₁ минимальная K_n составляет 18 %, $K_{np} - 1 \cdot 10^{-3}$ мкм²; средние значения K_n равны 25 %, $K_{np} - 21,4 \cdot 10^{-3}$ мкм², $K_{во} - 42,6$ %. Для пласта ВК₂ K_n изменяется от 3,3 до 30,5 %, K_{np} изменяется от $0,03 \cdot 10^{-3}$ до $123 \cdot 10^{-3}$ мкм², $K_{во}$ изменяется в пределах 26,2–91,8 %. Для коллекторов ВК₂ минимальная K_n составляет 18 %, $K_{np} - 1 \cdot 10^{-3}$ мкм². Средние значения $K_n - 25$ %, $K_{np} - 24,9 \cdot 10^{-3}$ мкм², $K_{во} - 40,7$ %. В пластах ВК₁ и ВК₂ преобладают коллекторы IV класса по классификации А.А. Ханнина, доля пород III класса составляет менее 5 %. Наиболее перспективными с точки зрения наличия коллекторов с качественными характеристиками являются отложения фронта дельты, а именно песчано-алевритовые прослои нижнего цикла пласта ВК₁ и песчано-алевритовые прослои верхней части пласта ВК₂.

В связи с тем, что месторождение характеризуется сложным геологическим строением, малыми эффективными нефтенасыщенными толщинами ($h_{эф}$) с низкими ФЕС (коэффициентами пористости и проницаемости – K_n , K_{np}), разработка данного месторождения эффективна только при преобладающем горизонтальном разбуривании. В связи с малым количеством фактической скважинной информации (количество наклонно-направленных скважин на площади месторождения явно недостаточно для изучения детального геологического строения) и ограниченной вертикальной разрешенностью сейсмических исследований (>10 м) структурные построения обладают высокой степенью неопределенности. Для уточнения структурного каркаса модели необходимо привлекать информацию, полученную с горизонтальных скважин (ГС) на протяжении всего горизонтального участка, что дает дополнительную информацию о наклоне структурной поверхности в межскважинном пространстве.

Для этого предлагаем использовать методику «геостиринга», которая применяется при сопровождении бурения ГС в режиме реального времени, но для уточнения структурной поверхности эта технология используется уже после бурения ГС [7–10]. Методика основана на создании синтетических диаграмм метода ГК одной из ближайших скважин в наиболее схожем участке и сопоставлении с фактическими данными по каротажу. Сравнение между собой фактических и синтетических диаграмм каротажа позволяет спрогнозировать изменение угла наклона структурной поверхности в межскважинном пространстве и наличие разлома. Совпадение соответствующих синтетических и фактических диаграмм означает, что текущая модель адекватно отображает геологический разрез, если же диаграммы различаются существенно, то необходима корректировка структурной поверхности. Таким образом, получается набор точек скорректированной структурной поверхности в межскважинном пространстве, при котором синтетическая и фактическая диаграммы совпадают, полученные таким образом дополнительные точки используются при перестроении структурной модели.

Данная методика впервые опробована на моделируемом месторождении для уточнения структурной поверхности кровли ВК₁ по данным всех горизонтальных скважин. Пример проведения корректировки структурного каркаса модели пласта ВК₁ по одной горизонтальной скважине сопоставлением синтетической и фактической диаграмм ГК представлен на рис. 7.

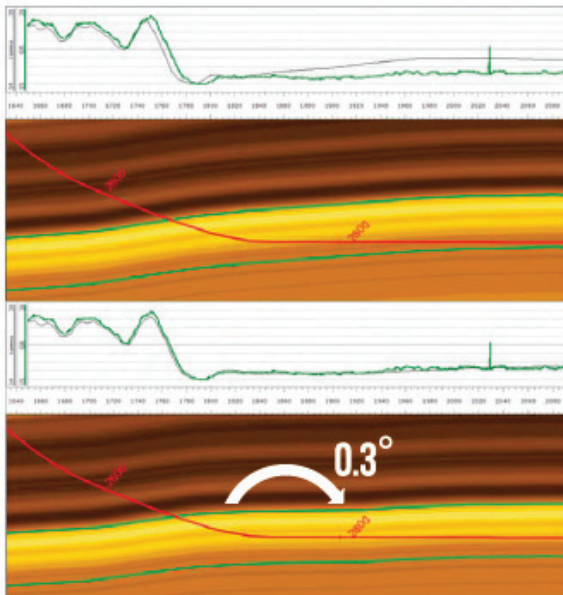


Рис. 7. Сопоставление синтетической и фактической диаграмм ГК (серая линия – синтетическая ГК, зеленая – фактическая ГК)

Fig. 7. Comparison of syntetic and actual charts GK (gray line – syntetic GK, green line – actual GK)

На рисунке видно, как изменение угла наклона структурной поверхности позволило улучшить сходимость диаграмм ГК и УЭС на заданном интервале и получить более точную модель структуры (рис. 8, 9).

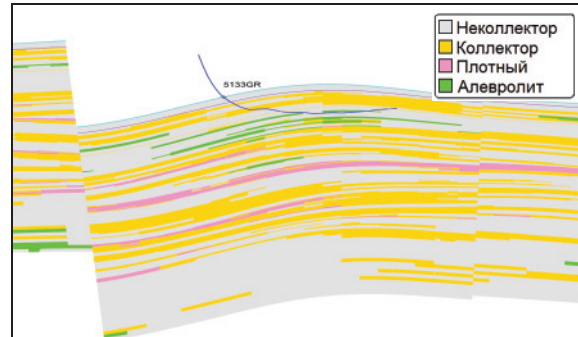


Рис. 8. Структурная модель и куб литологии по объекту ВК до проведения «геостиринга» (учтена только точка входа ГС в пласт)

Fig. 8. Structural model and lithology cube on VK object before geosteering (only the entry point of GS into layer is considered)

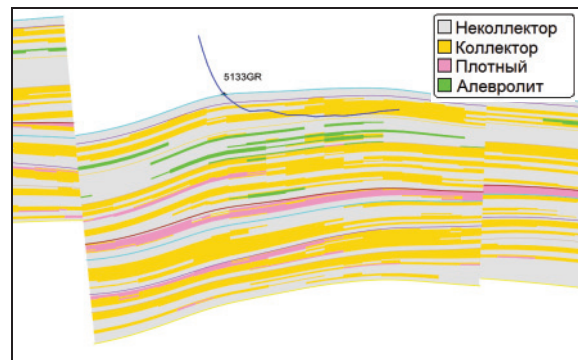


Рис. 9. Скорректированная структурная модель с учетом изменения пласта вдоль всего горизонтального ствола скважины

Fig. 9. Corrected structural model taking into account the change of layer along all horizontal trunk of a well

Таким образом, использование данной технологии позволяет более корректно воспроизвести структуру в межскважинном пространстве в районах горизонтальных скважин. Местоположение горизонтальных стволов соответствует фактическим данным и в данном конкретном случае располагается в коллекторе геологической модели, чего ранее невозможно было добиться путем изменения азимуты скважины, при этом адаптировалась только часть ствола, а не весь горизонтальный участок.

Для интерполяции фильтрационно-емкостных свойств использован стохастический метод модуля петрофизического моделирования, позволяющий в равной степени учесть скважинные данные и тренды, а также задать преобразования в них. Так, для коэффициента открытой пористости задано нормальное распределение, а для коэффициента проницаемости – логнормальное.

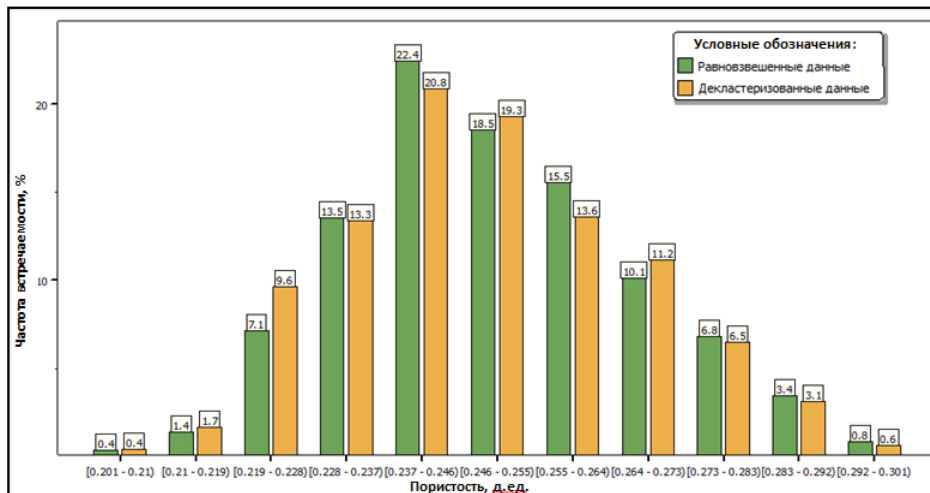


Рис. 10. Гистограммы относительных частот исходных и декластеризованных значений коэффициента открытой пористости

Fig. 10. Histograms of relative frequencies of initial and declustered porosity data

В связи с тем, что большинство скважин пробурено в зонах с улучшенными фильтрационными свойствами, а информация по одиночным разведочным скважинам в зонах с ухудшенными ФЕС оказывает меньшее влияние на интерполяцию свойств в межскважинном пространстве, существует необходимость проведения декластеризации входных данных. Эта процедура преобразует исходную выборку в репрезентативную. После процедуры декластеризации значений коэффициента открытой пористости ($K_{оп}$) максимальные и минимальные значения пористости остаются прежними, а среднее и стандартное отклонения изменяются, что значимо меняет входные параметры для геостатистического распределения (рис. 10). Коэффициент проницаемости рассчитан по регрессионной зависимости от $K_{оп}$.

В качестве тренда для построения куба $K_{оп}$ задан куб, полученный из карт коэффициента пористости для каждого пласта ($ВК_1$ и $ВК_2$), построенных интерполяцией фактической изменчивости.

Анализ связности коллектора для гидродинамического моделирования

Характерной особенностью геологического моделирования является отсутствие возможностей по контролю над характером пространственного изменения геологических свойств, оценки связности коллектора, неоднородностью свойств, хотя данные параметры оказывают существенное влияние на показатели разработки. При построении геологической модели контролируется соответствие модельной и фактической гистограмм распределения параметра литологии, $K_{оп}$, статистические характеристики, при этом практически не контролируется распределение в межскважинном пространстве. Однако пространственное изменение этих значений зачастую не влияет на суммарную величину запасов, можно построить неограниченное количество геологических моделей, имею-

щих идентичные гистограммы частот и несущественно различающиеся значения статистических характеристик, но с практически одинаковыми значениями запасов. Другими словами, задача построения геологической модели, как практически все задачи нефтегазовой геологии, некорректна, то есть имеет бесчисленное множество решений. Поэтому практическое решение задачи построения геологической модели сводится к нахождению решения, согласующегося со всеми эмпирическими разнородными данными, к тому же имеющими разную точность, и геологическими закономерностями моделируемых параметров.

В силу описанных причин, в работе для оценки неопределенности данных в межскважинном пространстве предлагается использовать совместно оценку запасов и критерий связности коллектора. Названный критерий позволяет дополнительно уточнять пространственное изменение коллекторов и ФЕС.

Под связностью коллектора с геометрических позиций в настоящей работе понимается возможность соединения любых двух точек (ячеек 3D-модели) непрерывной линией, все точки которой принадлежат выделенной области коллектора. С позиции гидродинамики это означает, что все части коллектора гидродинамически связны, то есть между любыми двумя точками возможно движение флюида. Коэффициент связности представляет собой отношение объема залежи, где она представлена монолитным нерасчлененным песчаником, к общему объему залежи. Появление низкопроницаемых зон небольшого размера (2–3 ячейки) в 3D-моделях («перемычки») между областями коллекторов значимых размеров в подавляющем большинстве случаев является следствием приближенности геологических моделей. Особенно в тех ситуациях, когда эмпирических данных явно недостаточно, вследствие чего методы интерполяции работают с большой погрешностью. Из сказанного

следует, что необходимо проанализировать модель на предмет наличия перемычек, особенно в тех случаях, когда при дискретизации значения в ячейках отнесены к не коллектору с невысокой долей вероятности, изменить литологическое значение ряда ячеек.

Нижеописанный подход позволяет учесть динамические характеристики объекта при выборе реализации геологической модели. Динамические характеристики рассчитываются с применением концепции линий тока и оценивают гидродинамическую связность резервуара при расчете потока между скважинами [11–22]. Такими характеристиками могут являться: связный поровый объем (суммарный поровый объем, ассоциированный со всеми линиями тока модели), коэффициенты охвата заводнением и извлечения флюида, время прорыва воды и др. В данном методе используется преимущество симуляторов линий тока в скорости расчета, что дает возможность рассчитать большое количество реализаций за приемлемое время. Для ускорения расчетов может быть применена модель однофазного течения флюида. Таким образом, для каждой реализации геологической модели оценивается гидродинамическая связность резервуара, которая используется как дополнительный критерий для ранжирования и выбора реализаций. Такой метод позволяет выбрать различающиеся модели (реализации) не только по величине объема углеводородов, но и по характеристикам фильтрации флюида в пласте. Уточним, что упрощенные гидродинамические расчеты достаточны лишь для оценки гидродинамической связности резервуара, а для определения показателей разработки требуется выполнение полноценного гидродинамического моделирования.

Данная процедура выполняется средствами Workflow, проводится анализ чувствительности

модели при изменении геологических свойств пласта, анализ связности коллектора с учетом модели линий тока и выбор адекватных моделей для дальнейших гидродинамических расчетов. Данный алгоритм заложен в качестве плагина к программному комплексу Petrel. В данной работе приведен реальный пример практического применения плагина на одном из месторождений Западной Сибири.

В геологической модели варьировались следующие параметры:

- Frac1 – доля коллектора с учётом плотной литологической разности в объеме пласта (%), frac11 – доля глины в объеме пласта; RX1, RY1, RZ1 (м) – ранги фаций при моделировании литологических разностей: глина и коллектор в направлениях OX, OY и OZ соответственно,
- Frac2 – доля коллектора в объеме Frac1 (%), frac22 – доля плотной литологической разности в объеме Frac1; RX2, RY2, RZ2 (м) – ранги фаций при моделировании коллектора и плотного коллектора,
- RX3, RY3, RZ3 (м) – ранги изменения коэффициента пористости.

Всего было посчитано 420 реализаций геологической модели пласта + расчет линий тока. Среди рассчитанных реализаций выделяется диапазон вероятности $P10 \pm 10\%$, $P50 \pm 10\%$, $P90 \pm 10\%$ по количеству геологических запасов (поровый объем) и по коэффициенту связности коллектора (рис. 11, прямоугольные области красного, зеленого и синего цветов). Из данных областей выбираются варианты по двум критериям: запасы (поровый объем) и связность с одинаковыми значениями вероятностей: P10, P50, P90. В итоге в процессе кластеризации выбрано 9 моделей для дальнейшего расчета с помощью гидродинамического симулятора.

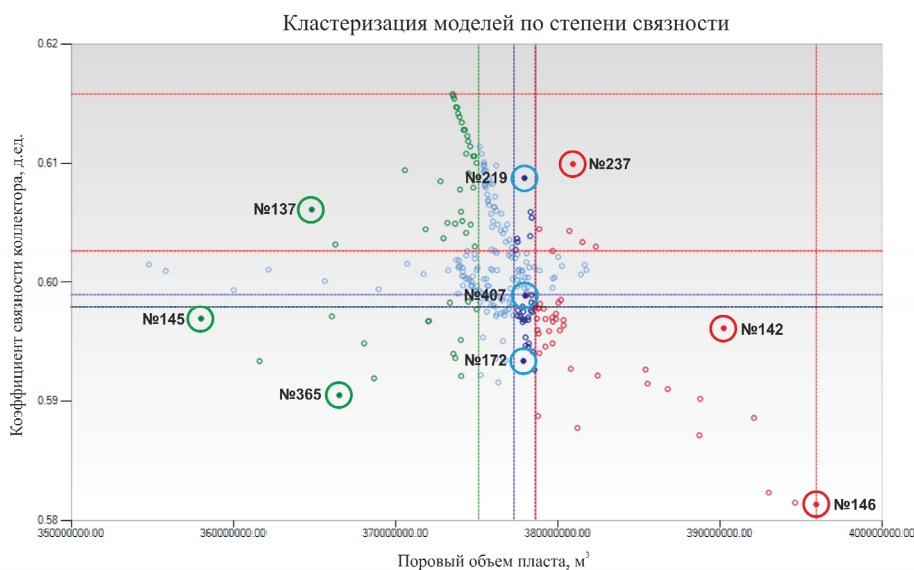


Рис. 11. Декластеризация моделей по связности и запасам (поровый объем)

Fig. 11. Declustering of models on connectivity and stocks

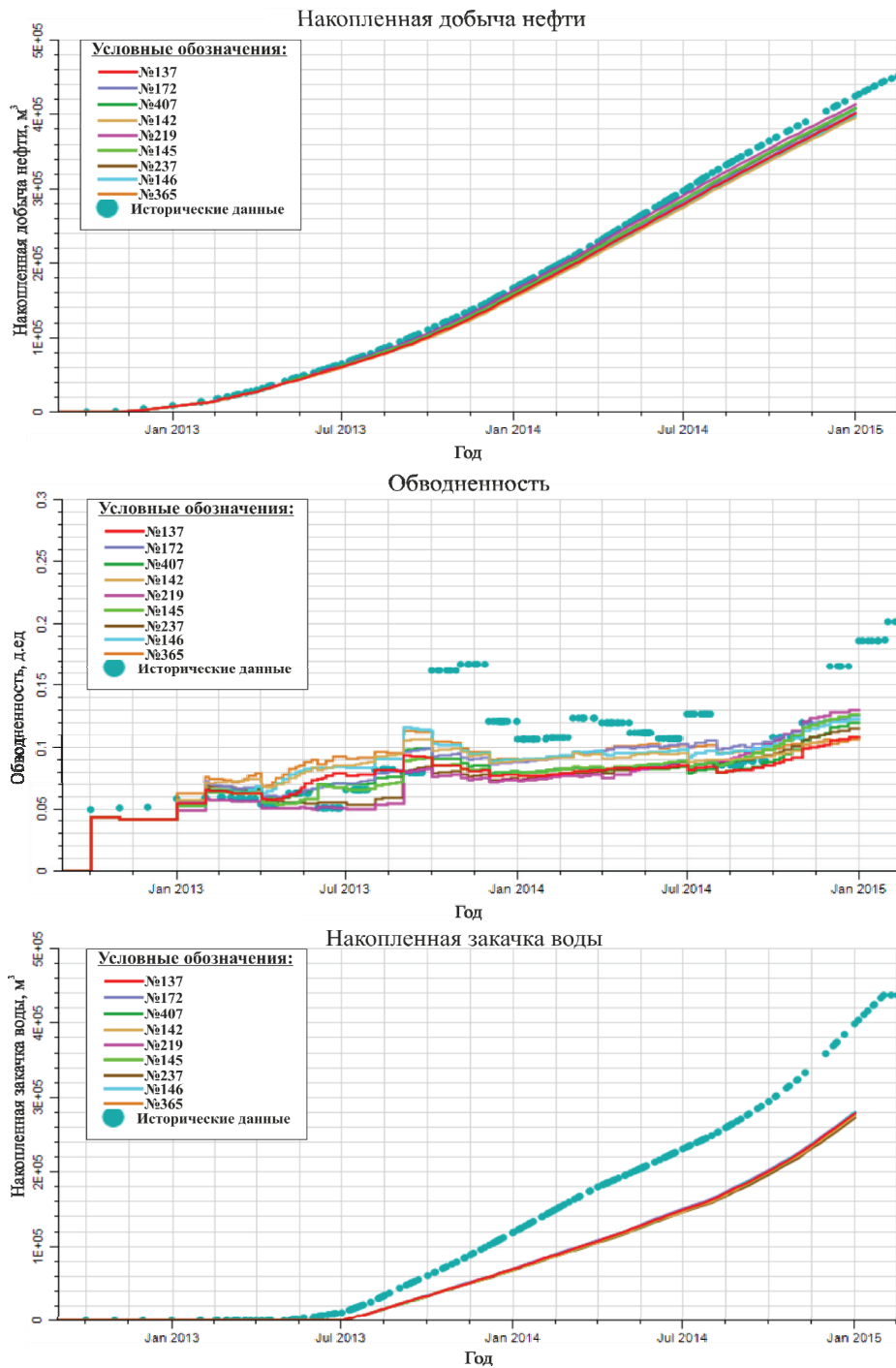


Рис. 12. Результаты гидродинамических расчетов по девяти геологическим моделям
Fig. 12. Results of hydrodynamic calculations for nine geological models

Согласно результатам гидродинамических расчетов девяти реализаций геологической модели в зависимости от степени связности коллектора получена довольно неплохая первоначальная сходимость модельных расчетов с историческими данными (рис. 12).

- Минимальную ошибку имеет реализация 219, которая характеризуется высокой связностью и величиной запасов P50 (табл. 1).

- Минимальные ошибки также имеют варианты (237, 172, 407), характеризующиеся разной связностью при величине запасов ~P50.
- Наиболее точно описывают историю разработки реализации с величиной запасов P50, хоть и с разной величиной связности.
- Исходя из сказанного, реализацию 219 рекомендуется использовать для дальнейшей «тонкой» настройки по истории разработки.

Таблица 1. Абсолютные погрешности геолого-промысловых параметров по девяти представительным геомоделям

Table 1. Absolute errors of geologist and trade parameters on nine presented models

№ варианта Version no.	Добыча нефти, м ³ Oil production rate, m ³	Накопленная добыча нефти, м ³ Cumulative oil production, m ³	Обводненность продукции, % Water cut, %	Забойное давление, бар Bottom-hole pressure, bar	Закачка воды, м ³ Water injection rate, m ³	Добыча воды, м ³ Water production rate, m ³	Суммарная погрешность Sum error
137	202	41733	4,00	1296	557	138	43930
145	187	36264	4,03	1265	564	138	38422
365	178	37815	3,66	1354	570	122	40041
219	186	32621	4,34	1266	555	152	34784
407	184	35703	4,09	1278	555	137	37861
172	184	35440	3,95	1300	552	123	37603
237	192	34706	4,19	1264	578	145	36891
142	205	46302	3,93	1303	569	128	48515
146	212	45984	4,30	1300	558	137	48195

После адаптации выбранной гидродинамической модели обоснованы точки заложения эксплуатационных скважин. По данным семи пробуренных скважин проведена оценка качества геологических моделей, результаты оценки представлены в табл. 2. Из приведённых данных видно, что среднее отклонение абсолютных отметок кровли пласта по модели от фактических результатов по авторской модели составляет 1,6 м, а по предыдущей – 4,1 м, среднее отклонение эффективных

нефтенасыщенных толщин по авторской модели равно 0,7 м, по предыдущей – 4,1 м, причём в скв. 5675 отклонение $h_{эфф}$ составляет 11,1 м. Последнее число говорит о наличии грубых погрешностей в предыдущей модели. В целом данные табл. 2 говорят о достаточно хорошей прогнозной способности авторской модели.

Выводы

В целом из изложенного следует, что использование предложенного подхода дает возможность более эффективно и согласованно оценивать неопределенности разной природы, использовать широкий комплекс данных и критериев при создании геологических моделей, что значительно повышает их точность, а значит, снижает риски и повышает технологические показатели разработки месторождения. И что не менее важно, время на адаптацию гидродинамической модели снижается в 3–5 раз.

Таким образом, разработана методика построения структурной модели с учетом анализа неопределенности входных данных. Эта методика особенно актуальна для месторождений с низкой степенью изученности и/или существенной неравномерностью сети наблюдений. Методика построения геологической модели также позволяет учитывать связность коллектора в межскважинном пространстве и данные по горизонтальным скважинам. Окончательный выбор наиболее вероятной и адекватной модели для гидродинамического моделирования проводится по суммарной погрешности ряда геолого-промысловых параметров.

Таблица 2. Сопоставление данных по новым скважинам и по геологическим моделям

Table 2. Comparison of the data on well-drilling and geological model

Скважина Well	Первоначальная модель Initial model			Авторская модель Author's model						Фактические результаты Actual results			
	А.о. кровли, м Roof a.m., m	А.о. коллектора, м Collector a.m., m	Δ а.о. кровли пласта (модуль), м Roof Δ a.m., m	А.о. коллектора (модуль), м Collector a.m., m	А.о. кровли, м Roof a.m., m	А.о. коллектора, м Collector a.m., m	Нэф. нн, м Hef. nn, m	Δ а.о. кровли (модуль), м Roof Δ a.m., m	А.о. коллектора (модуль), м Collector a.m., m	Δ Нэф. нн, м Hef. nn, m	А.о. кровли, м Roof a.m., m	А.о. коллектора, м Collector a.m., m	Нэф. нн, м Hef. nn, m
5684	-1398,0	-1398,0	2,0	0,1	-1398,0	-1400,0	4,7	2,0	1,9	0,4	-1396,0	-1398,1	5,1
5609	-1395,6	-1397,3	4,2	4,6	-1399,0	-1401,4	7,9	0,8	0,5	1,9	-1399,8	-1401,9	6,0
5611	-1401,6	-1403,0	5,4	4,8	-1398,2	-1399,4	6,4	2,0	1,2	2,3	-1396,2	-1398,2	8,7
5675	-1396,0	-1403,0	6,6	11,1	-1390,8	-1392,3	5,2	1,4	0,4	0,1	-1389,4	-1391,9	5,1
5727	-1393,6	-1395,0	3,9	4,6	-1397,0	-1399,5	6,7	0,5	0,1	0,1	-1397,5	-1399,6	6,6
5700	-1394,0	-1396,0	4,8	5,0	-1392,3	-1393,6	5,5	3,1	2,6	0,2	-1389,2	-1391,0	5,3
5707	-1381,6	-1383,6	1,6	1,2	-1381,6	-1383,6	9,0	1,6	1,2	0,1	-1380,0	-1382,4	8,9
Среднее отклонение по модулю, м Average deviation, m			4,1	4,5	Среднее отклонение по модулю, м Average deviation, m			1,6	1,1	0,7	-	-	-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карагодин Ю.Н. Нефть и газ викуловской свиты // Наука в Сибири. – 2008. – № 41. – С. 10–13.
2. Атлас «Геология и нефтегазоносность Ханты-Мансийского автономного округа» / под ред. Э.А. Ахпателова, В.А. Волкова, В.Н. Гончаровой и др. – Екатеринбург: Изд-во «ИздатНаука-Сервис», 2004. – 148 с.
3. Состав, строение и условия формирования коллекторов группы ВК восточной части Красноленинского нефтяного месторождения (Западная Сибирь) / В.П. Алексеев, Э.О. Амон, Ю.Н. Федоров и др. / под ред. В.П. Алексеева. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2011. – 325 с.
4. Технологическая схема опытно-промышленной разработки нефтяного месторождения. – Тюмень, 2014. – 337 с.
5. Александров В.М., Казанская Д.А., Белкина В.А. Особенности геологического строения темпеститов в отложениях викуловской свиты // Нефть и газ. – 2015. – № 5. – С. 10–15.
6. Практические советы по 3D геологическому моделированию / Б.В. Белозёров, А.В. Буторин, П.Н. Герасименко, Е.В. Журавлёва, Р.З. Фаизов. – СПб.: Газпромнефть НТЦ, 2015. – 354 с.
7. Куваев И., Уваров И., Пайразян К. ПО Геонавигации. Современные подходы к оптимизации горизонтального бурения // Oil & Gas Journal Russia. – 2016. – № 06. – С. 48–52.
8. Воробьев В.С., Петров А.Н. Использование горизонтальных скважин при построении геологических моделей // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2017. – № 12. – С. 24–32.
9. Кульчицкий В.В. Геонавигация горизонтальных скважин и геореакторов на месторождениях Западной Сибири // Нефть. Газ. Новации. – 2015. – № 3. – С. 8–12.
10. Геонавигация скважин / В.В. Кульчицкий, Г.А. Григашкин, А.С. Ларионов, А.В. Щебапов. – М.: МАКС Пресс, 2008. – 312 с.
11. Incorporating Uncertainties in Well-Count Optimization with Experimental Design for the Dcepwater Agbami Field / G.M. Narahara, J.J. Spokes, D.D. Brennan et al. // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Houston, September 26–29, 2004. – Paper SPE 91012.
12. Idrobo E.A., Choudhary M.K., Datta G.A. Swept Volume Calculations and Ranking of Geostatistical Reservoir Models Using Stream-line Simulation // SPE/AAPG Western Regional Meeting. – Long Beach, California, USA, June 1–23, 2000. – Paper SPE 62557.
13. Statistical Ranking of Stochastic Geomodels Using Streamline Simulation: a Field Application / J.R. Gilman, Hai-Zui Meng, M. J. Uland et al. // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – San Antonio, TX, September 29 – October 02, 2002. – Paper SPE 77374.
14. Saad N., Maroongroge V. Ranking Geostatistical Models Using Tracer Production Data // SPE European 3-D Reservoir Modeling Conference. – Stavanger, Norway, April 16–17, 1996. – Paper SPE 35494.
15. Schlumberger GeoQuest. FrontSim Technical Description. 2016.
16. Гармаш В.А. Использование динамических характеристик при выборе представительных реализаций геологической модели // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 12. – С. 110–111.
17. Akhill Datta-Gupta, Michael J.King. Streamline simulation: Theory and Practice. – USA: Society of Petroleum Engineers, 2007. – 404 p.
18. Shook G.M., Mitchell K.M. A Robust measure of heterogeneity for ranking earth models: The F-PHI curve and Dynamic Lorentz Coefficient // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – New Orleans, October 4–7, 2009. – Paper SPE 124625.
19. Reservoir modeling and simulation of the Lajas Formation outcrops (Argentina) to constrain tidal reservoirs of the Halten Terrace (Norway) / I. Brandsaeter et al. // Petroleum Geoscience. – 2005. – V. 11. – P. 37–46.
20. Ranking and upscaling of geostatistical models by use of streamline simulation: a field case study / H. Ates, A. Bahar, S. Salem, M. Charfeddine, M.G. Kelkar // SPE Reservoir Evaluation & Engineering. – 2005. – № 8. – P. 22–32.
21. Utilization of the GRM (Geological Representative Models) to integrate different types of uncertainties in the decision making process / M.A. Silveira, A.P. Araujo Costa, G.J. Zamora // EUROPEC/EAGE Conference and Exhibition. – Amsterdam, the Netherlands, June 8–11, 2009. – Paper SPE 120924.
22. Statistical ranking of stochastic geomodels using streamline simulation: a field application / J. Gilman et al. // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – San Antonio, Texas, September 29 – October 2, 2002. – Paper SPE 77374.

Поступила 26.12.2017 г.

Информация об авторах

Боженюк Н.Н., аспирант кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Тюменского индустриального университета.

Белкина В.А., кандидат физико-математических наук, доцент кафедры геологии месторождений нефти и газа Тюменского индустриального университета.

Стрекалов А.В., доктор технических наук, профессор кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Тюменского индустриального университета.

UDC 553.26.036(571.1212)

GEOLOGICAL MODEL OF THE VIKULOVSKAYA SUIT DEPOSITS, INCLUDING ANALYSIS OF A MANIFOLD CONNECTIVITY AND THE DATA ON HORIZONTAL WELLS

Nadezhda N. Bozhenyuk¹,

bojenuk_nn@mail.ru

Valentina A. Belkina¹,

belkina@tsogu.ru

Aleksandr V. Strelkov¹,

hydrasym@mail.ru

¹ Tyumen Industrial University,
70, Melnikaite Avenue, Tyumen, 625000, Russia.

Relevance. Deposits of the Vikulovskaya suite of Krasnoleninsky uplift have high productivity and complex geological structure. In addition, a large number of deposits are drilled with a rare and often irregular well network. In consequence of that there is significant deficit of empirical data for adequate 3D geological and simulation modeling.

The aim of the research is to develop a methodology for 3D geological modeling, which considers irregularity of measurements, connectivity of reservoir and horizontal wells' data. This methodology helps greatly increase accuracy of geological model and decrease amount of iterations of simulation model.

Methods: analysis of rocks lithological composition, division of accumulation cycles into cyclites by lithological characteristics, adaptation of results of semivariogram analysis into undrilled areas by the data of the drilled ones, geosteering by horizontal wells, criterions of reservoir connectivity and 3D geological and simulation modeling.

Results. Three cyclites in VK₁ and VK₂ reservoirs were determined by the results of core analysis. This allows making detail correlation with determinations of three layers in each several reservoirs. Parameters of semivariogram which were obtained in the areas with high density of measurements and seismic data, as well as the data on horizontal wells give the reason to update structural framework, lithology, reservoir properties and saturation in 3D geological model. The above listed models gave high correlation with the original data. The increased accuracy of geological models allowed decreasing computation complexity of simulation modeling.

Key words:

Oil and gas geology, deposit, layer, three-dimensional geological model, manifold connectivity, geosteering, uncertainty.

REFERENCES

- Karagodin Yu.N. Neft i gaz vikulovskoy svity [Oil and gas of the vikulovskaya suit]. *Nauka v Sibiri*, 2008, no. 41, pp. 10–13.
- Afatelov E.A., Volkov V.A., Goncharova V.N. Atlas «Geologiya i neftegazonosnost Khanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga» [Geology and oil-and-gas content of Khanty-Mansi Autonomous Okrug]. Ekaterinburg, IzdatNaukaServis Publ., 2004. 148 p.
- Alekseev V.P. Sostav, stroenie i usloviya formirovaniya kollektorov gruppy VK vostochnoy chasti Krasnoleninskogo neftyanogo mestorozhdeniya (Zapadnaya Sibir) [Composition, structure and conditions of formation of collectors of the VK group in the east part of the Krasnoleninsky oil field (Western Siberia)]. Ekaterinburg, UGGU Publ., 2011. 325 p.
- Tehnologicheskaya skhema opytno-promyshlennoy razrabotki neftyanogo mestorozhdeniya [Technological scheme of trial development of the oil field]. Tyumen, 2014. 337 p.
- Aleksandrov V.M., Kazanskaya D.A., Belkina V.A. Features of the geological structure of tempest in vikulovskie suite sediments. *Oil and gas*, 2015, no. 5, pp. 10–15. In Rus.
- Belozherov B.V., Butorin A.V., Gerasimenko P.N., Zhuravleva E.V., Faizov R.Z. *Prakticheskie soveti po 3D geologicheskoy modelirovaniyu* [Practical advice on 3D geological modeling]. St-Petersburg, Gazprom-neft NTC Publ., 2015. 354 p.
- Kuvaev I., Uvarov I., Pairazyan K. Geosteering software package. *Oil & Gas Journal Russia*, 2016, no. 06, pp. 48–52. In Rus.
- Vorobiev V.S., Petrov A.N. Use of horizontal wells at creation of geological models. *Geology, geophysics and development of oil and gas field*, 2017, no. 12, pp. 24–32. In Rus.
- Kulchitsky V.V. Geo-steering of the horizontal wells and georeactors on field of the Western Siberia. *Neft. Gaz. Novatsii*, 2015, no. 03, pp. 8–12. In Rus.
- Kulchitsky V.V., Grigashkin G.A., Larionov A.S., Schebatov A.V. *Geonavigatsiya skvazhin* [Geo-steering of the wells]. Moscow, MAKS Press, 2008. 312 p.
- Narahara G.M., Spokes J.J., Brennan D.D. Incorporating Uncertainties in Well-Count Optimization with Experimental Design for the Deepwater Agbami Field. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Houston, September 26–29, 2004. Paper SPE 91012.
- Idrobo E.A., Choudhary M.K., Datta G.A. Swept Volume Calculations and Ranking of Geostatistical Reservoir Models Using Stream-line Simulation. *SPE/AAPG Western Regional Meeting*. Long Beach, California, USA, June 19–23, 2000. Paper SPE 62557.
- Gilman J.R., Hai-Zui Meng, Uland M.J. Statistical Ranking of Stochastic Geomodels Using Streamline Simulation: a Field Application. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. San Antonio, TX, September 29 – October 02, 2002. Paper SPE 77374.
- Saad N., Maroongroge V. Ranking Geostatistical Models Using Tracer Production Data. *SPE European 3-D Reservoir Modeling Conference*. Stavanger, Norway, April 16–17, 1996. Paper SPE 35494.
- Schlumberger GeoQuest*. FrontSim Technical Description. 2016.
- Garmash V.A. Ispolzovanie dinamicheskikh kharakteristik pri vybore predstavitelnykh realizatsii geologicheskoy modeli [Use of dynamic characteristics when selecting representative realization of geological model]. *Oil-industry*, 2014, no. 12, pp. 110–111.
- Akhill Datta-Gupta, King M.J. *Streamline simulation: Theory and Practice*. USA, Society of Petroleum Engineers, 2007. 404 p.
- Shook G.M., Mitchell K.M. A robust measure of heterogeneity for ranking earth models: the F-PHI curve and Dynamic Lorentz Coefficient. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. New Orleans, October 4–7, 2009. Paper SPE 124625.

19. Brandsaeter I. Reservoir modeling and simulation of the Lajas Formation outcrops (Argentina) to constrain tidal reservoirs of the Halten Terrace (Norway). *Petroleum Geoscience*, 2005, vol. 11, pp. 37–46.
20. Ates H., Bahar A., Salem S., Charfeddine M., Kelkar M.G. Ranking and upscaling of geostatistical models by use of streamline simulation: a field case study. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2005, no. 8, pp. 22–32.
21. Silveira M.A., Araujo Costa A.P., Zamora G.J. Utilization of the GRM (Geological Representative Models) to integrate different types of uncertainties in the decision making process. *EURO-PEC/EAGE Conference and Exhibition*. Amsterdam, the Netherlands, June 8–11, 2009. Paper SPE 120924,
22. Gilman J. Statistical ranking of stochastic geomodels using streamline simulation: a field application. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. San Antonio, Texas, September 29 – October 2, 2002. Paper SPE 77374.

Received: 26 December 2017.

Information about the authors

Nadezhda N. Bozhenyuk, postgraduate, Tyumen Industrial University.

Valentina A. Belkina, Cand. Sc., associate professor, Tyumen Industrial University.

Aleksandr V. Strelkalov, Dr. Sc., professor, Tyumen Industrial University.

УДК 665.61+543.42

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ДИСПЕРСИОННОЙ СРЕДЫ НА СВОЙСТВА ВЫСОКОПАРАФИНИСТЫХ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ, ОБРАБОТАННЫХ УЛЬТРАЗВУКОМ

Ануфриев Роман Викторович¹,
slaymer89@mail.ru

Волкова Галина Ивановна^{1,2},
galivvol@yandex.ru

Юдина Наталья Васильевна¹,
natal@ipc.tsc.ru

¹ Институт химии нефти СО РАН,
Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 4.

² Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

Актуальность работы состоит в необходимости получения новых данных о влиянии состава дисперсионной среды на структурно-механические свойства парафинсодержащих систем, обработанных в ультразвуковом поле, что позволит определить оптимальные условия воздействия на высокопарафинистые дисперсные системы, включая нефтяные, с целью снижения вязкостно-температурных характеристик и ингибирования процесса осадкообразования.

Цель работы: установить влияние состава дисперсионной среды на структурно-механические свойства и процесс осадкообразования парафинсодержащих модельных систем после ультразвуковой обработки.

Методы исследования: ротационная вискозиметрия, метод «холодного стержня», ИК-Фурье-спектроскопия, хроматомасс-спектрометрия.

Результаты. Исследованы структурно-механические свойства и процесс осадкообразования модельных растворов нефтяного парафина в декане и авиационном керосине ТС-1, обработанных в акустическом поле. Вязкостно-температурные и энергетические параметры растворов нефтяного парафина в декане возрастают при увеличении времени ультразвуковой обработки. Высокая алифатичность дисперсионной среды, характерная для растворов нефтяного парафина в декане, обуславливает снижение агрегативной и седиментационной устойчивости и интенсификацию процесса осадкообразования в высокопарафинистых системах после акустического воздействия. В составе осадков, выделенных из растворов нефтяного парафина, возрастает содержание высокомолекулярных *n*-алканов C_{27} – C_{32} . Ароматические компоненты, присутствующие в дисперсионной среде растворов нефтяного парафина в ТС-1, замедляют процесс кристаллизации парафиновых углеводородов и снижают количество осадков, выделенных из обработанных образцов. В составе этих осадков концентрируются ароматические и нафтеновые углеводороды, захваченные парафинами в процессе формирования дисперсной фазы. Полученные экспериментальные данные показывают, что использование модельных растворов нефтяного парафина позволяет адекватно описать поведение высокопарафинистых нефтей в акустическом поле.

Ключевые слова:

Нефтяной парафин, ультразвуковая обработка, вязкость, температура застывания, осадкообразование, гистерезис, внутренняя энергия.

Введение

В связи с выработкой активных запасов легкой нефти все более востребованными становятся месторождения высоковязких и высокопарафинистых нефтей. Для улучшения структурно-механических характеристик тяжелых нефтей (снижение вязкости и температуры застывания, скорости образования асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО)) используются различные тепловые, физические и химические методы. К физическим методам относится и акустическое воздействие полем ультразвукового диапазона частот. В настоящее время в России разработаны ультразвуковые устройства и технологии, которые предлагается использовать в нефтяной отрасли (добыча и транспорт нефти, очистка нефтяного оборудования от АСПО) [1–8].

По мнению авторов, изложенному в работах [1–4, 9], ультразвуковая обработка (УЗО) углево-

дородов может привести к разрушению не только межмолекулярных, но и внутримолекулярных связей, что способствует снижению вязкости, температуры застывания дисперсных систем, повышению нефтеотдачи пластов и выхода легких фракций при переработке нефти.

Исследователи [1–3] считают, что в ультразвуковом поле происходит разрушение свободных высокомолекулярных молекул линейного и разветвленного строения и алкилароматических углеводородов с длинными боковыми цепями. Разрыв молекул происходит в местах, где энергия связи меньше действующей на нее силы. В алканах это углерод-углеродная связь в центре молекулы, в алкилароматических углеводородах – β -связь боковой цепи [3]. В результате таких реакций могут образоваться высокомолекулярные компоненты, которые после снятия ультразвуковой нагрузки будут формировать новые центры сложных струк-

турных единиц (ССЕ), что может привести к увеличению вязкости. Углеводороды, образовавшиеся при рекомбинации низкомолекулярных радикалов, в зависимости от своей природы по окончании ультразвуковой обработки могут стать компонентами дисперсионной среды и снизить вязкость или попасть в имеющиеся или вновь образующиеся сольватные оболочки дисперсных частиц [9]. На примере декана показано, что образовавшиеся в результате гомолитического разрыва разнообразные радикалы вступают в реакции инициирования, роста, передачи и обрыва (рекомбинация или диспропорционирование) [10]. Авторы работы [11] исследовали воздействие ультразвуковой и гидродинамической кавитации на химические превращения в процессах крекинга органических соединений различной природы (линейные алканы – октан, ундекан, гексадекан; карбоновые кислоты – декановая кислота, олеиновая кислота; спирты – деканол; сложные эфиры – этилкапроат). Для анализа продуктов кавитационного воздействия использовались методы газовой и высокоэффективной жидкостной хроматографии, хромато-масс-спектрологии и ЯМР-спектрологии. Анализ образцов показал, что после кавитационной обработки степень превращения любого класса органических соединений была незначительной и не превышала 1,1 %.

Таким образом, результаты исследований, направленных на изучение влияния акустического воздействия на поведение органических веществ, неоднозначны, что, по-видимому, связано с различными условиями эксперимента: объекты, температура и время воздействия, использование акустических установок разной конструкции и мощности.

Несмотря на то, что скорость химических реакций в органических средах после обработки акустическим полем невысока, воздействие кавитации проявляется в эффектах нагрева жидкостей и интенсификации тепломассообменных процессов в них, что приводит к разрушению межмолекулярных связей и, следовательно, улучшению вязкостно-температурных характеристик структурированных систем.

В работах [12–20] показано влияние УЗО на свойства нефтей различного компонентного состава. Максимальная депрессия вязкости и температуры застывания при незначительных изменениях состава наблюдается после УЗО смолистых парафинистых нефтей [13–15]. Ультразвуковое воздействие на высокопарафинистые малосмолистые нефти приводит к повышению вязкости, температуры застывания и количества парафиновых отложений [16, 17]. Повышение вязкости высокопарафинистой нефти наблюдали также в работе [18], что объясняется увеличением степени диспергирования кристаллической фазы парафиновых углеводородов и взаимодействием их с асфальтенами. Напротив, на примере высокопарафинистой малосмолистой нефти Кумкольского месторождения (11 мас. % парафинов, 0,11–0,92 мас. % ас-

фальтенов, 4,8–8,42 мас. % смол) показано, что с увеличением времени обработки и мощности ультразвукового излучения их плотность и кинематическая вязкость заметно уменьшаются, температура застывания при времени обработки 5 мин снижается с плюс 8 °С до минус 6 °С [19]. Также положительное влияние УЗО на структурно-механические свойства высокопарафинистых нефтей Харьятгинского месторождения (10–30 мас. % парафинов, до 6 мас. % смол, до 3 мас. % асфальтенов) представлено в работе [20].

Обзор научных работ показал, что структурно-реологические свойства дисперсных систем, в том числе нефтей близкого компонентного состава, после обработки в ультразвуковом поле изменяются неоднозначно. Кроме этого, в литературе отсутствует информация, касающаяся механизма действия ультразвука, объясняющего поведение дисперсных систем в условиях акустического воздействия. В связи с этим для выяснения природы влияния акустического воздействия на структурно-механические свойства и состав дисперсных систем и прогноза их поведения необходимо проведение систематических исследований. Процесс исследования может быть упрощен, если в качестве объектов использовать модельные растворы, состав которых легко установить.

Данная работа посвящена исследованию влияния природы дисперсионной среды на свойства растворов нефтяного парафина (НП), обработанных в ультразвуковом поле.

Экспериментальная часть

В качестве объектов исследования взяты растворы нефтяного парафина марки П-2 (ГОСТ 23683–89) концентрацией 6 % мас. в декане (ГОСТ 6034–74) и авиационном керосине марки ТС-1 (ГОСТ 10227–86).

Акустическую обработку образцов проводили с использованием ультразвукового дезинтегратора UD-20 на рабочей частоте $22 \pm 1,65$ кГц, амплитуде колебания на конце концентратора 16 мкм, интенсивности 6 Вт/см². Отбирали 70–80 г образца и обрабатывали в течение заданного времени в термостатируемой ячейке при 20–35 °С, чтобы исключить термическую составляющую.

Измерение реологических параметров образцов проводили с помощью вискозиметра Brookfield DV-III ULTRA в широком интервале скоростей сдвига. Температуру начала кристаллизации и застывания образцов определяли с использованием прибора «ИНПН» (КРИСТАЛЛ).

ИК-спектры образцов регистрировали на FTIR-спектрометре NICOLET 5700 в области 400–4000 см⁻¹. Значения оптической плотности полос поглощения нормировали по оптической плотности полос в области 1465 и 1610 см⁻¹.

Процесс осадкообразования изучали с использованием установки, работающей по принципу «холодного стержня» при температуре потока парафинсодержащей системы 30 °С, температуре

стержня 8 °С (растворы в декане) и 6 °С (растворы в ТС-1) в течение 1 ч.

Индивидуальный углеводородный состав осадков, выделенных из растворов НП, определяли с использованием хроматомасс-спектрометрической квадрупольной системы GSMS-DFS «Termo Scientific», сканируя масс-хроматограммы по характеристичным ионам в режиме программирования температуры: начальная температура 80 °С, конечная 300 °С, скорость 4 °/мин. Использовали капиллярную кварцевую колонку длиной 30 м и внутренним диаметром 0,25 мм с неподвижной фазой DB-5MS (толщина пленки 0,35 мкм). В качестве стандарта был использован дейтероаценафтен. Обработку полученных результатов проводили с помощью программы Xcalibur.

Результаты и их обсуждение

В работе [21] отмечается, что носителями прочности дисперсных структур твердых парафинов являются *n*-алканы, а примеси изо- и циклоалканов, а также ароматических углеводородов оказывают разупрочняющее и пластифицирующее действие, проявляющееся в снижении температуры плавления, прочности и объемной доли усадки парафинов. Исходя из этого, можно проследить влияние УЗО на свойства парафинсодержащих систем на примере растворов нефтяного парафина (НП) в растворителях различной природы.

В нашей работе исследованы структурно-механические свойства растворов НП в декане и авиационном керосине марки ТС-1, а также состав осадков, выделенных из этих растворов. Углеводородный состав керосина ТС-1 представлен смесью предельных алифатических углеводородов до C₁₆ (24,1 мас. % *n*-алканы, 26,9 мас. % изоалканы), циклическими (20,3 мас. %) и ароматическими компонентами (28,7 мас. %). Использование растворов в ТС-1 позволяет моделировать поведение

в ультразвуковом поле высокопарафинистых нефтей ароматического типа, а растворов в декане – нафтенового типа.

Анализ реологических кривых показывает, что вязкость раствора НП в декане растет при увеличении времени обработки (рис. 1). После 15 мин УЗО вязкость увеличивается в 12 раз по сравнению с исходным раствором. Вязкость дисперсий в ТС-1 изменяется экстремально, проходя через минимум при времени воздействия 10 мин.

Изотермические кривые течения дисперсий НП в ТС-1 и декане, снятые при возрастании и снижении скорости сдвига, дают петлю гистерезиса, характерную для тиксотропных жидкостей. По площади петель гистерезиса рассчитаны значения удельной энергии разрушения структурированных систем (ΔW) под действием механического сдвига [22]. Значения ΔW для растворов в ТС-1 проходят через минимум для образца, обработанного в течение 10 мин. После более продолжительного воздействия структурно-реологические параметры растворов в ТС-1 возрастают (рис. 2, табл. 1).

Таблица 1. Влияние времени ультразвуковой обработки на удельную энергию разрушения и количество осадков в растворах нефтяного парафина

Table 1. Effect of ultrasonic treatment on specific fracture energy and mass of sediment of the petroleum wax solutions

Время ультразвуковой обработки, мин Sonication time, min	Удельная энергия разрушения, кДж/м ³ Specific fracture energy, kJ/m ³		Масса осадка, г/100 г Mass of sediment, g/100 g	
	ТС-1 TS-1	Декан Decane	ТС-1 TS-1	Декан Decane
0	52	171	2,0	2,6
10	41	-56	1,6	7,9
15	50	-66	2,1	9,0

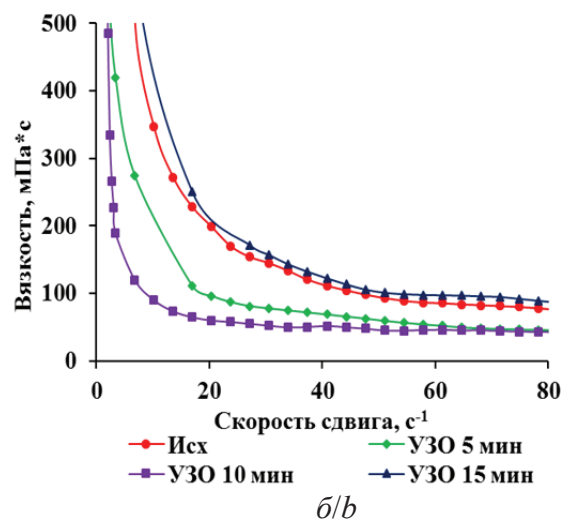
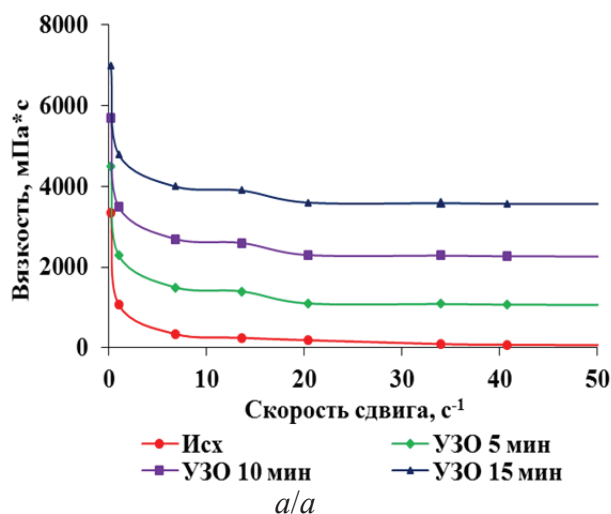


Рис. 1. Влияние времени ультразвуковой обработки на вязкость растворов нефтяного парафина в декане (а) и ТС-1 (б) при 10 °С

Fig. 1. Effect of sonication time of the petroleum wax solutions in decane (a) and TS-1 (b) on dynamic viscosity; 10 °С

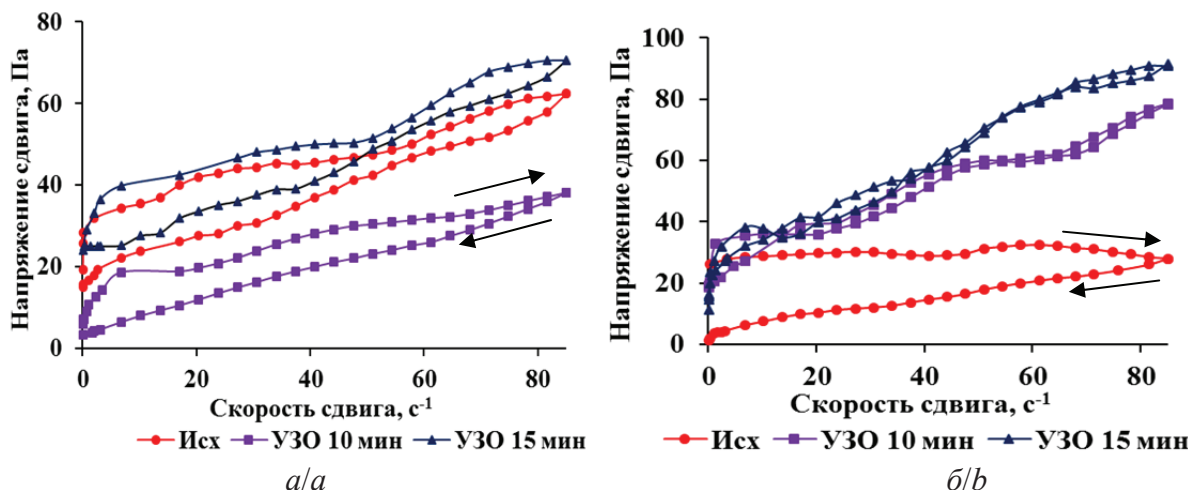


Рис. 2. Реологические зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига для растворов нефтяного парафина в ТС-1 (а) и декане (б) при температуре 10 °С

Fig. 2. Rheological dependence of shear stress on shear rate for petroleum wax solutions in TS-1 (a) and decane (b) at 10 °C

Отрицательные значения ΔW для растворов в декане можно объяснить суммированием двух релаксационных процессов: восстановление структуры после снятия механической нагрузки и стремление возбужденной в акустическом поле системы к равновесному состоянию через агрегирование первичных кристаллов.

Важнейшими характеристиками дисперсных систем являются их агрегативная и седиментационная устойчивость. Агрегативную устойчивость растворов НП оценивали по изменению интенсивности пропускания растворов, охлаждаемых со скоростью 0,5 °/мин. Температура зарождения первичных кристаллов парафина в ТС-1 снижается на 0,9 и 1,2 °С после 10 и 15 мин обработки соответственно (рис. 3, а). Для растворов НП в де-

кане получены антибатные зависимости: после 15 мин воздействия температура начала кристаллизации повышается на 0,7 °С (рис. 3, б).

Отмеченные изменения структурно-механических параметров и агрегативной устойчивости растворов НП после УЗО несомненно отразятся на их седиментационной устойчивости. Масса осадков, выделенных из растворов в декане, растет при увеличении времени воздействия (табл. 1). Что касается растворов в ТС-1, наблюдается ингибирование процесса осадкообразования после УЗО, и аналогично изменениям вязкостно-температурных параметров, минимальное количество осадка образуется после 10 мин обработки. Полученный осадок, в отличие от плотного осадка из раствора в декане, имеет рыхлую структуру (табл. 1).

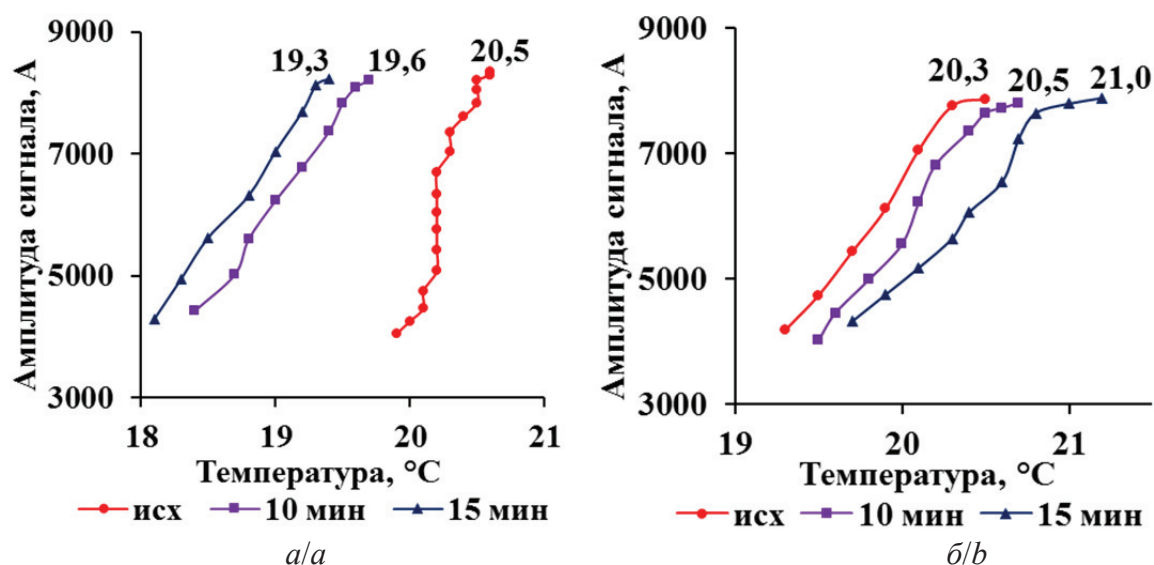


Рис. 3. Влияние времени УЗО на агрегативную устойчивость растворов нефтяного парафина в декане (а) и ТС-1 (б)

Fig. 3. Effect of ultrasonic treatment time on aggregative stability of petroleum wax solutions in TS-1 (a) and decane (b)

Согласно данным хромато-масс-спектрометрии характер молекулярно-массового распределения (ММР) *n*-алканов, выделенных из осадков, не зависит от типа дисперсионной среды, а максимум распределения приходится на C_{26} (рис. 4, 5), но в осадках с увеличением времени УЗО снижается относительное содержание фракции C_{22} – C_{26} за счет вовлечения в процесс осадкообразования более высокомолекулярных *n*-алканов (табл. 2).

В составе осадков, выделенных из раствора НП в ТС-1, идентифицированы алкилциклогексаны и ароматические компоненты, алкилбензолы и нафталины, содержащиеся в составе растворителя и окклюдируемые *n*-алканами в процессе осадкообразования (рис. 4, б). Захват циклических и ароматических углеводородов изменяет структуру осадка по сравнению с осадком из декана (при прочих равных условиях) и понижает их температуру застывания.

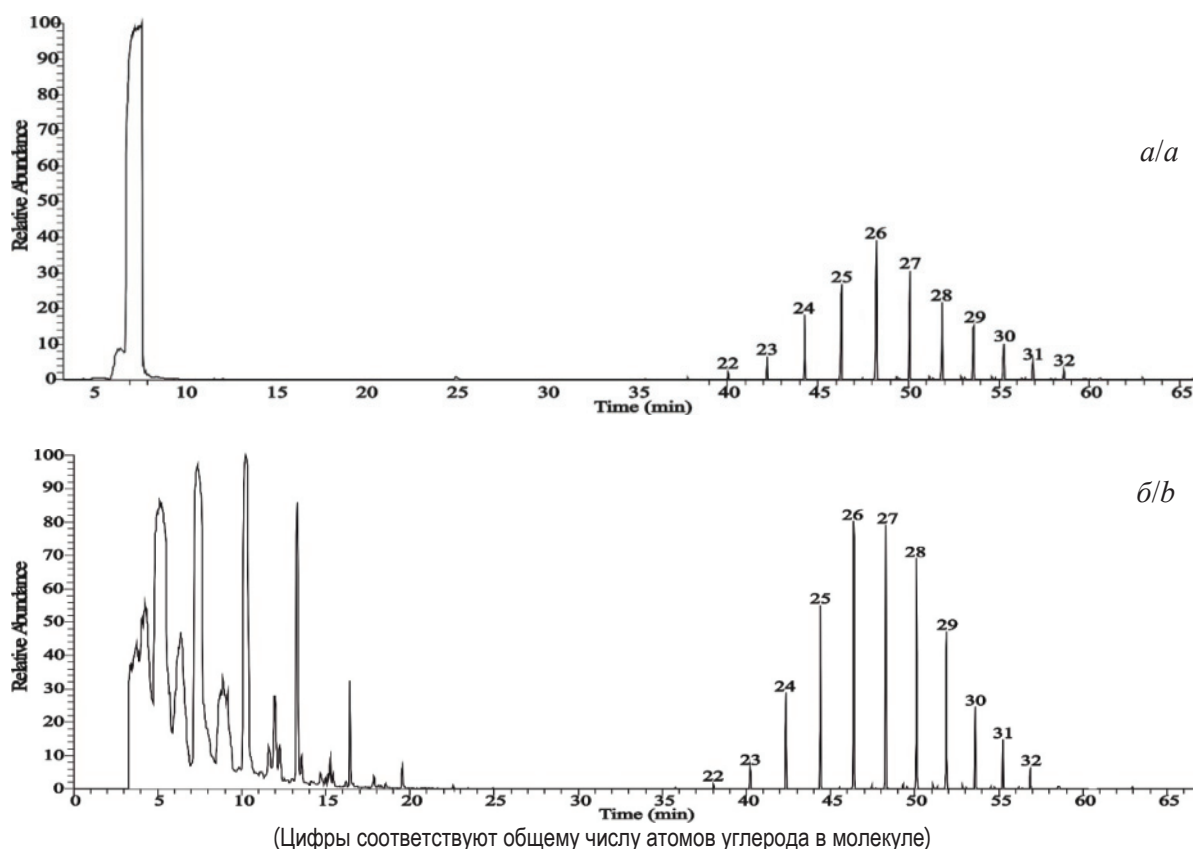


Рис. 4. Масс-хроматограммы осадков нефтяного парафина по иону с $m/z=57$ из растворов в декане (а) и ТС-1 (б)
 Fig. 4. Mass-chromatograms of petroleum wax precipitations with ion $m/z=57$ from solutions in decane (a) and TS-1 (b)

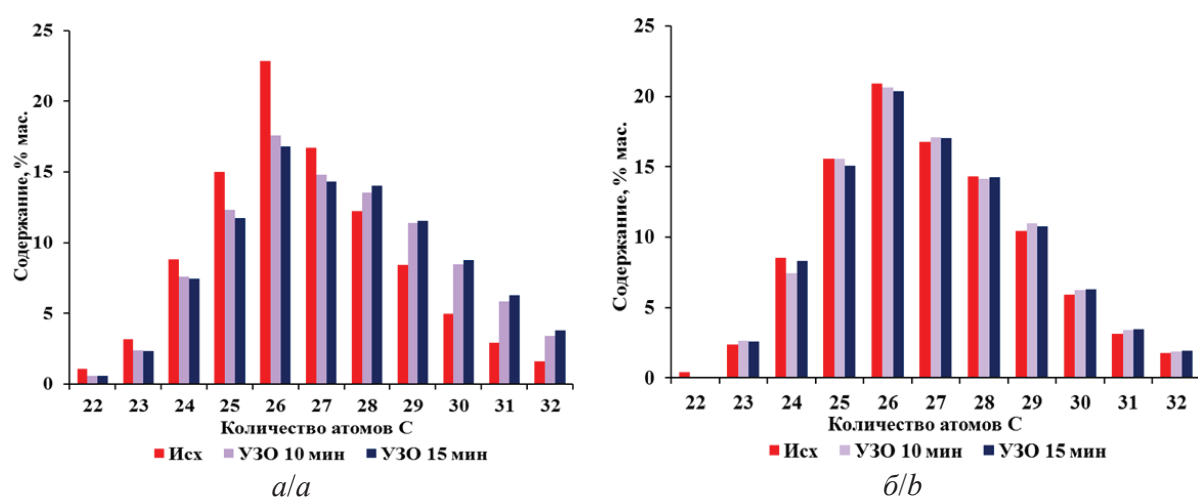


Рис. 5. Распределение *n*-алканов, выделенных из растворов нефтяного парафина, в декане (а) и в ТС-1 (б)
 Fig. 5. Distribution of *n*-alkanes allocated from petroleum wax solutions in decane (a) and TS-1 (b)

Таблица 2. Влияние ультразвуковой обработки на содержание *n*-алканов в осадках модельных растворов нефтяного парафина

Table 2. Effect of ultrasonic treatment on the content of *n*-alkanes in the sediments of petroleum wax solutions

Время ультразвуковой обработки, мин Sonication time, min	Содержание, % отн./Content, wt. %			
	Декан/Decane		ТС-1/TS-1	
	C ₂₂ -C ₂₆	C ₂₇ -C ₃₂	C ₂₂ -C ₂₆	C ₂₇ -C ₃₂
0	41,8	58,2	47,3	52,7
10	40,0	60,0	41,0	59,0
15	38,5	61,5	46,0	54,0

Таблица 3. Нормированные оптические плотности полос в ИК-спектрах осадков, выделенных из раствора нефтяного парафина в ТС-1

Table 3. Normalized optical density of bands in the IR spectra of sediments, allocated from the petroleum wax solution in the TS-1

Время ультразвуковой обработки, мин Sonication time, min	Степень алифатичности, D ₇₂₀ +D ₁₃₈₀ /D ₁₆₀₀ , о.е. Alifacity degree, D ₇₂₀ +D ₁₃₈₀ /D ₁₆₀₀ , r.u.	Положение полосы поглощения, см ⁻¹ Position of the absorption band, cm ⁻¹					
		1600	1380	850	805	760	725
		Нормированные оптические плотности относительно полосы 1465 см ⁻¹ , о.е.* Normalized optical density relative to the band in 1465 cm ⁻¹ , r.u.					
0	10,10	0,057	0,447	0,044	0,075	0,111	0,132
10	10,21	0,057	0,453	0,045	0,078	0,114	0,140
15	10,39	0,059	0,465	0,047	0,081	0,117	0,147

*о. е. – относительные единицы/*r.u. – relative units.

По данным ИК-спектроскопии, в осадках, выделенных из ТС-1, наблюдается тенденция к увеличению степени алифатичности ($\Sigma D_{720} + D_{1370} / D_{1610}$), разветвленности (1380 см⁻¹) и интенсивности полос поглощения метиленовых групп в парафиновых

цепях с числом атомов углерода >4 (720 см⁻¹) (табл. 3). Содержание ароматических компонентов в осадках, выделенных из обработанных растворов, также несколько возрастает (п. п. 1600, 850, 805, 760 см⁻¹).

Заключение

Таким образом, на примере модельных растворов НП в декане показано, что высокая алифатичность дисперсионной среды и отсутствие в ее составе ароматических и нафтеновых компонентов приводят к снижению агрегативной и седиментационной устойчивости высокопарафинистых систем после УЗО. Увеличение времени обработки растворов НП в декане интенсифицирует процесс осадкообразования, приводит к росту в составе осадков доли высокомолекулярных *n*-алканов. В составе осадков, выделенных из растворов НП в ТС-1, характеризующихся повышенной степенью ароматичности дисперсионной среды, концентрируются ароматические и нафтеновые УВ, захваченные парафиновыми углеводородами в процессе формирования дисперсной фазы, что объясняет снижение температуры зарождения первичных кристаллов парафина и повышение агрегативной и седиментационной устойчивости дисперсной системы после УЗО.

Экспериментальные данные, полученные с использованием модельных растворов НП, согласуются с результатами исследований нефтей различного компонентного состава, проведенных при схожих параметрах ультразвукового поля, и вполне могут быть использованы для прогноза поведения дисперсных систем после ультразвукового воздействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Degradation of hydrocarbons in the cavitation region activated by aqueous electrolyte solutions in the presence of electric field / A.S. Besov, K.Yu. Koltunov, S.O. Brulev, V.N. Kirilenko, S.I. Kuz'menkov, E.I. Pal'chikov // Technical Physics Letters. – 2003. – V. 29. – P. 207–209.
- Promtov M.A. Cavitation technology for quality improvement of hydrocarbon fuels // Chemical and Petroleum Engineering. – 2008. – № 1–2. – P. 63–66.
- Рябов В.Д. Термические и каталитические превращения углеводородов и других соединений нефти. – М.: МИНХ и ГП им. И.М. Губкина, 1982. – 100 с.
- Устройство деструкции углеводородов и его применение: пат. Рос. Федерация № 2392046; заявл. 27.07.2009; опубл. 20.06.2010, Бюл. № 17. – 15 с.
- Sonochemical approaches to enhanced oil recovery / V.O. Abramov, A.V. Abramova, V.M. Bayazitov, L.K. Altunina, A.S. Gerasin, D.M. Pashin // Ultrasonics Sonochemistry. – 2015. – V. 25. – P. 76–81.
- Mason T.J., Larimer P.J. Sonochemistry: theory, application, and uses of ultrasound in chemistry. – New-York: Ellis Harwood, 1988. – 155 p.
- Ультразвук. Аппараты и технологии / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, С.С. Хмелев, С.Н. Цыганок. – Барнаул: ООО «Издательский дом Бия», 2015. – 687 с.
- Способ перекачивания вязких жидкостей: пат. Рос. Федерация № 2346206; заявл. 3.10.2007; опубл. 10.02.2009, Бюл. № 4. – 6 с.
- Klokov T.P., Volodin Yu.A., Glagoleva O.F. Effect of ultrasound on the colloidal-disperse properties of petroleum systems // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. – 2006. – № 42. – P. 43–46.
- Alkane Sonochemistry / K.S. Suslick, J.J. Gawienowski, P.F. Schubert, H.H. Wang // J. Phys. Chem. – 1983. – № 87. – P. 2299–2301.
- A study of chemical transformations of organic compounds under the action of cavitation / V.A. Yakovlev, S.G. Zavarukhin, V.N. Parmon, V.T. Kuzavov, S.V. Stebnovskii, N.V. Malykh, L.I. Mal'tsev // Russian Journal of Physical Chemistry B. – 2010. – № 4. – P. 227–234.
- Влияние ультразвука на коллоидную структуру судовых топлив / М.Ю. Доломатов, В.Н. Гордеев, А.Г. Афанасьев, М.И. Браславский // Химия и технология топлив и масел. – 1994. – № 5. – С. 8–12.
- Volkova G.I., Anufriev R.V., Yudina N.V. Effect of ultrasonic treatment on the composition and properties of waxy high-resin oil // Petroleum Chemistry. – 2016. – V. 56. – № 8. – P. 683–688.
- Mullakaev M.S., Volkova G.I., Gradov O.M. Effect of ultrasound on the viscosity-temperature properties of crude oils of various compositions // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2015. – V. 49. – № 3. – P. 287–296.
- Influence of Ultrasound and Heat Treatment on the Rheological Properties of Ust-Tegusskoe Oil / M.S. Mullakaev, D.F. Asylbaev, V.G. Prachkin, G.I. Volkova // Chemical and Petroleum Engineering. – 2014. – V. 49. – № 9–10. – P. 584–587.

16. Anufriev R.V., Volkova G.I. Structural and mechanical properties of highly paraffinic crude oil processed in high-frequency acoustic field // *Key Engineering Materials*. – 2016. – V. 670. – P. 55–61.
17. Ануфриев Р.В., Волкова Г.И. Влияние ультразвука на структурно-механические свойства нефтей и процесс осадкообразования // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2016. – Т. 327. – № 10. – С. 50–58.
18. Supramolecular structures of oil systems as the key to regulation of oil behavior / A.Z. Tukhvatullina, E.E. Barskaya, V.N. Kouryakov, Y.M. Ganeeva, T.N. Yusupova, G.V. Romanov // *Journal of petroleum and environmental biotechnology*. – 2013. – V. 4. – № 4. – P. 152–160.
19. Влияние ультразвука на температуру застывания нефтей / Т.О. Омарилиев, К.Р. Алимбаев, А.У. Сарсенбаева, У.Г. Нуридинова // *Химия нефти и газа: Материалы 4-й Междунар. конференции*. – Томск: SST, 2000. – С. 433–435.
20. Козачок М.В. Обоснование технологии перекачки высокопарафинистой нефти Харьягинского месторождения с использованием комплексного воздействия магнитного поля и ультразвуковых колебаний: дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2012. – 126 с.
21. Эксплуатационные свойства товарных парафинов разного углеводородного состава / Ж.Т. Хадисова, Г.П. Фадеева, Э.А. Александрова, Б.В. Салтамурадова // *Химия и технология топлив и масел*. – 2004. – № 3. – С. 45–47.
22. Энергетика гидромеханического разрушения структуры высокопарафинистых нефтей / В.П. Выговской, В.А. Данекер, С.В. Рикконен, А.И. Теплов // *Автоматизация и информационное обеспечение технологических процессов в нефтяной промышленности*. – Томск: Изд-во ТГУ, 2002. – Т. 2. – 408 с.

Поступила 22.12.2017 г.

Информация об авторах

Ануфриев Р.В., кандидат химических наук, младший научный сотрудник Института химии нефти СО РАН.

Волкова Г.И., кандидат химических наук, старший научный сотрудник Института химии нефти СО РАН; доцент кафедры высокомолекулярных соединений и нефтехимии Химического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета.

Юдина Н.В., кандидат технических наук, заведующая лабораторией реологии нефти Института химии нефти СО РАН.

UDC 665.61+543.42

INFLUENCE OF DISPERSION MEDIUM COMPOSITION ON PROPERTIES OF WAX DISPERSE SYSTEMS AFTER SONICATION

Roman V. Anufriev¹,
slaymer89@mail.ru

Galina I. Volkova^{1,2},
galivvol@yandex.ru

Natalia V. Yudina¹,
natal@ipc.tsc.ru

¹ Institute of Petroleum Chemistry Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, 4, Akademicheskoy Avenue, Tomsk, 634055, Russia.

² National Research Tomsk State University, 36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the work is in need to obtain new data on the impact of dispersion medium composition on structural and mechanical properties of the wax-systems, treated in ultrasonic field. This will determine the optimal conditions for exposure to wax disperse systems, including oil, to reduce the viscosity-temperature characteristics and inhibiting process of sedimentation.

The aim of the work is to determine the effect of dispersion medium composition on structural and mechanical properties and sedimentation of wax-model systems after ultrasonic treatment.

The methods: rotary viscosimetry, pour point, liquid-adsorption chromatography, method of «cold finger», wax deposit, FT-IR spectroscopy, GC-MS.

The results. The authors have studied the structural and mechanical properties and sedimentation of petroleum wax solutions in the decane and aviation kerosene TS-1 treated in the acoustic field. Viscosity, pour point, and energetic parameters of the petroleum wax solutions in decane increase at ultrasonic exposure. High alifacity of dispersion medium, which is characteristic for petroleum wax solution in decane, causes a reduction of aggregate and sedimentation stability and intensification of precipitation in high-paraffin crude oil systems after sonication. In composition of sediments allocated from the petroleum wax solutions, the content of n-alkanes C₂₇–C₃₂ increases. The aromatic compounds in the dispersion medium of the petroleum wax solution in TC-1 retard crystallization of paraffin hydrocarbons and decrease the amount of sediments, allocated from treated samples. In composition of these sediments the aromatic and naphthenic hydrocarbons, captured by paraffins during formation of disperse phase are concentrated. The experimental data show that the use of the petroleum wax solutions can adequately describe the behavior of high-paraffin crude oils in the acoustic field.

Key words:

Petroleum wax, sonication, viscosity, pour point, sedimentation, hysteresis, internal energy.

REFERENCES

- Besov A.S., Koltunov K.Y., Brylev S.O., Kirilenko V.N., Kuzmenkov S.I., Palchikov E.I. Degradation of hydrocarbons in the cavitation region activated by aqueous electrolyte solutions in the presence of electric field, *Technical physics letters*, 2003, vol. 29, no. 3, pp. 207–209.
- Promtov M.A. Cavitation technology for quality improvement of hydrocarbon fuels. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2008, no. 1–2, pp. 63–66.
- Ryabov V.D. *Termicheskie i kataliticheskie prevrashcheniya uglevodorodov i drugih soedineniy nefti* [Thermal and catalytic conversion of hydrocarbons and other compounds of oil]. Moscow, MINKH Publ., 1982. 100 p.
- Anikin V.S., Anikin V.V. *Sposob akusticheskoy obrabotki mnogofaznogo produkta i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Hydrocarbon destruction device and application thereof]. Patent RF, no. 2392046, 2010.
- Abramov V.O., Abramova A.V., Bayazitov V.M., Altunina L.K., Gerasin A.S., Pashin D.M. Sonochemical approaches to enhanced oil recovery. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2015, vol. 25, pp. 76–81.
- Mason T.J., Larimer P.J. *Sonochemistry: theory, application, and uses of ultrasound in chemistry*. New-York, Ellis Harwood, 1988. 155 p.
- Khmelev V.N., Shalunov A.V., Khmelev S.S., Tsyganok S.N. *Ultrazvuk. Apparaty i tekhnologii* [Ultrasound. Machines and technology]. Barnaul, Biya Publ. house, 2015. 687 p.
- Khmelev V.N., Abramenko D.S., Khmelev S.S., Tsyganok S.N. *Sposob perekachivaniya вязких жидкостей* [Viscous fluid pumping method]. Patent RF, no. 2346206, 2009.
- Klokoval T.P., Volodin Yu.A., Glagoleva O.F. Effect of ultrasound on the colloidal-disperse properties of petroleum systems. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 2006, no. 42, pp. 43–46.
- Suslick K.S., Gawienowski J.J., Schubert P.F., Wang H.H. Alkane Sonochemistry. *J. Phys. Chem.*, 1983, no. 87, pp. 2299–2301.
- Yakovlev V.A., Zavarukhin S.G., Parmon V.N., Kuzavov V.T., Stebnovskii S.V., Malykh N.V., Mal'tsev L.I. A study of chemical transformations of organic compounds under the action of cavitation. *Russian Journal of Physical Chemistry B.*, 2010, no. 4, pp. 227–234.
- Dolomatov M.Yu., Gordeev V.N., Afanasev A.G., Braslavsky M.I. Vliyaniye ultrazvuka na kolloidnuyu strukturu sudovyykh topliv [Effect of ultrasonic on colloidal structure of marine fuels]. *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel*, 1994, no. 5, pp. 8–12.
- Volkova G.I., Anufriev R.V., Yudina N.V. Effect of ultrasonic treatment on the composition and properties of waxy high-resin oil. *Petroleum Chemistry*, 2016, vol. 56, no. 8, pp. 683–688.

14. Mullakaev M.S., Volkova G.I., Gradov O.M. Effect of ultrasound on the viscosity-temperature properties of crude oils of various compositions. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2015, vol. 49, no. 3, pp. 287–296.
15. Mullakaev M.S., Asylbaev D.F., Prachkin V.G., Volkova G.I. Influence of Ultrasound and Heat Treatment on the Rheological Properties of Ust-Tegusskoe Oil. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2014, vol. 49, no. 9–10, pp. 584–587.
16. Anufriev R.V., Volkova G.I. Structural and mechanical properties of highly paraffinic crude oil processed in high-frequency acoustic field. *Key Engineering Materials*, 2016, vol. 670, pp. 55–61.
17. Anufriev R.V., Volkova G.I. Effect of ultrasound on structural and mechanical properties of oils and sedimentation process]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 10, pp. 50–58. In Rus.
18. Tukhvatullina A.Z., Barskaya E.E., Kouryakov V.N., Ganeeva Y.M., Yusupova T.N., Romanov G.V. Supramolecular structures of oil systems as the key to regulation of oil behavior. *Journal of petroleum and environmental biotechnology*, 2013, vol. 4, no. 4, pp. 152–160.
19. Omaraliev T.O., Alimbaev K.R., Sarsenbaeva A.U., Nuridinova U.G. Vliyanie ultrazvuka na temperaturu zastyvaniya neftey [Effect of ultrasound on the pour point of crude oils]. *Khimiya nef-
ti i gaza. Materialy 4-i Mezhdunarodnoy konferentsii* [Chemistry of oil and gas. Proc. 4th Int. conf.], Tomsk, 2000. pp. 433–435.
20. Kozachok M.V. Obosnovanie tekhnologii perekachki vysokoparafinistoy nefti Kharyaginskogo mestorozhdeniya s ispolzovaniem kompleksnogo vozdeystviya magnitnogo polya i ultrazvukovykh kolebaniy. Dis. Kand. nauk [Substantiation of technology of high-paraffin crude oil transfer in Kharyaga using a complex of magnetic field and ultrasound. Cand. Diss.]. St. Petersburg, 2012. 126 p.
21. Khadisova Z.T., Fadeeva G.P., Aleksandrova E.A., Saltamuradova B.V. Performance characteristics of different commodities paraffin hydrocarbon composition. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 2004, no. 3, pp. 45–47. In Rus.
22. Vygovskoy V.P., Daneker V.A., Rikkonen S.V., Teplov A.I. Energetika gidromekhanicheskogo razrusheniya struktury vysokoparafinistykh neftey [Hydromechanical energy of destroying the structure of high-paraffin oils]. *Avtomatizatsiya i informatsionnoe obespechenie tekhnologicheskikh protsessov v neftyanoy promyshlennosti* [Automation and Information Support of Operating Procedures in Oil Industry]. Ed. by A.K. Khorkov. Tomsk, TSU Press, 2002. Vol. 2, pp. 224–229.

Received: 22 December 2017.

Information about the authors

Roman V. Anufriev, Cand. Sc., junior researcher, Institute of Petroleum Chemistry Russian Academy of Sciences, Siberian Branch.

Galina I. Volkova, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Petroleum Chemistry Russian Academy of Sciences, Siberian Branch; associate professor, National Research Tomsk State University.

Natalia V. Yudina, Cand. Sc., head of the laboratory, Institute of Petroleum Chemistry Russian Academy of Sciences, Siberian Branch.

УДК 551.578.46:504.4:622.333.012

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ РИСКИ ОТ ВЛИЯНИЯ ТОКСИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ СНЕЖНОГО ПОКРОВА В РАЙОНЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ТОМСКОЙ ГРЭС-2

Осипова Нина Александровна¹,

osipova@tpu.ru

Таловская Анна Валерьевна¹,

talovskaj@yandex.ru

Филимоненко Екатерина Анатольевна¹,

filimonenko@tpu.ru

Язиков Егор Григорьевич¹,

yazikoveg@tpu.ru

Новиков Сергей Автономович¹,

nsa@tpu.ru

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

Актуальность исследования обусловлена необходимостью устойчивого развития угольной энергетики, и как одной компоненты для достижения этой устойчивости – прогнозных оценок влияния твердых выбросов, образующихся при сгорании угля, при переходе сырья в усвояемые формы, на здоровье населения в условиях увеличения доли угольной генерации в топливном комплексе.

Цель исследования: определение уровня загрязнения воздуха твердыми выбросами от объектов теплоэнергетики (Томской ГРЭС-2); определение величины ингаляционного риска здоровью населения.

Объекты. Для проведения оценки экологических рисков для здоровья на территории г. Томска были выбраны участки, соответствующие территориям с наибольшим притоком техногенных пылевых частиц в зоне воздействия Томской ГРЭС-2, а также участки вне зоны влияния Томской ГРЭС-2, для сопоставления результатов исследования.

Методы: атмогеохимический; методы оценки риска воздействия химических веществ на здоровье человека; метод восстановления концентрации элементов в атмосферном воздухе на основе их содержания в твердой фазе снегового покрова; анализ неопределенности в расчете среднесуточных доз с использованием случайной выборки значений при известных законах распределения учитываемых величин.

Результаты. На территории, подверженной влиянию ГРЭС-2, установлен высокий уровень накопления в твердом осадке снега Zn, Ba, W, Ni, V, Cu, Co относительно фоновой территории, что отражает специфику влияния выбросов рассматриваемой теплоэлектростанции на атмосферный воздух. Наибольший удельный вклад в интегральный уровень неканцерогенных рисков от хронического ингаляционного поступления в организм металлов в окрестностях ГРЭС-2 вносят Cu, Al, Mn, Ba и Zn. Для всех элементов, обладающих канцерогенными свойствами, за исключением Cr (VI), значения индивидуального канцерогенного риска ниже 10^{-6} , что соответствует пренебрежимо малому уровню риска. Индивидуальный канцерогенный риск, вызванный вдыханием Cr (VI), имеет значения в интервале от $7,65 \cdot 10^{-7}$ до $4,6 \cdot 10^{-5}$, и значения, соответствующие верхней границе, расцениваются согласно общепринятой методологии как предельно допустимый риск. Уровни рисков от ингаляционного воздействия химических элементов в зонах воздействия Томской ГРЭС-2, а также значения индивидуального канцерогенного риска являются приемлемыми.

Ключевые слова:

Твердый осадок снега, тяжелые металлы, ингаляционный риск, канцерогенный риск, неканцерогенный риск, теплоэлектростанция.

Введение

Проблемы создания энергоэффективных производств тесно переплетаются с необходимостью снижения негативного воздействия этого вида деятельности на экосистемы и здоровье человека. Действительно, устойчивое развитие угольной энергетики как процесса технологического и экономического развития предполагает не только надежное и бесперебойное энергоснабжение потребителей, не только рациональное использование ресурсов, но и, несомненно, минимизацию воздействия на окружающую среду с целью повышения эффективности функционирования региона [1]. В России доля угольной генерации в структуре электроэнергетики является стабильно высокой. Согласно существующим

прогнозам увеличение доли угольной генерации к 2030 г. составит от 14,6 до 25,6 % [2]. Большой объем добычи, переработки и использования угля вызывает массу экологических проблем, вынуждающих оценивать экологические риски, связанные с освоением угольных ресурсов [3, 4].

Экологические риски от теплоэнергетических объектов определяются составом и объемом сжигаемых углей, высотой труб, через которые отходящие газы поступают в атмосферный воздух, местными климатическими условиями, близостью источников загрязнения к жилью. Эти риски еще выше в Сибири, на территориях с резко-континентальным климатом и низкой способностью атмосферы к самоочищению.

Методологической основой для широко востребованных и развиваемых направлений по оценке экологических рисков [5–17] служат методики: USEPA, Risk Assessment Guidance (1989), Health Effects Assessment Summary Tables (1997), The Risk Assessment Information System. RAIS (2005), WHO, Env Health Criteria (1994). В России основой является Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ (2004) [16, 18]. Наибольшая часть всех рисков здоровью от воздействия факторов окружающей среды связана с загрязненным атмосферным воздухом. По многочисленным литературным данным, среди всех источников загрязнения атмосферного воздуха тепловые электростанции, работающие на угле, являются крупнейшими из них и оказывают ощутимый эффект на здоровье проживающего населения [16, 19, 20].

Традиционно рассматриваются 4 группы загрязняющих веществ, характерных для выбросов объектов ТЭК, в отношении которых и идет развитие методологии анализа риска: газообразные оксиды углерода, азота, серы; твердые частицы (PM_{2,5}, PM₁₀); тяжелые металлы (как правило, в большинстве исследований, Fe, Co, Ni, Cd, Cr, As, Pb, Cu, Zn, Mn) и ртуть; полиароматические углеводороды, для которых особенно важна оценка риска канцерогенных эффектов [8, 21]. Металлы имеют определяющее значение в формировании токсических эффектов и риска здоровью, несмотря на то, что газообразные вещества преобладают в структуре атмосферных выбросов.

Работы по оценке риска воздействия тяжелых металлов, присутствующих в окружающей среде, для здоровья людей, проживающих в населенных пунктах, не входящих в перечень городов с наибольшим уровнем загрязнения атмосферы (по данным Росгидромета, 2015 г.), практически отсутствуют. Проблема длительного воздействия низких концентраций химических веществ в плане возможно скрытых отдаленных во времени изменений в организме становится все актуальнее и чаще привлекает внимание исследователей.

Объекты и методы исследования

Город Томск расположен на юго-востоке Западно-Сибирской равнины, на правом берегу реки Томь. Это административный центр Томской области, население г. Томска составляет 547989 человек.

Территория г. Томска характеризуется пространственной неоднородностью заболеваемости населения, в том числе неоднородностью общей онкологической заболеваемости. Зоны повышенного онкологического риска в целом соответствуют местам расположения промышленных предприятий и территориям, подверженным ветровому переносу их производственных выбросов [22, 23]. На территории города одним из основных источников загрязнения атмосферного воздуха и депонирующих природных сред является государственная район-

ная электростанция (ГРЭС-2), расположенная в зоне жилой застройки города [24–26].

Исходными данными для оценки риска здоровью должны служить данные о выбросах конкретных предприятий и результаты опробования атмосферного воздуха на постах наблюдений, однако их число сильно ограничено. Также ограничен круг рассматриваемых ключевых загрязнителей в системе экологического мониторинга, так, например, на станциях мониторинга атмосферного воздуха в г. Томск наблюдения осуществляются всего за концентрациями восьми металлов: Cr, Pb, Mn, Ni, Zn, Cu, Fe и Cd. В данной работе для оценки экологических рисков здоровью людей от воздействия тяжелых металлов, попадающих в организм ингаляционным путем, используются данные о содержании элементов в снеговом покрове. Выбор такого подхода к оценке рисков здоровью населения в окрестностях Томской ГРЭС-2 обусловлен рядом факторов. Во-первых, снежный покров является универсальным планшетом-накопителем загрязняющих веществ из атмосферного воздуха [27–41], позволяющим получить естественным образом усредненные концентрации загрязняющих веществ за период снегонакопления (5–6 месяцев), что имеет преимущество относительно прямых единичных замеров загрязняющих веществ в атмосферном воздухе для оценки экологических рисков. Во-вторых, так как большинство тяжелых металлов (исключая, например, ртуть) в атмосферном воздухе присутствуют преимущественно в форме различных соединений в составе твердых аэрозольных частиц, для оценки экологических рисков в работе использованы данные о содержании тяжелых металлов в составе твердого (нерастворимого) осадка снега. Кроме этого, известно, что, несмотря на высокую информативность гидрохимического состава снеготалых вод в практике эколого-геохимических исследований [40], по балансовым соотношениям между количествами взвешенной и растворенной форм нахождения металлов в снежном покрове большинство элементов преобладают в составе нерастворимой фракции. Так, в частности, в пробах снежного покрова из окрестностей Томской ГРЭС-2 Zn As Cd Co Ba Tl Mn Ni Cu Pb V Cr Ag Se Sn W Ga Ce Al сконцентрированы преимущественно в составе твердого осадка снега [41]. Геохимический состав твердого осадка снега отражает особенности пылевого загрязнения атмосферного воздуха в местах размещения промышленных предприятий [38]. Произвести оценку содержания химических элементов в атмосферном воздухе по данным о их содержании в твердом осадке снега позволяет комплексное применение концепций и моделей осаждения пылевых частиц из атмосферы на депонирующие поверхности [35–38] с учетом размера этих частиц, их дисперсности, метеорологических параметров среды осаждения [28, 42, 43] и эмпирических корреляций между интенсивностью поступления тяжелых металлов на снежный покров и концентра-

цией их в атмосферном воздухе [17, 27]. Учитывая, что современные методики анализа элементного состава природных сред позволяют определять более 20 различных тяжелых металлов в образцах, при использовании восстановленных концентраций химических элементов в атмосферном воздухе на основе данных элементного состава твердого осадка снега появляется возможность увеличения числа химических соединений для оценки риска здоровью.

Для проведения оценки экологических рисков для здоровья были выбраны три участка на территории г. Томска (рис. 1).

Два участка соответствуют территориям с наибольшим притоком техногенных пылевых частиц в зоне воздействия Томской ГРЭС-2. Данные участки расположены с подветренной стороны (преобладают юго-западные и южные ветра) относительно высотных источников загрязнения атмосферного воздуха – дымовых труб Томской ГРЭС-2, высота которых составляет 100 м. Площадь участка исследования была подобрана с учетом площадей ранее установленных пылевых и геохимических аномалий в зоне влияния Томской ГРЭС-2. Участок I – «северо-восточный вектор влияния ГРЭС-2», представляет собой территорию площадью 490 тыс. м², вытянутую в северо-восточном направлении относительно Томской ГРЭС-2, на которой отбор проб снега осуществлялся в 2013 и 2015 гг. по векторной сети с интервалом опробования 200–300 м. На территории участка «Участок II» – «площадь в зоне воздействия ГРЭС-2» площадью 11,88 км², отбор проб снега производился по площадной сети. Данный участок был выбран с целью апробации и усовершенствования методики оценки экологических рисков в зоне воздействия ГРЭС-2, использованной авторами в ранее проведенных исследованиях [44]. Третий участок (Участок III) выбран вне зоны влияния Томской ГРЭС-2 («вектор вне зоны влияния ГРЭС-2») и характеризует селитебную зону г. Томска, и может быть определен как «вектор сравнения» величин экологических рисков в отношении участков, подверженных пылевому загрязнению от выбросов Томской ГРЭС-2.

В качестве фоновой территории для сравнения концентраций химических элементов в твердом осадке снега и восстановленных концентраций в атмосферном воздухе использована территория Обсерватории «Фоновая» ИОА СО РАН (70 км от г. Томска в юго-восточном направлении). Общее количество отобранных проб составило 32 образца: в северо-восточном векторе влияния ГРЭС-2 5 образцов в 2013 г., 5 образцов в 2015 г. (Участок I), на площади в зоне влияния ГРЭС-2 (Участок II) – 16, в векторе вне зоны влияния ГРЭС-2 – 4 и на фоновой территории – 2 образца.

Пробы снега отбирали из шурфов на площадках с ненарушенным снеговым покровом на всю его мощность, масса каждой пробы составляла 15–18 кг. При отборе фиксировали площадь шурфа, из которого отбиралась проба, и время от мо-

мента снегостава до отбора пробы снега. Снеговые пробы растапливали при комнатной температуре, талую снеговую воду фильтровали через предварительно взвешенный беззольный фильтр. Осевший на фильтре твердый осадок снега просеивали через сито с размером ячейки 1×1 мм и проводили его аналитическое изучение. Аналитическое определение содержания металлов (Be, Al, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Se, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, Ba, Ce, W, Tl, Pb) в твердом осадке снега выполняли методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой в ХАЦ «Плазма» (г. Томск).

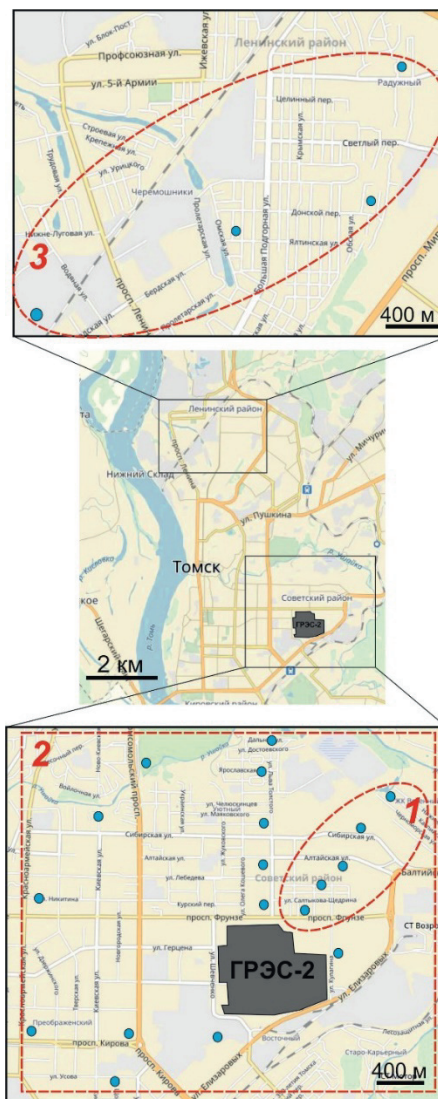


Рис. 1. Карта-схема расположения точек отбора проб снега (1 – «Участок I» (северо-восточный вектор влияния ГРЭС-2), отбор проб в 2013 и 2015 гг.; 2 – «Участок II» (площадь в зоне влияния ГРЭС-2), отбор проб в 2015 г.; 3 – «Участок III» (вектор вне зоны влияния ГРЭС-2), отбор проб в 2015 г.)

Fig. 1. Diagrammatic map of snow sample locations (1 – «Block I» (north-east impact vector of GRES-2), sampling in 2013 and 2015; 2 – «Block II» (area in the GRES-2 effect), sampling in 2015; 3 – «Block III» (vector out of the GRES-2 effect), sampling in 2015)

Также с целью установления пропорций между легкой и тяжелой минеральной фракциями в составе твердого осадка снега проводили изучение проб по запатентованной методике [45] в учебно-научной лаборатории электронно-оптической диагностики Международного инновационного научно-образовательного центра «Урановая геология» при кафедре геоэкологии и геохимии ТПУ.

Токсикологическая и санитарно-гигиеническая информация о веществах, выбранных для оценки риска здоровью людей, принята согласно базам данных US EPA [46–50] и российским нормативам [51]. Безопасные для здоровья людей содержания Al, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Cd, Sn, Sb, Ba, Ce, W, Tl в атмосферном воздухе при их хроническом воздействии, определенные Environmental Protection Agency (USEPA), в

2–28,6 раз строже Российских аналогов. Однако концентрации Be, Se, Pb, установленные в качестве предельно допустимых среднесуточных величин в воздухе населенных пунктов России, ниже в 1,6–2 раза, чем в нормативных документах US EPA.

Комплексирование исследований в области геохимической оценки территорий, токсичности и химического риска дало возможность получить результирующий продукт в виде алгоритма оценки риска здоровью населения при воздействии химических веществ, загрязняющих атмосферный воздух и аккумулированных в снежном покрове (рис. 2). Необходимо определить, что в рамках настоящей работы термин «оценка риска» применяется к реальным приложениям и означает анализ риска для частных ситуаций.

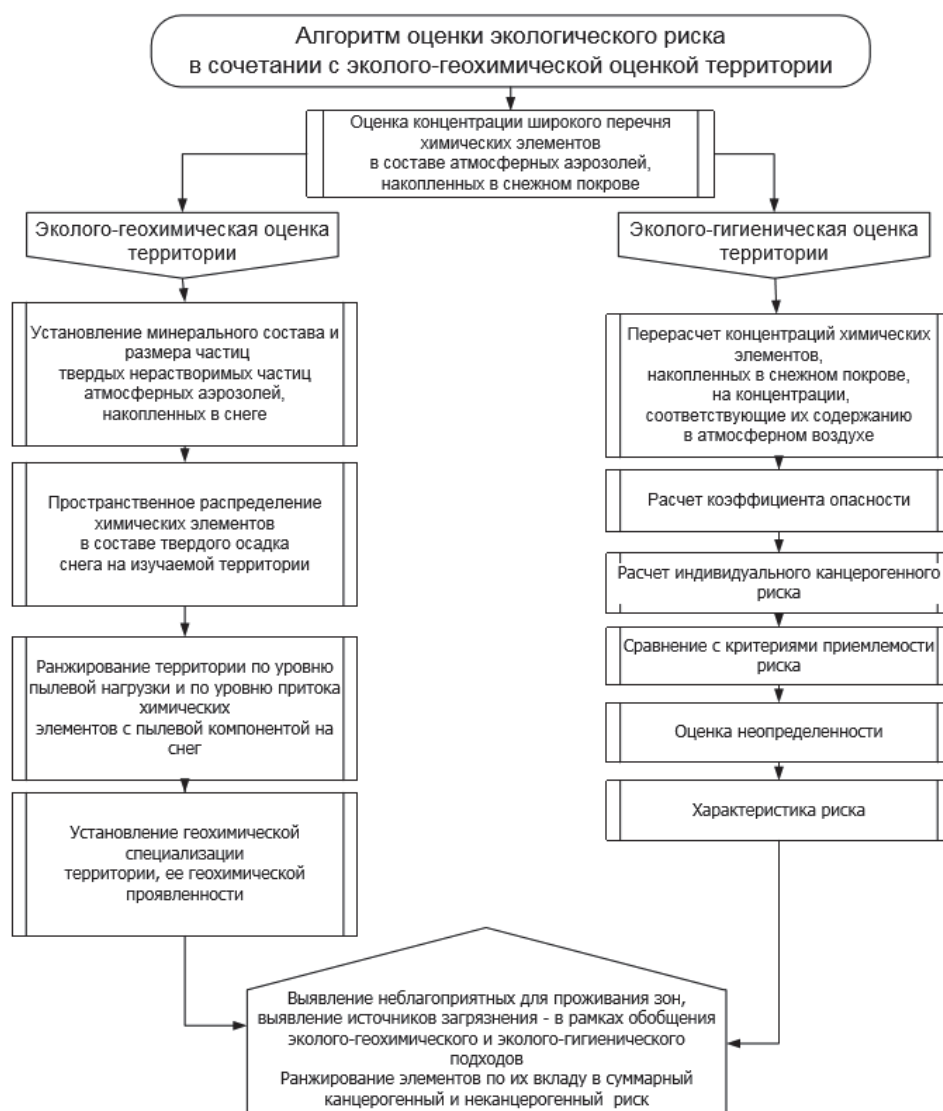


Рис. 2. Алгоритм оценки риска здоровью населения при воздействии химических веществ, загрязняющих атмосферный воздух и аккумулированных в снежном покрове

Fig. 2. Risk Assessment Algorithm with public health affected by chemical substances polluting air and being accumulated in the snow cover

Эколого-геохимическая оценка рассматриваемых участков на территории г. Томска основывалась на результатах оценки коэффициентов концентраций (КК) химических элементов в твердом осадке снега относительно фоновой территории:

$$КК=C_i/C_{i\text{фон}},$$

где C_i – концентрация i -го металла в твердом осадке снега в пробе; $C_{i\text{фон}}$ – концентрация i -го металла в твердом осадке снега в пробе фоновой территории (Обсерватория «Фоновая» ИОА СО РАН, 70 км от г. Томска).

Оценка риска для здоровья людей от хронического ингаляционного поступления с атмосферной пылью Be, Al, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Se, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, Ba, Ce, W, Tl, Pb проводилась на основе восстановленных данных о среднесуточных концентрациях этих металлов в пыли атмосферного воздуха ($C_{\text{атм}}$). Расчет проводился на основе данных о содержании этих металлов в депонированной на снеговой покровы пыли ($C_{i\text{пыль}}$):

$$C_{\text{атм}}=Pn \cdot C_{i\text{пыль}}/W,$$

где W – скорость осадения атмосферной пыли (м/сут); Pn – пылевая нагрузка (мг/м²·сут).

$$W=P_l \cdot W_l + P_h \cdot W_h,$$

где P_l – доля легкой фракции (частицы угля, сажи, шлака, полые алюмосиликатные сферуллы и др.) в составе нерастворимого осадка снега; P_h – доля тяжелой фракции (частицы кварца, глинистых минералов, окислов железа и других тяжелых металлов и др.) в составе нерастворимого осадка снега; W_l – скорость оседания легкой фракции, $W_l=0,566$ см/с [37]; W_h – скорость оседания тяжелой фракции, $W_h=0,826$ см/с [37], (W_l, W_h для частиц диаметром 5 мкм [44])

$$Pn=M/[S \cdot t],$$

где M – масса твердого осадка в снеговой пробе (мг); S – площадь шурфа (м²); t – период от начала снегостава до отбора пробы (сутки).

Статистическую обработку и анализ данных проводили посредством программного обеспечения STATISTICA 7.0 и Microsoft Excel. Анализ корреляционных связей между содержаниями микроэлементов в пробах твердого осадка снега проводился с применением ранговых коэффициентов корреляции Спирмена. Оценка различий между величинами пылевой нагрузки и содержания изучаемых элементов в пробах твердого осадка снега, отобранных в 2013 и 2015 гг. на участке 1 (северо-восточный вектор влияния ГРЭС-2), проводилась с помощью непараметрических статистических критериев Колмогорова–Смирнова и Манна–Уитни [52].

Оценка неканцерогенных рисков здоровью, обусловленных хроническим ингаляционным поступлением металлов в организм, производится на основе расчетов коэффициентов опасности (Hazard Quotient HQ):

$$HQ_i=C_{i\text{атм}}/R_i(C_i),$$

где $R_i(C_i)$ – референтная концентрация металла в воздухе, по данным IRIS EPA, HEAST EPA и отечественного руководства по оценке риска [46–50].

Для идентификации приоритетных органов и систем, в наибольшей степени поражаемых при комбинированном воздействии нескольких металлов, для каждого органа или системы был рассчитан суммарный индекс опасности (Total Hazard Index THI):

$$HI=\sum HQ_i.$$

В тех случаях, когда металл оказывает влияние на функционирование нескольких систем или органов, его коэффициент опасности (HQ) учитывался для каждой системы.

Расчет индивидуального канцерогенного риска осуществлялся с использованием данных о величине экспозиции и значениях факторов канцерогенного потенциала. Для канцерогенных химических веществ дополнительная вероятность развития рака у индивидуума на всем протяжении жизни (CR) оценивается с учетом среднесуточной дозы в течение жизни (Lifetime Average Daily Dose LADD):

$$CR_i=LADD \cdot SF_i,$$

где $LADD$ – среднесуточная доза в течение жизни, мг/(кг·день); SF_i – фактор канцерогенного потенциала i -го вещества, (мг/(кг·день))⁻¹.

Среднесуточная доза при ингаляционном воздействии веществ с атмосферным воздухом рассчитывалась

$$LADD=((C \cdot T_{out} \cdot V_{out})+(C \cdot T_{in} \cdot V_{in})) \cdot EF \cdot ED/(BW \cdot AT \cdot 365),$$

где $LADD$ – среднесуточная доза, усредненная с учетом ожидаемой средней продолжительности жизни человека 70 лет, мг/(кг·день); C – концентрация вещества в атмосферном воздухе, мг/м³; стандартные факторы экспозиции: T_{out} – время, проводимое вне помещений, 8 ч/день; T_{in} – время, проводимое внутри помещений, 16 час/день; V_{out} – скорость дыхания вне помещений, 1,4 м³/ч; V_{in} – скорость дыхания внутри помещений, 0,6 м³/ч; EF – частота воздействия, 350 дней/год; ED – продолжительность воздействия, 30 лет; BW – масса тела, 70 кг; AT – период осреднения экспозиции, 70 лет.

Для оценки неопределенности при расчете среднесуточных доз канцерогенов применен вероятностный метод. Факторы экспозиции по смыслу являются неопределенными и имеют доверительный интервал значений, в пределах которого эти параметры могут варьироваться. Неопределенности возникают на каждом этапе оценки риска, и они связаны с целым рядом факторов, не только с погрешностью в определении концентраций загрязняющих веществ в окружающей среде. Большая доля неопределенности лежит в плоскости факторов экспозиции, характеризующих контакт поллютанта с человеком. Величины, входящие в формулу для расчета дозы, тоже имеют свой диапазон значений, в пределах которого они могут меняться, и подчиняются законам распределения. Поэтому для анализа неопределенностей при расчетах среднесуточных доз при оценке канцерогенных рисков был использован генератор случайных чисел (использовался метод Монте-Карло, основанный на генерации случайных чисел и реализованный в среде Mathcad), с помощью которого фор-

мировались последовательные сценарии. Перебор вариантов начинался с выбора случайного значения каждого из переменных параметров, учитываемых при расчете дозы, – частоты, продолжительности экспозиции, возраста и веса человека и т. д. (табл. 1). Причем процесс имитации осуществляется таким образом, чтобы случайный выбор значений из определенных вероятностных распределений не нарушал существования известных или предполагаемых отношений корреляции среди переменных. Затем для данного сценария находится значение показателя, которое сохраняется как отдельный результат расчета. Далее случайным образом выбирается другой набор случайных переменных и вычисляется итоговый показатель для второго сценария. Этот процесс повторяется множество раз, иногда несколько тысяч раз. Результаты всех имитационных экспериментов объединяются в выборку и анализируются с помощью статистических методов с целью получения закона распределения вероятностей среднесуточных доз. Таким образом, значение среднесуточных доз выражается не каким-либо единственным значением, а вероятностным распределением всех возможных его значений [15, 53–55].

Результаты и их обсуждение

Величина пылевой нагрузки на участке I – «северо-восточный вектор влияния ГРЭС-2» – изменяется от 14,1 до 152, при средней величине 48,6 мг/м² в сутки, на площадном участке в зоне влияния ГРЭС-2 (участок II) – от 22,9 до 64,1, при средней величине 43,6 мг/м² в сутки, а на рассматриваемой селитебной территории города Томска вне зоны влияния ГРЭС-2 (участок III) – от 22,3 до 98,6, при средней величине 48,0 мг/м² в сутки. Пылевая нагрузка на территории, подверженной влиянию выбросов Томской ГРЭС-2, и на территории вне зоны влияния исследуемой теплоэлектростанции сравнения (участок III) соответствует низкой степени загрязнения согласно нормативной градации (<250 мг/м² в сутки [56]). Указанные средние величины пылевой нагрузки на территории изучаемых участков до 7,8 раз превышают фон (6,3 мг/м² в сутки).

Различия величины пылевой нагрузки на участке, соответствующем северо-восточному вектору воздействия Томской ГРЭС-2, в 2013 и 2015 гг. статистически незначимы, что может быть связано с наличием постоянно действующих организованных и неорганизованных источников выбросов твердых загрязняющих веществ в атмосферный воздух, а также, вероятно, с одинаковой долей использования угля (60 %) и газа (40 %) в качестве энергоресурсов на ГРЭС-2 в зимний период годов наблюдения. Кроме этого, не следует исключать возможность влияния на количество твердых выбросов в атмосферный воздух автотранспорта, так как Томская ГРЭС-2 расположена в центральной части города и в зоне ее влияния находится значительное количество автодорог.

Таблица 1. Вариабельность факторов экспозиции, используемых для расчета дозы при оценке канцерогенного риска [54]

Table 1. Variability of exposure factors used in calculating the dose at assessing carcinogenic risk [54]

Фактор экспозиции и его характеристика Exposure factor and its dimension	Тип распределения Distribution	Вариабельность или доверительный интервал значений Variability or confidence interval
T_{out} – время, проводимое вне помещений, ч/день (time spent outdoors, h/day)	Точечное Point	8±2
T_{in} – время, проводимое внутри помещений, ч/день (time spent indoors, h/day)		16±4
V_{out} – скорость дыхания вне помещений, м ³ /ч (breathing rate outdoors, m ³ /h)		1,4±0,2
V_{in} – скорость дыхания внутри помещений, м ³ /ч (breathing rate indoors, m ³ /h)		0,6±0,1
EF – частота воздействия, дней/год (exposure frequency, day/year)	Триангулярное Triangular	350 (180–365)
ED – продолжительность воздействия, лет (exposure time length, year)	Логнормальное Lognormal	30 (19–43)
BW – масса тела, кг (body weight, kg)	Логнормальное Lognormal	70 (55–80)
AT – период осреднения экспозиции, лет (period of exposure average-out, year)	Точечное Point	70
C – концентрация вещества в атмосферном воздухе, мг/м ³ (substance concentration in the air, mg/m ³)	Нормальное Normal	$C \pm SD$

SD – стандартное отклонение/standard deviation.

Для территорий в зоне воздействия теплоэлектростанции не характерны высокие скорости оседания атмосферной пыли на снеговой покров. Это связано с тем, что в вещественном составе твердого осадка снега в окрестностях объектов теплоэнергетики присутствует большое количество частиц с относительно низким удельным весом (уголь, частицы сажи, золы, полые алюмосиликатные микросферуллы) [44, 57].

При оценке экологических рисков пристального внимания требуют низкие концентрации веществ, постоянно присутствующих в природных средах, так как они способны привести к отдаленным во времени негативным последствиям для здоровья. Также для оценки рисков здоровью наряду с токсикологическими характеристиками загрязняющих веществ необходимо учитывать и эколого-геохимические критерии – уровень пылевой нагрузки и коэффициенты концентрации [58]. Концентрации химических элементов в твердом осадке снега на территории рассматриваемых зон воздействия Томской ГРЭС-2, а также вне зоны влияния ее выбросов, и соответствующие им значения коэффициентов концентрации представлены на рис. 3 и в табл. 2.

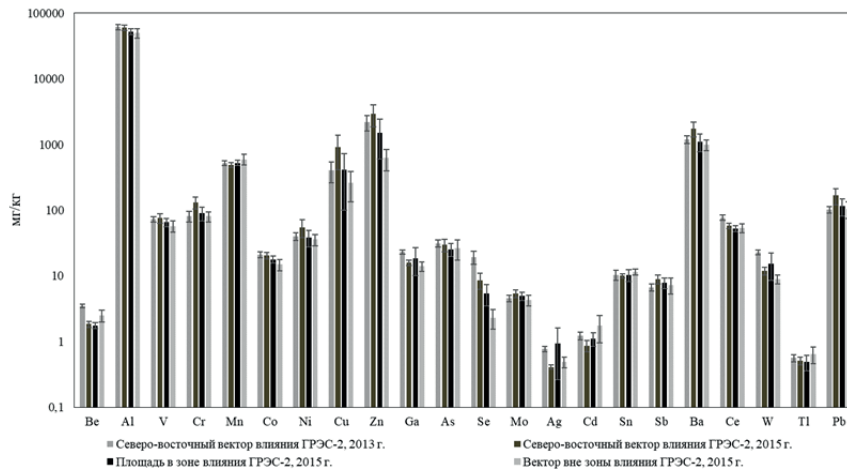


Рис. 3. Концентрации химических элементов в твердом осадке снега в зоне воздействия Томской ГРЭС-2 и вне зоны ее влияния

Fig. 3. Concentrations of chemical elements in snow solid residue in the area affected by the Tomsk GRES-2 and outside its impact area

Таблица 2. Коэффициенты концентрации химических элементов в твердом осадке снега в зоне воздействия Томской ГРЭС-2 и вне зоны ее влияния

Table 2. Coefficients of chemical elements concentration in snow solid sediment in the area affected by the Tomsk GRES-2 and outside its impact area

Элемент/Element	Участок I Северо-восточный вектор влияния ГРЭС-2 Block I North-east vector of GRES-2 impact			Участок II Площадь в зоне влияния ГРЭС-2 Block II Area affected by GRES-2			Участок III Вектор вне зоны влияния ГРЭС-2 Block III Vector outside the area affected by GRES-2					
	2013 г.			2015 г.								
	количество проб/sample number											
	Среднее/Mean	Мин/Min	Макс/Max	Среднее/Mean	Мин/Min	Макс/Max	Среднее/Mean	Мин/Min	Макс/Max	Среднее/Mean	Мин/Min	Макс/Max
Be	2,3	2,0	2,6	1,2	0,9	1,6	1,2	0,6	2,3	1,6	0,9	2,5
Al	2,8	1,8	3,4	2,8	2,2	3,7	2,4	1,6	3,7	2,3	1,3	3,1
V	3,0	2,0	3,8	3,2	2,3	5,0	2,7	1,8	5,0	2,4	1,3	3,5
Cr	1,9	1,2	3,2	3,0	1,8	5,1	2,1	1,1	5,1	1,9	1,2	2,7
Mn	2,3	1,6	2,6	2,1	1,6	2,5	2,3	1,6	3,1	2,6	1,5	3,5
Co	3,3	2,0	4,1	3,2	2,3	4,3	2,8	1,9	4,3	2,3	1,3	3,3
Ni	2,9	1,4	3,8	4,1	1,8	8,2	2,8	1,4	8,2	2,6	1,2	3,7
Cu	3,6	1,6	8,5	8,1	1,4	23,2	3,7	0,7	23,2	2,3	0,8	5,6
Zn	15,4	6,6	28,0	20,8	7,7	39,6	10,6	2,3	39,6	4,4	1,5	7,9
Ga	2,3	1,6	2,8	1,6	1,3	2,0	1,8	0,8	7,9	1,4	0,7	1,8
As	3,0	1,9	4,1	2,8	1,6	4,6	2,4	1,6	5,0	2,5	0,9	4,8
Se	1,6	0,8	2,8	0,7	0,1	1,0	0,4	0,1	1,0	0,2	0,1	0,3
Mo	2,4	1,6	3,1	2,8	1,9	3,8	2,6	1,3	3,8	2,2	1,5	3,2
Ag	1,6	1,1	2,0	0,8	0,6	0,9	1,9	0,4	11,4	1,0	0,6	1,4
Cd	4,1	2,6	5,1	2,9	1,9	4,5	3,7	1,9	7,6	5,8	1,9	13,2
Sn	0,3	0,2	0,5	0,3	0,3	0,4	0,3	0,1	0,7	0,3	0,3	0,4
Sb	1,6	0,9	2,1	2,1	1,4	3,1	1,8	1,0	3,1	1,7	1,2	3,1
Ba	3,9	2,9	5,6	5,7	2,8	9,4	3,6	1,7	9,4	3,3	1,5	4,3
Ce	2,3	1,4	2,6	1,7	1,3	2,0	1,6	1,0	2,0	1,6	1,0	2,1
W	8,8	6,6	10,5	4,6	2,7	5,8	5,9	2,7	24,6	3,4	2,5	4,6
Tl	2,2	1,3	3,0	2,0	1,6	3,0	2,0	0,8	5,1	2,6	1,1	4,5
Pb	1,3	1,0	1,9	2,2	1,2	4,3	1,5	0,5	4,3	1,4	0,8	2,5

Техногенная геохимическая специализация твердого осадка снега на участке I (северо-восточный вектор влияния ГРЭС-2) проявляется в повышенных уровнях накопления Zn (КК=20,8), Cu, Ba, W, Ni, V, Co (КК=3,2...8,1), Cr, Cd, As, Al, Mn, Pb, Mo, Sb, Tl (КК=2,1...3,0) относительно фона, на участке II (площадь в зоне влияния ГРЭС-2), на участке III – Zn, W, Ba, Cu и Cd (КК=3,6...10,6), Al, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, As, Mo и Tl (КК=2,1...2,8). Анализ средних значений коэффициентов концентрации позволяет выделить группу элементов – Zn, Ba, W, Ni, V, Cu, Co, которая характеризуется высоким уровнем накопления в твердом осадке снега на территории, подверженной влиянию ГРЭС-2, относительно проб твердого осадка снега с территории вне зоны влияния рассматриваемой теплоэлектростанции. Выявленные химические элементы можно определить как элементы-индикаторы для территорий, подверженных влиянию выбросов от сжигания топлива. Сравнительный анализ показал статистически незначимые различия содержания Zn, Ba, Ni, V, Cu и Co в пробах твердого осадка снега с северо-восточного вектора влияния ГРЭС-2 за 2013 и 2015 гг., что может свидетельствовать о сохранении источников их поступления. Выявленные элементы-индикаторы с высокой долей вероятности отражают геохимическую специализацию используемого топлива и зольных уносов ГРЭС-2. Угли Кузнецкого бассейна, используемые на ГРЭС-2, обогащены Zn, Ba, V, Ni, Co, Cu и другими микроэлементами [59, 60], которые при высокотемпературном сжигании угля могут поступать в составе ультрамелких твердых частиц в атмосферный воздух [61].

Восстановленные расчетным способом концентрации металлов в атмосферном воздухе выбранных участков на территории г. Томска представлены в табл. 3. Полученные значения сопоставимы с данными прямых фактических измерений концентраций отдельных металлов в атмосферном воздухе г. Томска [62], что говорит о приемлемости предложенной в работе модели для оценки содер-

Таблица 3. Восстановленные концентрации элементов в атмосферном воздухе в зоне воздействия Томской ГРЭС-2 и вне зоны ее влияния, нг/м³

Table 3. Restored concentrations of elements in atmospheric air in the area of Tomsk GRES-2 impact and beyond the impact area, ng/m³

Элементы Elements	Фон Background	Участок I Северо-восточный вектор влияния ГРЭС-2 Block I North-east impact vector of GRES-2		Участок II Площадь в зоне влияния ГРЭС-2, 2015 г. Block II Area affected by GRES 2, 2015	Участок III Вектор вне зоны влияния ГРЭС-2, 2015 г. Block III Vector beyond the GRES-2 impact area, 2015
		2013 г.	2015 г.		
		Количество проб/Sample number			
	2	5	5	16	4
Be	0,01	0,28±0,03	0,13±0,02	0,15±0,04	0,23±0,08
Al	203	4786±265	4091±522	4330±932	4499±1564
V	0,2	5,7±0,4	5±0,5	5,3±1,1	5,1±1,8
Cr	0,4	6,3±0,9	9±1,7	6,9±1,3	6,9±2,1
Mn	2,2	41±3	35±8	42±9	58±27
Co	0,1	1,6±0,1	1,4±0,2	1,4±0,3	1,5±0,7
Ni	0,1	3,1±0,2	3,6±0,7	3±0,6	3,2±1,2
Cu	1,1	34±13	51±18	25±7	19±8
Zn	1,3	163±36	225±98	156±75	65±35
Ga	0,1	1,8±0,1	1,1±0,2	1,3±0,3	1,3±0,5
As	0,1	2,4±0,2	2±0,4	2±0,4	2,5±1,1
Se	0,11	1,5±0,3	0,6±0,2	0,4±0,1	0,2±0,1
Mo	0,02	0,36±0,03	0,36±0,05	0,39±0,08	0,4±0,17
Ag	0,005	0,06±0,01	0,03±0,01	0,05±0,01	0,04±0,02
Cd	0,003	0,09±0,01	0,06±0,01	0,07±0,01	0,16±0,07
Sn	0,31	0,81±0,1	0,69±0,1	0,73±0,14	0,92±0,22
Sb	0,04	0,51±0,03	0,63±0,13	0,54±0,08	0,6±0,18
Ba	2,87	95±12	142±55	90±22	91±33
Ce	0,3	6±0,3	3,9±0,4	4,2±0,9	5,1±2,1
W	0,02	1,9±0,4	0,9±0,2	1,1±0,2	0,9±0,4
Tl	0,002	0,040±0,004	0,030±0,004	0,04±0,01	0,06±0,02
Pb	0,72	8,9±2,4	14±6,3	8,6±2,2	8,9±3

жания веществ в воздухе на основе их концентраций в твердом осадке снега.

Восстановленные концентрации Cu, Zn, Cr, Ni, Ba, Pb в воздухе в пределах северо-восточного вектора, наиболее чувствительного к выбросам ГРЭС-2, выше по сравнению с другими участками, что также отражает геохимическую специфику выбросов этого предприятия. Повышенные концентрации свинца, по-видимому, связаны с выбросами автотранспорта, влияние которого полностью не удалось исключить, несмотря на большое внимание к этому фактору при выборе мест отбора проб.

Химические элементы-загрязнители присутствуют в окружающей среде не в виде отдельных, изолированных, веществ, а формируют ассоциации, способные оказывать комбинированное воздействие на организм, при котором может наблюдаться как суммирование эффектов, так и их потенцирование.

Результаты расчета коэффициентов опасности для оценки неканцерогенных эффектов воздействия рассматриваемых металлов на организм человека при их хроническом ингаляционном поступлении приведены в табл. 4. Значения коэффициентов опасности для рассматриваемых участков, как в зоне воздействия ГРЭС-2, так и вне зоны ее влияния, для большинства элементов изменяются в широком диапазоне – от 10^{-6} до 10^{-2} , однако есть элементы со зна-

чениями коэффициентов опасности ингаляционного воздействия в диапазоне от 10^{-2} до целых значений: Cu (1,3...2,6), Al (0,82...0,96), Mn (0,71...0,90), Ba (0,19...0,28), Zn (0,18...0,25). Если рассчитанный коэффициент опасности (HQ) не превышает единицу, то вероятность развития у человека вредных эффектов, при ежедневном поступлении вещества в течение жизни, незначительна и такое воздействие характеризуется как допустимое. Если HQ больше единицы, то вероятность развития вредных эффектов существенна и возрастает пропорционально HQ.

Для площадной зоны воздействия ГРЭС-2 (Участок II) установлено, что наибольший удельный вклад в интегральный уровень неканцерогенных рисков от хронического ингаляционного поступления в организм металлов ($HQ > 0,1$) вносят Cu ($1,3 \pm 3,6 \cdot 10^{-1}$), Al ($9,2 \cdot 10^{-1} \pm 1,8 \cdot 10^{-1}$), Mn ($9,0 \cdot 10^{-1} \pm 1,8 \cdot 10^{-1}$), Ba ($1,9 \cdot 10^{-1} \pm 4,3 \cdot 10^{-2}$), Zn ($1,8 \cdot 10^{-1} \pm 8,5 \cdot 10^{-2}$). Аналогичная последовательность металлов, которые обуславливают основной вклад в уровень неканцерогенного риска, характерна и для северо-восточного вектора влияния ГРЭС-2 (табл. 4, рис. 4). Таким образом, ряд по уменьшению коэффициентов опасности ингаляционного риска Cu-Al-Mn-Ba-Zn характеризует территорию окрестностей ГРЭС-2 по эколого-гигиеническому критерию, т. е. является эколого-гигиеническим индикатором зоны воздействия ГРЭС-2.

Таблица 4. Коэффициент опасности хронических неканцерогенных эффектов тяжелых металлов в зоне влияния ГРЭС-2 и вне зоны ее воздействия

Table 4. Hazard factor of chronic non-carcinogenic effects of heavy metals in and outside the GRES-2 impact zone

Элемент Element	Участок I/Block I		Участок II/Block II	Участок III/Block III
	Северо-восточный вектор влияния ГРЭС-2, 2013 г. North-east impact vector of GRES-2, 2013	Северо-восточный вектор влияния ГРЭС-2, 2015 г. North-east impact vector of GRES-2, 2015	Площадь в зоне влияния ГРЭС-2, 2015 г. GRES-2 impact area, 2015	Вектор вне зоны влияния ГРЭС-2, 2015 г. Vector beyond the GRES-2 impact area, 2015
	Количество проб/Sample number			
	5	5	16	4
Be	$1,4 \cdot 10^{-2} \pm 1,7 \cdot 10^{-3}$	$6,5 \cdot 10^{-3} \pm 1,2 \cdot 10^{-3}$	$7,9 \cdot 10^{-3} \pm 1,9 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-2} \pm 4,1 \cdot 10^{-3}$
Al	$9,6 \cdot 10^{-1} \pm 5,3 \cdot 10^{-2}$	$8,2 \cdot 10^{-1} \pm 1,0 \cdot 10^{-1}$	$9,2 \cdot 10^{-1} \pm 1,8 \cdot 10^{-1}$	$9,0 \cdot 10^{-1} \pm 3,1 \cdot 10^{-1}$
V	$8,1 \cdot 10^{-2} \pm 6,2 \cdot 10^{-3}$	$7,2 \cdot 10^{-2} \pm 7,5 \cdot 10^{-3}$	$8,1 \cdot 10^{-2} \pm 1,6 \cdot 10^{-2}$	$7,3 \cdot 10^{-2} \pm 2,5 \cdot 10^{-2}$
Cr	$6,3 \cdot 10^{-2} \pm 8,6 \cdot 10^{-3}$	$9,0 \cdot 10^{-2} \pm 1,7 \cdot 10^{-2}$	$7,3 \cdot 10^{-2} \pm 1,3 \cdot 10^{-2}$	$6,9 \cdot 10^{-2} \pm 2,1 \cdot 10^{-2}$
Mn	$8,2 \cdot 10^{-1} \pm 6,1 \cdot 10^{-2}$	$7,1 \cdot 10^{-1} \pm 1,6 \cdot 10^{-1}$	$9,0 \cdot 10^{-1} \pm 1,8 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \pm 5,3 \cdot 10^{-1}$
Co	$8,1 \cdot 10^{-2} \pm 4,8 \cdot 10^{-3}$	$7,0 \cdot 10^{-2} \pm 1,1 \cdot 10^{-2}$	$7,6 \cdot 10^{-2} \pm 1,5 \cdot 10^{-2}$	$7,3 \cdot 10^{-2} \pm 3,3 \cdot 10^{-2}$
Ni	$6,1 \cdot 10^{-2} \pm 4,6 \cdot 10^{-3}$	$7,3 \cdot 10^{-2} \pm 1,4 \cdot 10^{-2}$	$6,4 \cdot 10^{-2} \pm 1,2 \cdot 10^{-2}$	$6,5 \cdot 10^{-2} \pm 2,3 \cdot 10^{-2}$
Cu	$1,7 \pm 6,4 \cdot 10^{-1}$	$2,6 \pm 8,8 \cdot 10^{-1}$	$1,3 \pm 3,6 \cdot 10^{-1}$	$9,5 \cdot 10^{-1} \pm 3,9 \cdot 10^{-1}$
Zn	$1,8 \cdot 10^{-1} \pm 4,0 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-1} \pm 1,1 \cdot 10^{-1}$	$1,8 \cdot 10^{-1} \pm 8,5 \cdot 10^{-2}$	$7,3 \cdot 10^{-2} \pm 3,9 \cdot 10^{-2}$
Ga	$4,5 \cdot 10^{-5} \pm 2,8 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-5} \pm 3,8 \cdot 10^{-6}$	$3,5 \cdot 10^{-5} \pm 6,3 \cdot 10^{-6}$	$3,3 \cdot 10^{-5} \pm 1,3 \cdot 10^{-5}$
As	$8,2 \cdot 10^{-2} \pm 7,9 \cdot 10^{-3}$	$6,6 \cdot 10^{-2} \pm 1,2 \cdot 10^{-2}$	$6,9 \cdot 10^{-2} \pm 1,4 \cdot 10^{-2}$	$8,3 \cdot 10^{-2} \pm 3,5 \cdot 10^{-2}$
Se	$1,9 \cdot 10^{-2} \pm 3,6 \cdot 10^{-3}$	$7,9 \cdot 10^{-3} \pm 2,0 \cdot 10^{-3}$	$5,7 \cdot 10^{-3} \pm 1,5 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-3} \pm 1,5 \cdot 10^{-3}$
Mo	$3,0 \cdot 10^{-5} \pm 2,8 \cdot 10^{-6}$	$3,0 \cdot 10^{-5} \pm 4,4 \cdot 10^{-6}$	$3,4 \cdot 10^{-5} \pm 6,9 \cdot 10^{-6}$	$3,4 \cdot 10^{-5} \pm 1,5 \cdot 10^{-5}$
Ag	$3,1 \cdot 10^{-6} \pm 3,2 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-6} \pm 2,5 \cdot 10^{-7}$	$2,6 \cdot 10^{-6} \pm 6,9 \cdot 10^{-7}$	$2,2 \cdot 10^{-6} \pm 8,3 \cdot 10^{-7}$
Cd	$4,7 \cdot 10^{-3} \pm 2,8 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-3} \pm 5,9 \cdot 10^{-4}$	$3,9 \cdot 10^{-3} \pm 5,6 \cdot 10^{-4}$	$7,9 \cdot 10^{-3} \pm 3,6 \cdot 10^{-3}$
Sn	$4,0 \cdot 10^{-5} \pm 5,0 \cdot 10^{-6}$	$3,5 \cdot 10^{-5} \pm 1,1 \cdot 10^{-6}$	$3,9 \cdot 10^{-5} \pm 7,0 \cdot 10^{-6}$	$4,6 \cdot 10^{-5} \pm 1,1 \cdot 10^{-5}$
Sb	$1,3 \cdot 10^{-3} \pm 6,7 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-3} \pm 3,3 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-3} \pm 2,0 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-3} \pm 4,6 \cdot 10^{-4}$
Ba	$1,9 \cdot 10^{-1} \pm 2,4 \cdot 10^{-2}$	$2,8 \cdot 10^{-1} \pm 1,1 \cdot 10^{-1}$	$1,9 \cdot 10^{-1} \pm 4,3 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-1} \pm 6,7 \cdot 10^{-2}$
Ce	$3,0 \cdot 10^{-2} \pm 1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-2} \pm 2,2 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-2} \pm 4,2 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-2} \pm 1,1 \cdot 10^{-2}$
W	$1,9 \cdot 10^{-5} \pm 3,6 \cdot 10^{-6}$	$8,7 \cdot 10^{-6} \pm 1,9 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-5} \pm 2,2 \cdot 10^{-6}$	$8,9 \cdot 10^{-6} \pm 4,4 \cdot 10^{-6}$
Tl	$1,6 \cdot 10^{-4} \pm 1,5 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-4} \pm 1,3 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-4} \pm 2,4 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-4} \pm 8,6 \cdot 10^{-5}$
Pb	$1,8 \cdot 10^{-2} \pm 4,8 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-2} \pm 1,3 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-2} \pm 4,4 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-2} \pm 6,0 \cdot 10^{-3}$

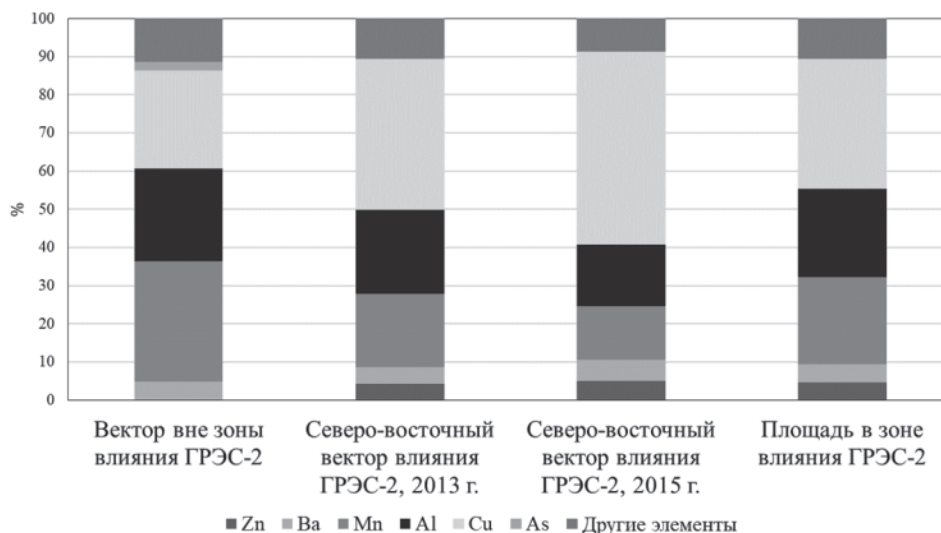


Рис. 4. Вклад элементов в суммарный коэффициент опасности хронических неканцерогенных эффектов в зоне влияния ГРЭС-2 и вне зоны ее влияния, %

Fig. 4. Contribution of elements into the total hazard factor of chronic non-carcinogenic effects in GRES-2 impact area and outside its impact area, %

В отношении вклада алюминия в интегральный уровень неканцерогенных рисков здоровью можно предполагать, что оценки его коэффициента опасности завышены. Это связано с тем, что зна-

чительная доля алюминия в составе взвешенных твердых частиц в атмосферном воздухе находится в виде природных соединений (например, полевых шпатов, глинистых минералов и т. д. [57]). В связи

Таблица 5. Характеристики канцерогенного риска от ингаляционного воздействия тяжелых металлов в зоне воздействия ГРЭС-2 и вне зоны ее влияния

Table 5. Characteristics of carcinogenic risk associated with the heavy metals inhalation exposure in the area affected by GRES-2 and outside this area

Элемент Element	Код CAS Index CAS	SF, мг/(кг·день) ⁻¹ mg/(kg·day) ⁻¹	Участок I/Block I				Участок II/Block II		Участок III/Block III	
			Северо-восточный вектор влияния ГРЭС-2, 2013 г. North-east impact vector of GRES-2, 2013		Северо-восточный вектор влияния ГРЭС-2, 2015 г. North-east impact vector of GRES-2, 2015		Площадь в зоне влияния ГРЭС-2, 2015 г. GRES-2 impact area, 2015		Вектор вне зоны влияния ГРЭС-2, 2015 г. Vector beyond the GRES-2 impact area, 2015	
			LADD, мг/(кг·день)	CR	LADD, мг/(кг·день)	CR	LADD, мг/(кг·день)	CR	LADD, мг/(кг·день)	CR
Be	7440-41-7	8,4	3,45E-08	2,90E-07	1,59E-08	1,34E-07	1,93E-08	1,62E-07	2,76E-08	2,32E-07
Cr (VI)	18540-29-9	42	7,65E-07	3,21E-05	1,09E-06	4,60E-05	8,92E-07	3,74E-05	8,44E-07	3,54E-05
Co	7440-48-4	9,8	1,99E-07	1,95E-06	1,71E-07	1,68E-06	1,85E-07	1,81E-06	1,78E-07	1,74E-06
Ni	7440-02-0	0,84	3,72E-07	3,13E-07	4,45E-07	3,74E-07	3,89E-07	3,27E-07	3,97E-07	3,33E-07
As	7440-38-2	15	2,99E-07	4,49E-06	2,40E-07	3,60E-06	2,54E-07	3,81E-06	3,03E-07	4,54E-06
Cd	7440-43-9	6,3	1,15E-08	7,22E-08	7,33E-09	4,62E-08	9,64E-09	6,07E-08	1,94E-08	1,22E-07
Pb	7439-92-1	0,042	1,08E-06	4,54E-08	1,70E-06	7,16E-08	1,11E-06	4,68E-08	1,09E-06	4,56E-08

с этим не стоит переоценивать значимость вклада этого элемента в формирование уровня неканцерогенных рисков на рассматриваемых участках территории г. Томска. Однако, наравне с указанным фактом необходимо отметить, что территории, подверженные воздействию выбросов от Томской ГРЭС-2, отличаются от других территорий города повышенными содержаниями в пробах твердого осадка снега техногенных микросферул алюмосиликатного состава [25, 44, 57].

Расчет индивидуального канцерогенного риска проводился по содержанию элементов, обладающих канцерогенными свойствами согласно классификации Всемирной Организации Здравоохранения (ВОЗ), результаты расчетов представлены в табл. 5. Для всех элементов, за исключением Cr (VI), значения риска ниже 10^{-6} , что соответствует пренебрежимо малому уровню риска. Индивидуальный канцерогенный риск, вызванный вдыханием Cr (VI), имеет значения в интервале от $7,65 \cdot 10^{-7}$ до $4,6 \cdot 10^{-5}$, соответствующие верхней границе, расцениваются согласно общепринятой методологии как предельно допустимый риск. Но и эти значения можно считать завышенным, так как выбранный метод анализа определяет общее содержание элемента, без выделения содержания шестивалентного хрома, который обладает канцерогенностью.

Плотности вероятности среднесуточных доз веществ, обладающих доказанной канцерогенностью по классификации Международного Агентства по изучению рака (МАИР) (Cr (VI), Cd, As, Be, Ni, Co, Pb) при их поступлении в организм человека ингаляционным путем, приведены на рис. 5.

Анализ полученных графиков распределения плотности вероятности величин дозы рассматриваемых химических элементов позволяет сделать вывод, что вероятность реализации дозы, оцененной в рамках детерминистского подхода (табл. 6), лежит в интервале от 10 до 30 %, в зависимости от элемента и его концентрации в атмосферном воздухе.

Выводы

В результате проведенных исследований установлено, что территория, подверженная влиянию ГРЭС-2, относительно территории вне зоны влияния рассматриваемой теплоэлектростанции характеризуется повышенным уровнем накопления в твердом осадке снега Zn, Ba, W, Ni, V, Cu, Co. Также определено, что уровни экологических рисков от ингаляционного воздействия химических элементов в зонах влияния Томской ГРЭС-2 и вне зоны ее влияния являются приемлемыми. Выявленные уровни неопределенности параметров в оценке канцерогенных рисков позволяют сделать вывод о возможности использования полученных значений рисков как относительных или ориентировочных.

Наиболее точные результаты по оценке рисков здоровью от ингаляционного поступления токсичных веществ могут быть установлены только в результате организации эпидемиологических исследований на рассматриваемых участках территории г. Томска. Однако эпидемиологические исследования позволят получить информацию о фактическом состоянии здоровья населения, проживающего в зоне воздействия ГРЭС-2, тогда как задачей процедуры оценки рисков является именно прогнозная, т. е. вероятностная, характеристика эколого-геохимической обстановки территории.

Сопоставление результатов оценки рисков здоровью населения на территории двух участков: участка, характеризующего площадь в зоне воздействия ГРЭС-2, и участка северо-восточного вектора воздействия теплоэлектростанции – позволяет сделать вывод о наибольшей представительности результатов оценки экологических рисков, рассчитанных для площадного участка.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (№ 16-45-700184р_а). Исследования выполнены в Национальном исследовательском Томском политехническом университете в рамках программы повышения конкурентоспособности ТПУ среди ведущих мировых исследовательских центров.

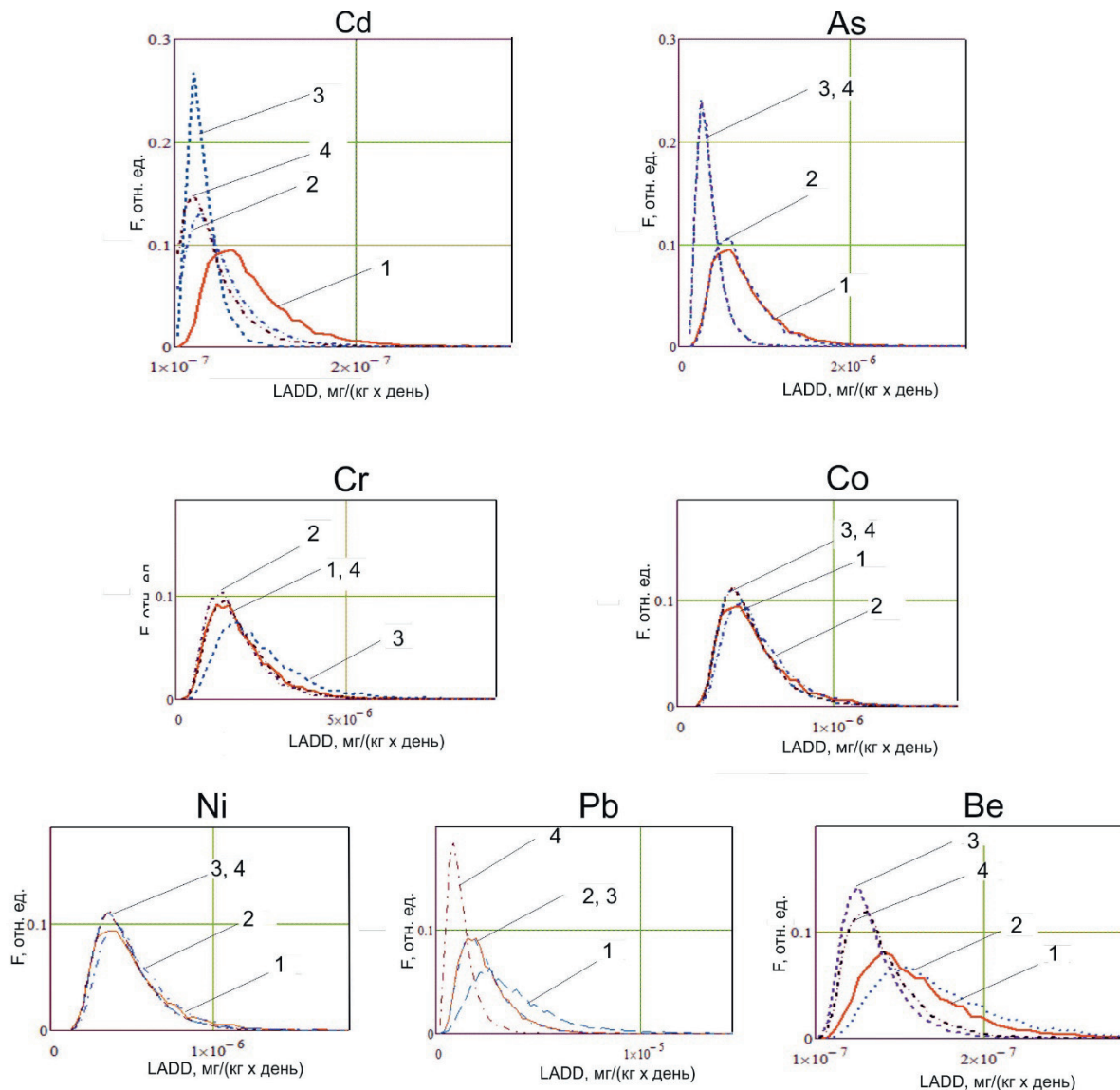


Рис. 5. Плотность вероятности распределения дозы при оценке канцерогенного риска от ингаляционного воздействия металлов в зоне влияния ГРЭС-2 и вне ее зоны влияния (1 – вектор вне зоны влияния ГРЭС-2; 2 – северо-восточный вектор влияния ГРЭС-2, 2013 г.; 3 – северо-восточный вектор влияния ГРЭС-2, 2015 г.; 4 – площадь в зоне влияния ГРЭС-2)

Fig. 5. Density of dose distribution probability when assessing the carcinogenic risk associated with inhalation exposure to metals in and outside the GRES-2 impact area (1 – outside the GRES-2 impact area; 2 – north-east impact vector of GRES-2, 2013; 3 – north-east impact vector of GRES-2, 2015; 4 – GRES-2 impact area)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зорина Т.Г. Устойчивое развитие энергетики: сущность и методические подходы к оценке // Современные технологии управления. – № 1 (49). – Номер статьи: 4905. URL: <http://sovman.ru/article/4905/> (дата обращения: 15.10.2017).
2. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года // Министерство энергетики РФ. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (дата обращения 20.09.2017).
3. Якуцени С.П. Распространенность углеводородного сырья, обогащенного тяжелыми элементами-примесями. Оценка экологических рисков. – СПб.: Недра, 2005. – 372 с.
4. Full cost accounting for the life cycle of coal / P.R. Epstein, J.J. Buonocore, K. Eckerle, M. Hendryx, B.M. Stout, R. Heineberg, R.W. Clapp, B. May, N.L. Reinhart, M.M. Ahern, S.K. Doshi, L. Glustrom // Annals of the New York Academy of Sciences. – 2011. – V. 1219. – № 1. – P. 73–98.
5. Chemical characterization and toxicity assessment of fine particulate matters emitted from the combustion of petrol and diesel fuels / D. Wu., F. Zhang, W. Lou, D. Li, J. Chen // Science of the Total Environment. – 2017. – V. 605–606. – P. 172–179.
6. Suburban air quality: Human health hazard assessment of potentially toxic elements in PM10 / L. Megido, B. Suarez-Pena, L. Negral, L. Castrillon, Y. Fernandez-Nava // Chemosphere. – 2017. – V. 177. – P. 284–291.
7. Contamination and health risks of heavy metals in street dust from a coal-mining city in eastern China / Z. Tang, M. Chai, J. Cheng, J. Jin, Y. Yang, Z. Nie, Q. Huang, Y. Li // Ecotoxicology and Environmental Safety. – 2017. – V. 138. – P. 83–91.

8. Bari M.A., Kindzierski W.B. Concentrations, sources and human health risk of inhalation exposure to air toxics in Edmonton, Canada // *Chemosphere*. – 2017. – V. 173. – P. 160–171.
9. Characteristics, Sources and Health Risk Assessment of Trace Metals in PM10 in Panzhihua, China / X. Cheng, Y. Huang, Z. Long, S. Ni, Z. Shi, C. Zhang // *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. – 2017. – V. 98. – № 1. – P. 76–83.
10. Assessment of pollution levels and human health risk of heavy metals in dust deposited on Yerevan's tree leaves (Armenia) / N. Maghakyan, G. Tepanosyan, O. Belyaeva, L. Sahakyan, A. Saghatelyan // *Acta Geochimica*. – 2017. – V. 36. – № 1. – P. 16–26.
11. Study on particulate matter air pollution, source origin, and human health risk based of PM10 metal content in Volos City, Greece / C. Emmanouil, E. Drositi, V. Vasilatou, E. Diapouli, K. Krikonis, K. Eleftheriadis, A. Kungolos // *Toxicological and Environmental Chemistry*. – 2017. – V. 99. – № 4. – P. 691–709.
12. Assessment of heavy metals pollution and its health risk of atmospheric dust fall from east part of Junggar Basin in Xinjiang / C. Yang, T. Tiyip, Y.-J. Hou, Y.-X. Gao, F. Liu, N. Xia // *Huanjing Kexue (Environmental Science)*. – 2016. – V. 37. – № 7. – P. 2453–2461.
13. Li K., Liang T., Wang L. Risk assessment of atmospheric heavy metals exposure in Baotou, a typical industrial city in northern China // *Environmental Geochemistry and Health*. – 2016. – V. 38. – № 3. – P. 843–853.
14. Human Exposure Risks for Metals in Soil Near a Coal-Fired Power-Generating Plant / J. George, R.E. Masto, L.C. Ram, T.B. Das, T.K. Rout, M. Mohan // *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. – 2015. – V. 68. – № 3. – P. 451–461.
15. Nadal M., Schuhmacher M., Domingo J.L. Probabilistic human health risk of PCDD/F exposure: a socioeconomic assessment // *Journal of Environmental Monitoring*. – 2004. – № 6. – P. 926–931.
16. Основы оценки риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду / Г.Г. Онищенко, С.М. Новиков, Ю.А. Рахманин, С.Л. Авалиани, К.А. Буштуева. – М.: НИИ ЭЧ и ГОС, 2002. – 408 с.
17. Майорова О.А. Геохимический подход к оценке экологического риска: дис... канд. геол.-минерал. наук. – М., 2002. – 110 с.
18. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду / Ю.А. Рахманин, С.М. Новиков, Т.А. Шашина, С. Иванов. – М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. – 143 с.
19. Te Winkel H. Environmental and health aspects of ashes produced at co-combustion of biomass // *WOCA Conference 3rd World of Coal Ash*. – Lexington, 2009. – Cod 79062.
20. Ревич Б.А. К оценке влияния деятельности ТЭЖ на качество окружающей среды и здоровье населения // *Проблемы прогнозирования*. – 2010. – № 4. – С. 87–99.
21. Захаренков В.В., Кислицына В.В. Определение приоритетности природоохранных мероприятий на основе оценки риска для здоровья населения промышленного города // *Успехи современного естествознания*. – 2014. – № 2. – С. 12–15.
22. Волкотруб Л.П., Чемерис Т.В. Эпидемиология злокачественных новообразований в г. Томске // *Сибирский медицинский журнал*. – 2002. – № 1–2. – С. 65–68.
23. Атмосферные загрязнения Томска и их влияние на здоровье населения / А.И. Воробьева, М.А. Медведев, Л.П. Волкотруб, М.В. Васильева. – Томск: Изд-во Томского. ун-та, 1992. – 192 с.
24. Экспериментальные и численные исследования длительного загрязнения снегового покрова ураном и торием в окрестностях теплоэлектростанции (на примере томской ГРЭС-2) / А.В. Таловская, В.Ф. Рапута, Е.А. Филимоненко, Е.Г. Язиков // *Оптика атмосферы и океана*. – 2013. – Т. 26. – № 8. – С. 642–646.
25. Филимоненко Е.А., Таловская А.В., Язиков Е.Г. Особенности вещественного состава пылевых атмосферных выпадений в зоне воздействия предприятия топливно-энергетического комплекса (на примере Томской ГРЭС-2) // *Оптика атмосферы и океана*. – 2012. – Т. 25. – № 10. – С. 896–901.
26. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды Томской области в 2015 году» / глав. ред. С.Я. Трапезников, редкол.: Ю.В. Лунева, Н.А. Чатурова. – Томск: Дельта-план, 2016. – 156 с.
27. Ардаков Г.Н. Использование снежного покрова в городах для оценки их влияния на окружающую природную среду: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Самара, 2004. – 21 с.
28. Davidson C.I., Elias R.W. Dry Deposition and Resuspension of Trace-Elements in the Remote High Sierra // *Geophysical Research Letters*. – 1982. – V. 9. – P. 91–93.
29. Боев В.М., Верещагин Н.Н., Дунаев В.Н. Определение атмосферных загрязнений по результатам исследований снегового покрова // *Гигиена и санитария*. – 2003. – № 5. – С. 69–71.
30. Артамонова С.Ю. Химический и фазовый состав техногенных аэрозолей в районе Сибирского химического комбината (Томская обл.) // *Химия в интересах устойчивого развития*. – 2014. – Т. 22. – № 3. – С. 229–240.
31. Экспериментальные и численные исследования загрязнения снежного покрова г. Новосибирска в окрестностях тепловых электростанций / В.Ф. Рапута, А.А. Леженин, Т.В. Ярославцева, А.Ю. Девятова // *Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле*. – 2015. – Т. 12. – С. 77–93.
32. Пространственное распределение химических элементов атмосферных выбросов угольной ТЭЦ / Н.К. Рыжакова, В.Ф. Рапута, Н.С. Рогова, А.Л. Борисенко, Е.А. Покровская // *Экология и промышленность России*. – 2013. – № 1. – С. 52–55.
33. Методы анализа данных загрязнения снегового покрова в зонах влияния промышленных предприятий (на примере г. Новосибирск) / С.Б. Бортникова, В.Ф. Рапута, А.Ю. Девятова, Ф.Н. Юдахин // *Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геоэкология*. – 2009. – № 6. – С. 515–525.
34. Таловская А.В., Филимоненко Е.А., Язиков Е.Г. Динамика элементного состава снегового покрова на территории северо-восточной зоны влияния Томск-Северской промышленной агломерации // *Оптика атмосферы и океана*. – 2014. – Т. 27. – № 6. – С. 491–495.
35. Jacob D.J. Introduction to atmospheric chemistry. – Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1999. – 280 p.
36. Azimi S., Ludwig A., Thévenot D.R. Trace metal determination in total atmospheric deposition in rural and urban areas // *Science of The Total Environment*. – 1999. – V. 308 – P. 247–256.
37. Ивлев Л.С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. – Л.: ЛГУ, 1982. – 365 с.
38. In-stack emissions of heavy metals estimated by moss biomonitoring method and snow-pack analysis / D. Ceburnis, J. Sakalys, K. Armolaitis, D. Valiulis, K. Kvietkus // *Atmospheric Environment*. – 2002. – V. 36. – № 9. – P. 1465–1474.
39. Шагилов А.Ю. Вещественный состав и геохимическая характеристика атмосферных выпадений на территории Обского бассейна: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2001. – 24 с.
40. Савичев О.Г., Иванов А.О. Атмосферные выпадения в бассейне средней Оби и их влияние на гидрохимический сток рек // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. – 2010. – № 1. – С. 63–70.
41. Филимоненко Е.А. Эколого-геохимическая обстановка в районах расположения объектов теплоэнергетики по данным изучения нерастворимой и растворимой фаз снега (на примере Томской области): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2015. – 21 с.

42. Разработка и апробация локальной модели выпадения загрязняющих веществ промышленного происхождения из атмосферы на подстилающую поверхность / А.А. Быков, Е.Л. Счастливцев, С.Г. Пушкин, М.Ю. Климович // Химия в интересах устойчивого развития. – 2002. – Т. 10. – № 5. – С. 563–574.
43. Методика расчета осредненных за длительный период концентраций выбрасываемых в атмосферу вредных веществ (дополнение к ОНД-86). – СПб.: ГТО им. А.И. Воейкова, 2005. – 17 с.
44. Geochemical approach to human health risk assessment of inhaled trace elements in the vicinity of industrial enterprises in Tomsk, Russia / N.A. Osipova, K.A. Filimonenko, A.V. Talovskaya, E.G. Yazikov // Human and Ecological Risk Assessment. – 2015. – V. 21. – № 6. – P. 1664–1685.
45. Способ определения загрязнённости снегового покрова техногенными компонентами: пат. № 2229737 Российская Федерация, № 2002127851; заявл. 17.10.2002; опубл. 27.05.2004.
46. Risk assessment guidance for Superfund: V. 1 – Human Health Evaluation Manual. P. A. Interim Final. – Washington, DC, USA: USEPA, 1989. – 192 p.
47. Health Effects Assessment Summary Tables (HEAST). – Washington, DC, USA: USEPA, 1997. – 241 p.
48. Guidelines for ecological assessment. EPA/630/R-95/002F. – Washington, DC, USA: USEPA. Office of Health and Environmental Assessment, 1998. – 162 p.
49. The Risk Assessment Information System. 2005. URL: <http://rais.ornl.gov/> (дата обращения 20.09.2017).
50. USEPA. 2007. Sources of chronic dose-response information. Table 1. Prioritized chronic dose-response values for screening risk assessments. URL: www.epa.gov/ttn/atw/toxsource/chronicsources.html (дата обращения 15.09.2017).
51. О введении в действие ГН 2.1.6.1338–03 Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест: Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 30.05.2003 N 114 (ред. от 30.08.2016) // Консультант Плюс – справочно-правовая система. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_42954/ (дата обращения 15.09.2017).
52. Михальчук А.А., Язиков Е.Г. Многомерный статистический анализ эколого-геохимических измерений. Ч. II. Компьютерный практикум. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 150 с.
53. Альмов В.Т., Тарасова Н.П. Техногенный риск: Анализ и оценка. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 113 с.
54. Dawoud E., Purucker S. Quantitative Uncertainty Analysis of Superfund Residential Risk Pathway Models for Soil and Groundwater. – USA: USEPA, 1996. – 256 p.
55. Осипова Н.А., Новиков С.А. Анализ неопределенности при оценке риска воздействия химических соединений на здоровье человека: св-во о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016612688, лицензионное соглашение от 16.05.2016.
56. Геохимия окружающей среды / Ю.Е. Саев, Б.А. Ревич, Е.П. Янин и др. – М.: Недра, 1990. – 335 с.
57. Минералогия пылевых аэрозолей в зоне воздействия промышленных предприятий г. Томска / Е.А. Филимоненко, А.В. Таловская, Е.Г. Язиков, Ю.В. Чумак, С.С. Ильенок // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 8-3. – С. 760–765.
58. Методические подходы к комплексной оценке экологического риска (с учетом различных уровней экосистемы) / Н.В. Ефимова, В.И. Гребенщикова, Г.А. Забуга, П.В. Кузнецов // Экологический риск: Материалы IV Всероссийской научной конференции с международным участием. – Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 1997. – С. 19–21.
59. Арбузов С.И. Металлоносность углей Сибири // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 1. – С. 77–83.
60. Волостнов А.В., Арбузов С.И. Токсичные элементы в углях Сибири // Энергетик. – 2011. – № 3. – С. 39–44.
61. Vejahati F., Xu Z., Gupta R. Trace elements in coal: Associations with coal and minerals and their behavior during coal utilization – a review // Fuel. – 2010. – № 4. – P. 904–911.
62. Влияние города Томска на химический и дисперсный состав атмосферного аэрозоля в приземном слое / В.Г. Аршинова, Б.Д. Белан, Т.М. Рассказчикова, Д.В. Симоненков // Оптика атмосферы и океана. – 2008. – Т. 21. – № 6. – С. 486–491.

Поступила 23.10.2017 г.

Информация об авторах

Осипова Н.А., кандидат химических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

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

Филимоненко Е.А., кандидат геолого-минералогических наук, старший преподаватель отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

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

Новиков С.А., доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 551.578.46:504.4:622.333.012

ECOLOGICAL RISKS CAUSED BY TOXIC ELEMENTS IMPACT ON AMBIENT AIR DETERMINED IN THE STUDY OF THE SNOW COVER IN TOMSK GRES-2 AREA

Nina A. Osipova¹,
osipova@tpu.ru

Anna V. Talovskaya¹,
talovskaj@yandex.ru

Ekaterina A. Filimonenko¹,
filimonenko@tpu.ru

Egor G. Yazikov¹,
yazikoveg@tpu.ru

Sergey A. Novikov¹,
nsa@tpu.ru

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

The relevance of the research is caused by the need of sustainable development of coal power. One of components to achieve this sustainability is the predictive assessment of the impact of solid emissions resulting from coal combustion, in transition of raw materials into digestible form, on the health of population in terms of increasing the share of coal generation in the fuel sector.

The main aim of the research is to determine the level of air pollution with solid emissions from thermal energy (Tomsk GRES-2), and to define the value of inhalation health risk based on the study of the snow cover.

Objects. To assess the environmental health risks on the territory of Tomsk the authors have selected the areas corresponding to the regions with the highest influx of anthropogenic dust particles in the impact zone of Tomsk GRES-2, as well as the area outside the impact zone of Tomsk GRES-2, to compare the results of the study.

Methods: atmogeochemical; risk assessment methods of chemical substances on human health; method for recovery of elemental concentrations in ambient air on the basis of their content in solid phase of snow cover; analysis of uncertainties in calculation of average daily doses using a random sampling of values with a certain distribution laws of the consider values.

Results. On the territory influenced by the GRES-2 the authors determined a high level of accumulation of Zn, Ba, W, Ni, V, Cu, Co in solid residue of snow relative to the background site that reflects the specificity of the effect of emissions of the considered power plant on the air. The greatest specific contribution to the integral level, non-cancer risks from chronic inhalation exposure of metals in the vicinity of the GRES-2 make Cu, Al, Mn, Ba and Zn. For all elements with carcinogenic properties, with the exception of Cr (VI), the values of the individual cancer risk is below 10^{-6} , which corresponds to a negligibly small level of risk. Individual carcinogenic risk caused by inhalation of Cr (VI) has values in the range from $7,65 \cdot 10^{-7}$ to $4,6 \cdot 10^{-5}$, and the values corresponding the upper boundary are considered according to the common methodology as a valid risk. The levels of risk from inhalation exposure of chemical elements in the zones of influence of Tomsk GRES-2, as well as the values of individual carcinogenic risk are acceptable.

Key words:

Solid snow residue, heavy metals, inhalation risk, carcinogenic risk, non-carcinogenic risk, thermal power plant.

The research was financially supported by the RFBR grant (no. 16–45–700184p_a). The research was carried out at national Research Tomsk Polytechnic University within the frame of the TPU Competitiveness Enhancement Program among the leading world research centers.

REFERENCES

1. Zorina T.G. Sustainable energy development: essence and methodological approaches to assessment. *Modern management technologies*, no. 1 (49), Article number: 4905. In Rus. Available at: <http://sovman.ru/article/4905/> (accessed 15 October 2017).
2. Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2030 goda [The energy strategy of Russia for the period up to 2030]. Available at: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (accessed 20 September 2017).
3. Yakutseni S.P. *Rasprostranennost uglevodorodnogo syrya, obogashchennogo tyazhelymi elementami-primesyami. Otsenka ekologicheskikh riskov* [Occurrence of hydrocarbon material enriched with heavy element-impurities. Assessment of ecological risks]. St-Petersburg, Nedra Publ., 2005. 372 p.
4. Epstein P.R., Buonocore J.J., Eckerle K., Hendryx M., Stout B.M., Heinberg R., Clapp R.W., May B., Reinhart N.L., Ahern M.M., Doshi S.K., Glustrom L. Full cost accounting for the life cycle of coal. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2011, vol. 1219, no. 1, pp. 73–98.
5. Wu D., Zhang F., Lou W., Li D., Chen J. Chemical characterization and toxicity assessment of fine particulate matters emitted from the combustion of petrol and diesel fuels. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 605–606, pp. 172–179.
6. Megido L., Suarez-Pena B., Negral L., Castrillon L., Fernandez-Nava Y. Suburban air quality: Human health hazard assessment of potentially toxic elements in PM10. *Chemosphere*, 2017, vol. 177, pp. 284–291.
7. Tang Z., Chai M., Cheng J., Jin J., Yang Y., Nie Z., Huang Q., Li Y. Contamination and health risks of heavy metals in street

- dust from a coal-mining city in eastern China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, vol. 138, pp. 83–91.
8. Bari M.A., Kindziński W.B. Concentrations, sources and human health risk of inhalation exposure to air toxics in Edmonton, Canada. *Chemosphere*, 2017, vol. 173, pp. 160–171.
 9. Cheng X., Huang Y., Long Z., Ni S., Shi Z., Zhang C. Characteristics, Sources and Health Risk Assessment of Trace Metals in PM10 in Panzhihua, China. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2017, vol. 98, no. 1, pp. 76–83.
 10. Maghakyan N., Tepanosyan G., Belyaeva O., Sahakyan L., Saghatlyan A. Assessment of pollution levels and human health risk of heavy metals in dust deposited on Yerevan's tree leaves (Armenia). *Acta Geochimica*, 2017, vol. 36, no. 1, pp. 16–26.
 11. Emmanouil C., Drositi E., Vasilatou V., Diapouli E., Krikonis K., Eleftheriadis K., Kungolos A. Study on particulate matter air pollution, source origin, and human health risk based of PM10 metal content in Volos City, Greece. *Toxicological and Environmental Chemistry*, 2017, vol. 99, no. 4, pp. 691–709.
 12. Yang C., Tiyyip T., Hou Y.-J., Gao Y.-X., Liu F., Xia N. Assessment of heavy metals pollution and its health risk of atmospheric dust fall from east part of Junggar Basin in Xinjiang. *Huanjing Kexue (Environmental Science)*, 2016, vol. 37, no 7, pp. 2453–2461.
 13. Li K., Liang T., Wang, L. Risk assessment of atmospheric heavy metals exposure in Baotou, a typical industrial city in northern China. *Environmental Geochemistry and Health*, 2016, vol. 38, no. 3, pp. 843–853.
 14. George J., Masto R.E., Ram L.C., Das T.B., Rout T.K., Mohan M. Human Exposure Risks for Metals in Soil Near a Coal-Fired Power-Generating Plant. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2015, vol. 68, no. 3, pp. 451–461.
 15. Nadal M., Schuhmacher M., Domingo J.L. Probabilistic human health risk of PCDD/F exposure: a socioeconomic assessment. *Journal of Environmental Monitoring*, 2004, no. 6, pp. 926–931.
 16. Onishchenko G.G., Novikov S.M., Rakhmanin Yu.A., Avaliani S.L., Bushutueva K.A. *Osnovy otsenki riska dlya zdorovya naseleniya pri vozdeystvii khimicheskikh veshchestv, zagryaznyayushchikh okruzhayushchuyu sredu* [Principles of risk assessment for public health at exposure of chemicals polluted the environment]. Moscow, NII ECH i GOS Publ., 2002. pp. 239–245.
 17. Mayorova O.A. *Geokhimicheskyy podkhod k otsenke ekologicheskogo riska*. Diss. Kand. nauk [Geochemical approach to environmental risk assessment. Cand. Diss.]. Moscow, 2002. 110 p.
 18. Rakhmanin Yu.A., Novikov S.M., Shashina T.A., Ivanov S. *Rukovodstvo po otsenke riska dlya zdorovya naseleniya pri vozdeystvii khimicheskikh veshchestv, zagryaznyayushchikh okruzhayushchuyu sredu* [The risk assessment guidance for public health when exposed to chemicals that pollute the environment]. Moscow, Federal center for sanitary inspection Ministry of health of Russia Publ., 2004. 143 p.
 19. Te Winkel H. Environmental and health aspects of ashes produced at co-combustion of biomass. *WOCA Conference 3rd World of Coal Ash*. Lexington, 2009. Cod 79062.
 20. Revich B.A. *K otsenke vliyaniya deyatelnosti TEK na kachestvo okruzhayushchey sredy i zdorovye naseleniya* [The impact of the energy sector on the environment quality assessment and population health]. *Studies on Russian Economic Development*, 2010, no. 4, pp. 87–99.
 21. Zakharenkov V.V., Kisilitsyna V.V. Prioritization of environmental measures based on risk assessment for the health of the population of an industrial city. *Advances in current natural sciences*, 2014, no. 2, pp. 12–15. In Rus.
 22. Volkotrub L.P., Chemeris T.V. Cancer epidemiology in Tomsk. *Siberian Medical Journal*, 2002, no. 1–2, pp. 65–68. In Rus.
 23. Vorobyeva A.I., Medvedev M.A., Volkotrub L.P., Vasilyeva M.V. *Atmosfernye zagryazneniya Tomsk i ikh vliyaniye na zdorovye naseleniya* [Atmospheric pollution in Tomsk and its impact on the health of population]. Tomsk, TSU Publ., 1992. 192 p.
 24. Talovskaya A.V., Raputa V.F., Filimonenko E.A., Yazikov E.G. Experimental and numerical studies of long-term snow cover pollution by uranium and thorium in the vicinity of thermal power plant (on the example of Tomsk hydroelectrostation-2). *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2013, vol. 26, no. 8, pp. 642–646. In Rus.
 25. Filimonenko E.A., Talovskaya A.V., Yazikov E.G. Mineralogy characteristic of dust aerosols in fuel and power supplying plant area (by the example of Tomsk GRES-2). *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2012, vol. 25, no. 10, pp. 896–901. In Rus.
 26. Trapeznikov S.Ya., Luneva Yu.V., Chaturova N.A. *Gosudarstvennyy doklad «O sostoyanii i okhrane okruzhayushchey sredy Tomskoy oblasti v 2015 godu»* [State report «On the state and environmental protection of the Tomsk region in 2015»]. Tomsk, Deltaplant Publ., 2016. 156 p.
 27. Ardakov G.N. *Ispolzovanie snezhnogo pokrova v gorodakh dlya otsenki ikh vliyaniya na okruzhayushchuyu prirodnyuyu sredu*. Avtoreferat Kand. nauk [The use of snow cover in cities for estimation of their impact on the environment. Cand. Diss. Abstract]. Samara, 2004. 21 p.
 28. Davidson C.I., Elias R.W. Dry Deposition and Resuspension of Trace-Elements in the Remote High Sierra. *Geophysical Research Letters*, 1982, vol. 9, pp. 91–93.
 29. Boyev V.M., Vereshchagin N.N., Dunaev V.N. Determination of ambient pollutions by the results of study of the snow cover. *Hygiene and sanitation*, 2003, no. 5, pp. 69–71. In Rus.
 30. Artamonova S.Yu. Chemical and Phase Composition of Technogenic Aerosol in the Region of Siberian Chemical Plant (Tomsk Region). *Chemistry for Sustainable Development*, 2014, vol. 22, no 3, pp. 229–240. In Rus.
 31. Raputa V.F., Lezhenin A.A., Yaroslavtseva T.V., Devyatova A.Yu. Measurements and Numerical Studies of Snow Cover Pollution near Thermal Power Stations in the City of Novosibirsk. *The Bulletin of Irkutsk State University. Earth Sciences*, 2015, vol. 12, pp. 77–93. In Rus.
 32. Ryzhakova N.K., Raputa V.F., Rogova N.S., Borisenko A.L., Pokrovskaya E.A. Spatial distribution of chemical elements in air emissions of coal CHP. *Ecology and industry of Russia*, 2013, no. 1, pp. 52–55. In Rus.
 33. Bortnikova S.B., Raputa V.F., Devyatova A.Yu., Yudakhin F.N. Methods of analyzing data on the snow cover contamination in the areas affected by industrial enterprises (by the example of Novosibirsk). *Environmental Geoscience*, 2009, no. 6, pp. 515–525. In Rus.
 34. Talovskaya A.V., Filimonenko E.A., Yazikov E.G. Dynamics of the elemental composition of the snow cover in the north-eastern zone of influence of Tomsk-Seversk industrial agglomeration. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2014, vol. 27, no. 6, pp. 491–495. In Rus.
 35. Jacob D.J. Introduction to atmospheric chemistry, Princeton, N.J., Princeton University Press, 1999. 280 p.
 36. Azimi S., Ludwig A., Thévenot D.R. Trace metal determination in total atmospheric deposition in rural and urban areas. *Science of the Total Environment*, 1999, vol. 308, pp. 247–256.
 37. Ivlev L.S. *Khimichesky sostav i struktura atmosferykh aerorozley* [Chemical composition and structure of atmospheric aerosols]. Leningrad, LGU Publ., 1982. 365 p.
 38. Ceburnis D., Sakalys, J., Armolaitis K., Valiulis D., Kvietkus K. In-stack emissions of heavy metals estimated by moss biomonitoring method and snow-pack analysis. *Atmospheric Environment*, 2002, vol. 36, no. 9, pp. 1465–1474.
 39. Shatilov A.Yu. *Veshchestvennyy sostav i geokhimicheskaya kharakteristika atmosferykh vypadeniy na territorii Obskogo basseyna*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Composition and geochemical characteristics of atmospheric sediments in the territory of Ob basin. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2001. 24 p.
 40. Savichev O.G., Ivanov A.O. Atmospheric depositions in the middle Ob basin and their impact on hydrochemical river flow. *Russian*

- Academy of Sciences. Geographic series*, 2010, no. 1, pp. 63–70. In Rus.
41. Filimonenko E.A. *Ekologo-geokhimicheskaya obstanovka v rayonakh raspolozheniya obyektov teploenergetiki po dannym izucheniya nerastvorimoy i rastvorimoy faz snega (na primere Tomskoy oblasti)*. Avtoreferat Kand. Dis. [Ecological and geochemical situation in the areas of thermal engineering objects location by the data of studying soluble and insoluble snow phases. Cand. Diss Abstract]. Tomsk, 2015. 21 p.
 42. Bykov A.A., Schastlivtsev E.L., Pushkin S.G., Klimovich M.Yu. Razrabotka i aprobatsiya lokalnoy modeli vypadeniya zagryaznyayushchikh veshchestv promyshlennogo proiskhozhdeniya iz atmosfery na podstilayushchuyu poverkhnost [Development and testing the local model of human-made pollutant fallout from atmosphere to the substrate]. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*, 2002, vol. 10, no. 5, pp. 563–574.
 43. *Metodika rascheta osrednennykh za dlitelny period kontsentratsiy vybrasyvaemykh v atmosferu vrednykh veshchestv (dopolnenie k OND-86)* [Technique for calculating the average concentrations of contaminant injected into atmosphere for a long period (supplement to OND-86)]. St-Petersburg, GGO im. A.I. Voeykova, 2005. 17 p.
 44. Osipova N.A., Filimonenko K.A., Talovskaya A.V., Yazikov E.G. Geochemical approach to human health risk assessment of inhaled trace elements in the vicinity of industrial enterprises in Tomsk, Russia. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2015, vol. 21, no. 6, pp. 1664–1685.
 45. Yazikov E.G., Shatilov A.Yu., Talovskaya A.V. *Sposob opredeleniya zagryaznenosti snegovogo pokrova tekhnogennymi komponentami* [Method for determining snow cover pollution with man-made components]. Patent RF, no. 2229737, 2004.
 46. *Risk assessment guidance for Superfund*: Vol. 1. Human Health Evaluation Manual. P. A. Interim Final. Washington, DC, USA, USEPA, 1989. 192 p.
 47. *Health Effects Assessment Summary Tables (HEAST)*. Washington, DC, USA, USEPA, 1997. 241 p.
 48. *Guidelines for ecological assessment*. EPA/630/R-95/002F. Washington, DC, USA, USEPA, 1998. 162 p.
 49. *The Risk Assessment Information System*. 2005. Available at: <http://rais.ornl.gov/> (accessed 20 September 2017).
 50. USEPA. 2007. Sources of chronic dose-response information. Table 1. Prioritized chronic dose-response values for screening risk assessments. Available at: www.epa.gov/ttn/atw/toxsource/chronicsources.html (accessed 15 September 2017).
 51. *O vvedenii v deystvie GN 2.1.6.1338-03 Predelno dopustimye kontsentratsii (PDK) zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosfere vozdukhe naseleennykh mest: Postanovlenie Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha RF ot 30.05.2003 N 114 (red. ot 30.08.2016)* [GN 2.1.6.1338-03 Maximum permissible concentration (MPC) of polluting substances in atmospheric air of populated areas]. Consultant Plus. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_42954/ (accessed 15 September 2017).
 52. Mihalchuk A.A., Yazikov E.G. *Mnogomerny statistichesky analiz ekologo-geokhimicheskikh izmereniy. Ch. II. Kompyuterny praktikum* [Multivariate statistical analysis of environmental geochemical measurements. P. II. Computer workshop]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2014. 150 p.
 53. Alymov V.T., Tarasova N.P. *Tekhnogenny risk: Analiz i otsenka* [Technogenic risk: Analysis and assessment]. Moscow, Akademik Publ., 2004. 113 p.
 54. Dawoud E., Purucker S. *Quantitative Uncertainty Analysis of Superfund Residential Risk Pathway Models for Soil and Groundwater*. USA, USEPA, 1996. 256 p.
 55. Osipova N.A., Novikov S.A. Analiz neopredelenosti pri otsenke riska vozdeystviya khimicheskikh soedineniy na zdorove cheloveka [Uncertainty analysis in the risk assessment of the effects of chemicals on human health]. *Certificate of state registration of computer programs no. 2016612688 license agreement, 16.05.2016*.
 56. Saet Yu.E., Revich B.A., Yanin E.P. *Geokhimiya okruzhayushchey sredy* [Geochemistry of the environment]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 335 p.
 57. Filimonenko E.A., Talovskaya A.V., Yazikov E.G., Chumak Yu.V., Ilenok S.S. Mineral composition of solid aerosols particles in impact zones of Tomsk's industrial enterprises. *Fundamental research*, 2013, no. 8–3, pp. 760–765. In Rus.
 58. Efimova N.V., Grebenshchikova V.I., Zabuga G.A., Kuznetsov P.V. Metodicheskie podkhody k kompleksnoy otsenke ekologicheskogo riska (s ucheto razlichnykh urovney ekosistemy) [Methodical approaches to complex environmental risk assessment (taking into account the different elements of the ecosystem)]. *Ekologichesky risk. Materialy IV Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Ecological Risk. Proc. of the fourth All-Russian scientific conference with international participation]. Irkutsk, V.B. Sochavy Institut of Geography SO RAN, 1997. pp. 19–21.
 59. Arbutov S.I. Metalbearing ability of Siberian coals. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2007, vol. 311, no. 1, pp. 77–83. In Rus.
 60. Volostnov A.V., Arbutov S.I. Toksichnye elementy v uglyakh Sibiri [Toxic elements in coals of Siberia]. *Energetik*, 2011, no. 3, pp. 39–44.
 61. Vejahati F., Xu Z., Gupta R. Trace elements in coal: Associations with coal and minerals and their behavior during coal utilization – a review. *Fuel*, 2010, no. 4, pp. 904–911.
 62. Arshinova V.G., Belan B.D., Rasskazchikova T.M., Simonenkov D.V. Influence of the Tomsk city on the chemical and disperse composition of the surface aerosol. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2008, vol. 21, no. 6, pp. 486–491. In Rus.

Received: 23 October 2017.

Information about the authors

Nina A. Osipova, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Anna V. Talovskaya, Cand. Sc., National Research associate professor, Tomsk Polytechnic University.

Ekaterina A. Filimonenko, Cand. Sc., National Research assistant, Tomsk Polytechnic University.

Egor G. Yazikov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Sergey A. Novikov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 581.571.151–25

ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ЛИШАЙНИКА НА ШИФЕРЕ КАК БИОИНДИКАТОР ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ АГЛОМЕРАЦИИ Г. ГОРНО-АЛТАЙСКА

Робертус Юрий Владимирович¹,
ariocol@mail.gorny.ru

Рихванов Леонид Петрович²,
rikhvanov@tpu.ru

Ситникова Валентина Александровна³,
valya_90_well@mail.ru

Савенко Ксения Сергеевна⁴,
ariocol@mail.gorny.ru

Большунова Татьяна Сергеевна²,
BolshunovaTS@gmail.com

¹ Институт водных и экологических проблем СО РАН,
Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1.

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

³ Горно-Алтайский государственный университет,
Россия, 649000, Республика Алтай, г. Горно-Алтайск, ул. Ленкина, 1.

⁴ Алтайский региональный институт экологии,
Россия, 649100, Республика Алтай, с. Майма, ул. Заводская, 54.

Актуальность работы обусловлена необходимостью оценки и мониторинга экологического состояния атмосферного воздуха в районе города Горно-Алтайска – наиболее урбанизированной территории Республики Алтай.

Цель работы: изучение химического состава и особенностей распределения элементов в лишайнике *Caloplaca* sp. (накипная) на шифере как биоиндикатора специфики и интенсивности антропогенной деятельности в пределах агломерации г. Горно-Алтайска.

Методы исследования: отбор на шиферной кровле строений репрезентативных проб лишайника *Caloplaca* sp. (накипная) и сопряженных проб шифера-субстрата, определение содержания в них 28 химических элементов методом инструментального нейтронно-активационного анализа, обработка и интерпретация полученных данных методами прикладной статистики.

Результаты. Впервые получены данные об уровнях содержания комплекса химических элементов в лишайнике *Caloplaca* sp. (накипная) на шифере в районе г. Горно-Алтайска. Проведено их сравнение с местным фоном и кларком в биосфере. Установлены тесные связи между элементами ассоциации As, Sb, Cr, Zn, Ba, Br, Co, Fe, U, PЗЭ в лишайнике, а также близкий уровень их концентраций и содержания в углях Кузнецкого бассейна. Приведена аргументация в пользу поступления этих элементов в лишайник *Caloplaca* sp. из атмосферного воздуха. Выявлены области их повышенных концентраций в лишайнике, пространственно совпадающие с очагами высокой пылевой нагрузки на территории агломерации. Сделан вывод о возможности использования элементного состава эпилитного лишайника *Caloplaca* sp. на шифере для целей биоиндикации специфики и интенсивности антропогенной деятельности, а также в качестве дополнительного показателя при мониторинге состояния приземной атмосферы населенных пунктов агломерации г. Горно-Алтайска.

Ключевые слова:

Горно-Алтайск, атмосферный воздух, лишайники на шифере, элементный состав, особенности распределения, загрязнение, биоиндикатор.

Введение

В Республике Алтай к слабо урбанизированным территориям относится хозяйственно-сели-тебная агломерация г. Горно-Алтайска и его пригородов, где в условиях расчлененного рельефа на площади 30 км² проживает 85 тыс. чел. Несмотря на отсутствие крупных и средних промышленных предприятий, компоненты окружающей среды на этой территории подвержены воздействию со стороны угольных котельных (в прошлом до 150 ед.) и автотранспортных средств (более 35 тыс. ед.) [1].

Следует отметить, что в районе г. Горно-Алтайска начиная с 1990-х гг. эпизодически проводились работы по оценке экологического состояния и мониторингу компонентов окружающей среды, в основном атмосферного воздуха и природных вод.

В последние годы, после перевода основных котельных на природный газ, экологическая обстановка в пределах агломерации заметно улучшилась, особенно состояние воздушного бассейна, для которого в зимние периоды были нередки процессы смогообразования. Очаги прошлого загряз-

нения атмосферного воздуха, в разной степени проявленные в почвенном покрове агломерации [2], нуждаются в подтверждении по другим природным средам и объектам, в частности, на примере широко распространенных накипных лишайников на шифере. Известно, что лишайники успешно используются в биоиндикационных исследованиях антропогенного и естественного загрязнения воздуха [3–5].

В литературе так называемые нитрофильные лишайники, обитающие на искусственных «каменистоподобных» субстратах (бетоне, кирпиче, шифере и пр.) выделяются в отдельную группу эпилитной лишенофлоры [6, 7]. Характерными особенностями этих лишайников являются: долголетие, медленный постоянный рост, аэральное питание, безбарьерное накопление поллютантов [8, 9]. Это делает их чувствительным биоиндикатором широкого спектра загрязнителей атмосферного воздуха населенных пунктов и позволяет на их основе картографировать зоны многолетнего загрязнения, особенно на урбанизированных территориях [10–17].

С учетом того обстоятельства, что более 85 % агломерации г. Горно-Алтайска составляет частный сектор с одноэтажной застройкой и широким применением шифера в качестве кровельного материала, авторами была изучена возможность оценки по элементному составу обитающих на нем эпилитных лишайников уровня и специфики прошлого загрязнения приземной атмосферы этой территории.

В качестве тест-объекта в работе используются эпилитные лишайники *Caloplaca* sp., весьма распространенные и исследуемые в биоиндикации [18–20].

Материалы и методы

Объектом изучения служили шиферные крыши одноэтажных домов и надворных построек в г. Горно-Алтайске и в пригородных селах Майма, Кызыл-Озек, Алферово. Путем опроса уточнялась дата сооружения кровли. В основном опробовалась кровля со временем эксплуатации 40–60 лет. Всего на территории агломерации было взято 28 образцов доминирующего лишайника *Caloplaca* sp., представленного мелкими (0,1–0,5 мм) накипны-

ми агрегатами зеленовато-желтого цвета толщиной до 1–2 мм (рис. 1).

Расстояние между пунктами опробования составляло 1–2 км, то есть примерно 1 проба на 1 км². Для оценки влияния химического состава шифера на элементный состав покрытого им лишайника в четырех пунктах были взяты их сопряженные пробы.

Для однородности данных выбирались площадки с проективным покрытием кровли около 50 %, которое определяли общепринятым в лишенологии [21, 22 и др.] визуальным способом сеточки-квадрата со стороной 10 см и ортогональными линиями через 1 см.

Отбор проводился в сухую погоду специальным ножом-скребком. Во избежание его контакта с поверхностью шифера края ножа обматывались изолентой, что обеспечивало срез лишайника на высоте более 0,5 мм. Все пробы просматривались под микроскопом и очищались от попавших частичек шифера. Подготовка проб лишайников к анализу заключалась в истирании материала до состояния пудры.

Элементный состав проб изучен методом ИНАА на исследовательском реакторе ИРТ-Т в лаборатории ядерно-геохимических методов Томского политехнического университета (аналитик А.Ф. Судыко). По результатам анализа были рассчитаны статистические параметры распределения элементов, их корреляционные связи, коэффициенты (K_c) и кларки (K_k) концентрации относительно местного фона и биосферы соответственно. Кроме того, проведен сравнительный анализ элементного состава субстрата – шифера и изученного лишайника *Caloplaca* sp.

Результаты и их обсуждение

Предварительно установлено, что в появлении и развитии лишайников на шифере в пределах агломерации г. Горно-Алтайска можно выделить три основные стадии. В первую из них на гребнях волн шиферных листов появляются темные пятна, во вторую на их месте развивается лишайник *Caloplaca* sp. (накипная), в третью среди его скоплений появляется красновато-оранжевые розетки *Xantoria* sp. (лопастная) (рис. 1).

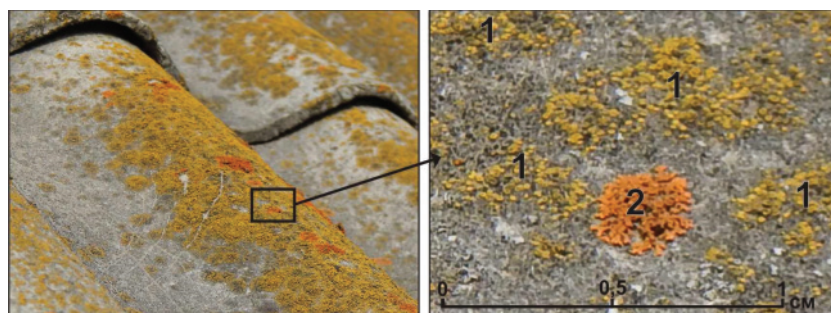


Рис. 1. Лишайники на шифере: 1 – *Caloplaca* sp. (накипная); 2 – *Xantoria* sp. (лопастная)

Fig. 1. Lichens on roofing slate: 1 – *Caloplaca* sp. (scale); 2 – *Xantoria* sp. (blade)

Таблица 1. Содержание МЭ в лишайнике и в шифере в районе г. Горно-Алтайска, мг/кг

Table 1. Contents of microelements in lichen and slate in the area of Gorno-Altaysk, mg/kg

МЭ ME	Лишайник <i>Caloplaca</i> sp. (накипная) Lichen <i>Caloplaca</i> sp. (scale)				Кс*, ед	Кк**, ед.	Шифер (субстрат) Slate (substrate)			$\bar{X}_n/\bar{X}_ш$, ед.
	фон/background	max	mean	V, %			max	mean	V, %	
Na	0,1	1,28	0,51	62	5,1	0,3	0,11	0,09	13	5,67
Ca	0,7	2,33	1,28	25	1,8	0,8	19,7	17,0	30	0,08
Cr	30	235,0	78,7	52	2,6	15734	298,6	211,0	31	0,37
Fe	1	2,96	1,83	27	1,8	0,8	2,37	2,28	5	0,80
Co	4	17,2	9,46	28	2,4	4300	16,3	14,5	10	0,65
Zn	80	521,5	169,7	57	2,1	36891	359,1	158,7	85	1,07
As	4	16,4	8,26	33	2,0	27533	42,0	26,5	46	0,31
Br	7	31,0	19,2	32	2,7	7385	2,84	2,50	22	7,68
Rb	10	37,6	23,6	22	2,4	7167	10,6	4,51	87	5,23
Sb	0,2	2,96	1,14	54	5,7	45640	14,5	4,64	143	0,24
Cs	0,5	1,77	1,27	23	2,5	2117	0,81	0,35	92	3,63
Ba	120	492,7	271,7	27	2,3	75472	798,8	538,6	47	0,50
La	5	22,9	12,0	30	2,4	12000	10,9	8,67	17	1,38
Ce	10	71,5	27,0	42	2,7	8993	22,4	18,5	14	1,46
Hf	0,5	6,44	2,24	50	4,5	11200	1,37	1,02	26	2,20
Ta	0,1	0,78	0,41	51	4,1	2050	0,37	0,14	116	2,93
Th	1,5	4,78	3,01	27	2,0	3762	2,50	2,00	30	1,50
U	0,5	2,66	1,38	37	2,8	6900	1,60	1,39	12	1,00

* – содержание относительно местного фона, ** – то же относительно кларка элемента в биосфере [20].

* – content relative to local background, ** – the same with respect to the clark of element in the biosphere [20].

Впервые оцененное среднее содержание микроэлементов (МЭ) в этом лишайнике характеризуется умеренной вариабельностью, небольшим превышением местного фона (в среднем в 2,5 раза) и значительным – на 3–4 порядка – превышением их кларков в биосфере, кроме околочларковых концентраций железа, кальция и натрия (табл. 1).

Среднее содержание основных МЭ (более 10 мг/кг) в лишайнике *Caloplaca* sp. убывает в ряду: Ba, Zn, Cr, Ce, Rb, Br, La, Nd, а в субстрате-шифере в ряду: Ba, Cr, Zn, As, Ce, Ca, Co. При внешнем сходстве этих рядов в них есть и заметные различия, выражающиеся в отношении среднего содержания МЭ в лишайнике и в шифере. Наибольшие, более чем трехкратные, различия между ними проявлены для Ca, Sb, As, Cs, Na, Rb, Br.

Анализ элементного состава лишайника *Caloplaca* sp. в пределах изученных населенных пунктов агломерации показал, что максимальное содержание большинства МЭ проявлено на территории г. Горно-Алтайска и в подчиненном количестве в сопредельном с ним с. Алферово (табл. 2). Так, среднее значение коэффициента превышения местного фона по всем изученным МЭ увеличивается в ряду населенных пунктов: Кызыл-Озек (2,1) – Майма (2,5) – Алферово (3,0) – Горно-Алтайск (3,4).

Подобная ситуация объясняется концентрацией на территории города основных источников антропогенного воздействия на окружающую природную среду (котельных, автотранспорта) и доминирующим в теплые периоды года переносом их выбросов в восточном направлении в сторону с. Алферово [23].

Таблица 2. Параметры распределение МЭ в лишайнике *Caloplaca* sp., мг/кг

Table 2. Parameters of distribution of microelements in the lichen *Caloplaca* sp., mg/kg

МЭ ME	с. Майма (n=10) Mayma (n=10)		г. Горно-Алтайск (n=13) Gorno-Altaysk (n=13)		с. Алферово (n=2) Alpherovo (n=2)		с. Кызыл-Озек (n=3) Kyzyl-Ozek (n=3)	
	max	mean	max	mean	max	mean	max	mean
Na	1,16	0,46	1,28	0,60	0,44	0,43	0,66	0,37
Ca	1,54	1,14	2,33	1,44	1,18	1,09	1,46	1,09
Cr	84,5	55,7	235,0	102,9	64,5	62,8	102,8	62,1
Fe	1,93	1,51	2,96	2,16	2,01	1,94	1,37	1,32
Co	9,56	7,80	17,2	11,4	9,83	9,53	7,07	6,71
Zn	364,5	167,0	521,5	200,1	102,3	101,2	118,1	108,1
As	9,59	6,94	16,4	9,61	7,12	6,35	5,89	5,63
Br	27,3	18,2	31,0	20,0	23,1	21,8	24,0	19,9
Rb	32,6	22,2	37,6	24,8	29,0	27,6	22,2	20,8
Sb	1,47	0,89	2,96	1,57	0,73	0,63	0,84	0,59
Cs	1,61	1,29	1,77	1,22	1,74	1,66	1,57	1,25
Ba	319,1	241,5	492,7	309,8	231,0	209,6	273,4	225,4
Ce	29,2	20,7	71,5	33,3	30,8	30,2	20,9	18,3
Hf	2,51	1,74	6,44	2,74	2,66	2,65	1,55	1,42
Ta	0,52	0,31	0,78	0,50	0,49	0,48	0,47	0,30
Th	3,52	2,51	4,78	3,52	3,48	3,46	2,53	2,26
U	2,03	1,39	2,66	1,41	1,80	1,71	1,24	1,01

Примечание: выделены наибольшие средние концентрации МЭ в ряду населенных пунктов агломерации.

Note: the highest average concentrations of ME in a number of settlements of agglomeration are in bold.

Большинство изученных МЭ в лишайнике *Caloplaca* sp. имеют между собой тесные (на уровне более 95 %) положительные связи, доля которых как правило превышает 50 % от их общего числа. Наиболее устойчивые связи характерны для ассо-

циации типоморфных элементов As, Sb, Cr, Zn, Ba, Br, Co, Fe, U, РЗЭ. Среднее содержание этой группы МЭ в лишайнике в основном заметно ниже, чем в шифере (кроме цинка, урана, брома и РЗЭ). Исключением является пониженное число связей натрия, хрома, брома, цезия и золота (табл. 3). Так, все связи золота с другими МЭ отрицательные и незначимые, что в свете имеющихся данных не находит объяснения.

Анализ корреляционных связей между МЭ в сопряженных пробах лишайника *Caloplaca sp.* и в шифере показал, что большая их часть имеет близкий к значимому уровень и отрицательный знак, проявленный как для связей разных МЭ, так и для связи конкретных микроэлементов в лишайнике и в шифере. Доля отрицательных связей между МЭ в таких сопряженных пробах, как правило, превышает 60 % от их общего количества (рис. 2), кроме натрия (23 %) и кальция (42 %) (табл. 3). Эти данные согласуются с представлениями [24], что для лишайников, развивающихся на бедных МЭ субстратах, характерен более высокий уровень их аккумуляции, чем для тех, которые росли на богатых ими субстратах.

Таблица 3. Характер корреляционных связей МЭ в лишайнике *Caloplaca sp.* и шифере

Table 3. Nature of correlations of microelements in the lichen *Caloplaca sp.* and slate

Ba	Zn	Cr	Rb	Br	Co	As	Sb	Fe	Na	Ca	Cs	Hf	Th	U	РЗЭ
Число положительных корреляционных связей между МЭ ($p \geq 0,05$) в лишайнике, % Number of positive correlations between ME ($p \geq 0,05$) in the lichen, %															
81	35	19	50	12	73	50	58	80	0	54	23	73	81	50	70
Число отрицательных корреляционных связей между МЭ в лишайнике и в шифере ($p \geq 0,05$), % Number of negative correlations between ME in lichen and slate ($p \geq 0,05$), %															
69	81	62	88	62	88	69	69	72	23	42	75	61	62	62	80

Между долей значимых корреляционных связей МЭ в лишайнике *Caloplaca sp.* и их долей в сопряженных пробах лишайника и шифера проявлена зависимость, выражающаяся в том, что доля первых из них в целом увеличивается по мере на-

растания числа отрицательных связей МЭ в лишайнике и в шифере. Примечательно, что наименьший уровень связей МЭ в лишайнике характерен для наиболее «летучих» из них – бром, цезий и др. [25] (рис. 2). Доминирующий «противофазный» характер МЭ в лишайнике относительно содержания в шифере-субстрате наглядно виден при сравнении их средних концентраций (рис. 3).

Иными словами, чем выше «антагонизм» МЭ в лишайнике и субстрате, тем выше уровень прямых связей между МЭ в лишайнике. На наш взгляд, это обстоятельство указывает на: 1) почти полное отсутствие поступления МЭ из шифера в лишайник; 2) превалирующее поступление МЭ в лишайник из атмосферного воздуха; 3) тесную связь МЭ, предположительно поступающих в лишайник от их общего источника.

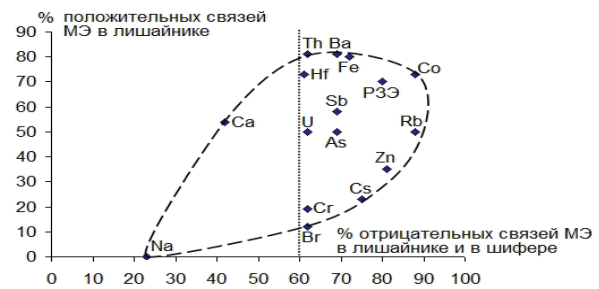


Рис. 2. Зависимость между числом связей МЭ ($p \geq 0,05$) в лишайнике *Caloplaca sp.* и частотой обратных связей МЭ в системе лишайник *Caloplaca sp.* – шифер-субстрат

Fig. 2. Relationship between the number of relationships of microelements ($p \geq 0,05$) in the lichen *Caloplaca sp.* and frequency of feedback of microelements in the lichen *Caloplaca sp.* – slate-substrate system

Сопоставление среднего содержания МЭ в лишайнике *Caloplaca sp.* и в углях Кузнецкого бассейна [26], которые в основном используются в котельных агломерации, показало их близкий характер (рис. 3). В пользу «угольной» природы загрязнения, фиксируемого лишайником, говорит и тот факт, что убывающий ряд концентраций МЭ, а также их отношений в нем (Th/U, Rb/Cs и др.) почти идентичен ряду их содержания в кузнецком угле. Отдельные отличия в рядах предположи-

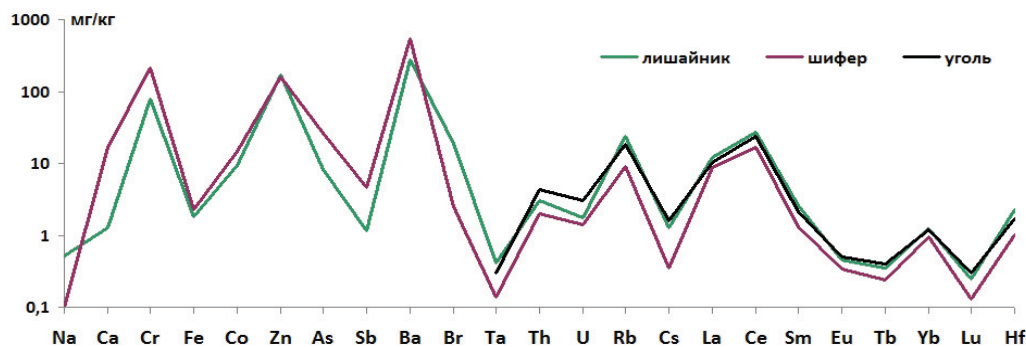


Рис. 3. Средние концентрации МЭ в лишайнике *Caloplaca sp.*, в шифере-субстрате и в кузнецком угле

Fig. 3. Average concentrations of microelements in the lichen *Caloplaca sp.*, in the slate-substrate and in Kuznetsk coal

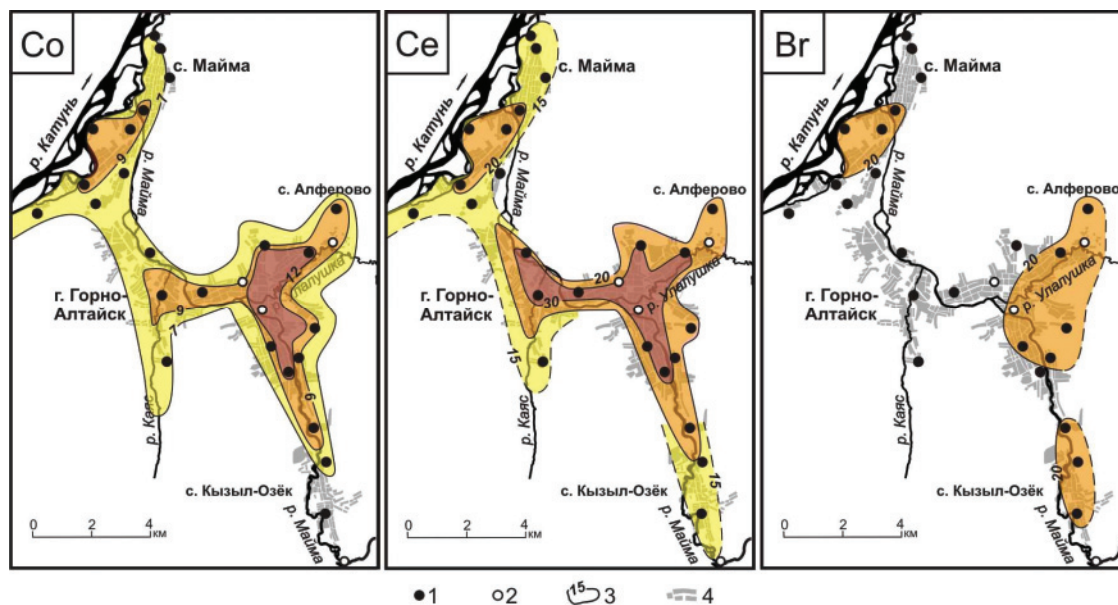


Рис. 4. Характер распределения МЭ в лишайнике *Caloplaca sp.* на территории агломерации г. Горно-Алтайска. Пункты отбора: 1 – лишайника, 2 – лишайника и шифера; 3 – области повышенного содержания микроэлементов (мг/кг) в лишайнике; 4 – промышленно-селитебная зона агломерации г. Горно-Алтайска

Fig. 4. Distribution of microelements in the lichen *Caloplaca sp.* in the agglomeration area of Gorno-Altaysk. The points of sampling: 1 – lichens, 2 – lichen and slate; 3 – region of the high content of microelements (mg/kg) in lichen; 4 – industrial-residential area agglomeration city of Gorno-Altaysk

тельно обусловлены частичным использованием бурых углей Канско-Ачинского бассейна.

На основании изложенного можно предполагать, что основным источником поступления изученных МЭ в лишайник на шифере (главным образом, ассоциации As, Sb, Cr, Zn, Ba, Br, Co, Fe, U, РЗЭ) являлись пылеаэрозольные выбросы, а также сажа и недожог угольных котельных в относительно недалеком прошлом (10–50 лет назад).

Установлено, что распределение на территории агломерации МЭ, аккумулирующихся в лишайнике *Caloplaca sp.*, имеет однотипный характер. Предварительно выявлены две области повышенного содержания МЭ в лишайнике, основная из которых охватывает центральную и восточную части г. Горно-Алтайска, а второстепенная – центр с. Майма (район разезда). Ореолы отдельных «летучих» МЭ (бром, цезий и др.) локализованы в восточной части агломерации (рис. 4).

Таким образом, полученные данные по элементному составу лишайника *Caloplaca sp.* на шифере позволяют с высокой степенью достоверности зонировать территорию агломерации г. Горно-Алтайска по уровню накопленного (прошлого и текущего) антропогенного воздействия (загрязнения) на приземную атмосферу. В качестве показателя уровня загрязнения атмосферного воздуха авторы использовали величину пылевой нагрузки в прошлый отопительный период 1997 г.

Следует отметить, что в «догазовый период» (до 2008 г.) пылевая нагрузка, создаваемая угольными котельными на территории агломерации, варьировалась в больших пределах – от менее

100 кг/км²сут на окраинах города и в пригородных селах до более 850 кг/км²сут в центральной и юго-восточной частях г. Горно-Алтайска.

Охарактеризованные по величине суммарного показателя загрязнения – СПЗ [27], области повышенного содержания типоморфной ассоциации «угольных» МЭ в лишайнике *Caloplaca sp.* пространственно совпадают с очагами повышенной и высокой пылевой нагрузки (рис. 5), что указывает на котельные как основной источник поступления МЭ в атмосферный воздух, а из него в лишайники на шифере.

Особенностью выделенных областей повышенного содержания МЭ в лишайнике *Caloplaca sp.* является их расплывчатый слабоконтрастный характер и отсутствие экстремальных концентраций элементов, что свидетельствует о способности лишайников «дозировано» поглощать МЭ, содержащиеся в аэрозолях и гидрозолях.

Полученные данные совместно с материалами ранее проведенных снегомерных работ позволили сопоставить пространственное распределение основных микроэлементов (Zn, Cr, As, Se и др.) и их СПЗ в лишайнике *Caloplaca sp.* с уровнем пылевой нагрузки и в конечном итоге со степенью загрязнения снежного и почвенного покрова на территории агломерации г. Горно-Алтайска (табл. 4). С учетом тесной связи этих показателей уровня антропогенного загрязнения компонентов окружающей среды возможно построение номограмм для индикации и предварительной оценки экологического состояния локальных участков в пределах изученной площади.

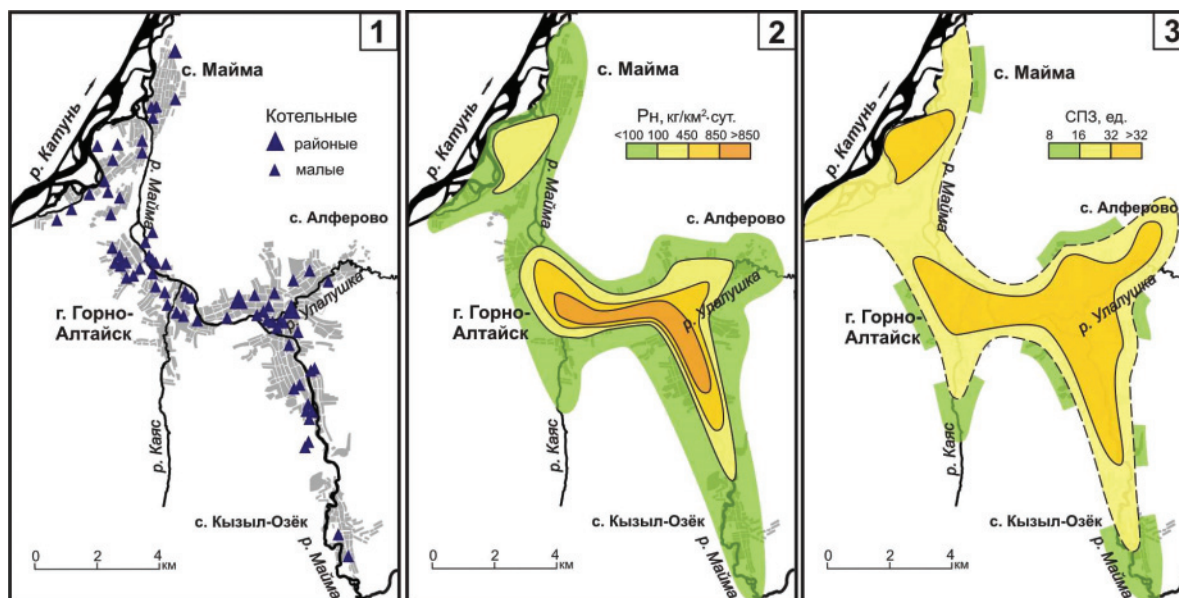


Рис. 5. Схема угольных котельных (1) и пылевая нагрузка (2) на территории агломерации в 1997 г., распределение СПЗ для МЭ в лишайнике *Caloplaca sp.* (3)

Fig. 5. Scheme of coal-fired boilers (1) and dust load (2) in the agglomeration area in 1997, distribution of the total pollution index for microelements in the lichen *Caloplaca sp.* (3)

Таблица 4. Уровни пылевой нагрузки, содержания МЭ и СПЗ лишайника *Caloplaca sp.* на территории агломерации г. Горно-Алтайска

Table 4. Levels of dust loading, content of microelements and total pollution index of the lichen *Caloplaca sp.* in the agglomeration area of Gorno-Altaysk

Степень загрязнения Pollution level	Пылевая нагрузка, кг/км ² ·сут Dust load, kg/ km ² day	СПЗ, ед. TPI, units	Среднее содержание микроэлементов, мг/кг Average content of microelements, mg / kg					
			Fe	Zn	Cr	Co	As	Ce
Низкая/Low	<100	<30	<1,4	<120	<50	<7	<6	<20
Повышенная/Elevated	100–250	30–40	1,4–1,7	120–170	50–70	7–9	6–8	20–25
Средняя/Medium	250–450	40–50	1,7–2,0	170–250	70–90	9–11	8–10	25–30
Высокая/High	>450	>50	>2,0	>250	>90	>11	>10	>30

Заключение

На основании вышеизложенных данных можно сделать следующие выводы:

1. Элементный состав доминирующего на шифере эпилитного лишайника *Caloplaca sp.* (накипная) в пределах агломерации г. Горно-Алтайска представлен в основном ассоциацией типоморфных микроэлементов (As, Sb, Cr, Zn, Ba, Br, Co, Fe, U, РЗЭ), содержащихся в выбросах котельных, работающих на кузнецком угле.
2. Для этой ассоциации «угольных» МЭ в лишайнике *Caloplaca sp.* характерны ясно выраженные обратные связи с их концентрациями в шифере, свидетельствующие о преобладающем поступлении МЭ в лишайник из атмосферного воздуха.

3. Области повышенных концентраций этой ассоциации МЭ в лишайнике *Caloplaca sp.* пространственно совпадают с прошлыми очагами высокой пылевой нагрузки на территории агломерации г. Горно-Алтайска. Максимальное содержание МЭ в лишайнике проявлено на территории г. Горно-Алтайска и частично на смежной подветренной части с. Алферово.
4. Элементный состав лишайника *Caloplaca sp.* и, вероятно, других эпилитных лишайников на шифере служит надежным биоиндикатором специфики и интенсивности прошлой и частично текущей антропогенной деятельности [28] и может использоваться в качестве дополнительного метода при мониторинге состояния приземной атмосферы населенных пунктов агломерации г. Горно-Алтайска.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ситникова В.А. Обзор антропогенного загрязнения природных сред на территории агломерации г. Горно-Алтайска // Природные ресурсы Горного Алтая. – 2014. – № 1–2. – С. 73–77.
2. Робертус Ю.В. К вопросу формирования антропогенных отрицательных геохимических аномалий // Биогеохимия техногенеза и современные проблемы геохимической экологии: Матер. IX Межд. биогеохимической школы. – Барнаул: 2015. – Т. I. – С. 197–200.
3. Use of geochemical signatures, including rare earth elements, in mosses and lichens to assess spatial integration and the influence of forest environment / L. Gandois, Y. Agnan, S. Leblond, N. Sejalon-Delmas, G. Le Roux, A. Probst // Atmospheric Environment. – 2014. – V. 95. – P. 96–104.
4. Василевич М.И., Василевич Р.С. Особенности накопления тяжелых металлов эпифитными лишайниками в таежной зоне фоновых территорий европейского северо-востока России // Экология. – 2018. – № 1. – С. 17–23.
5. Bargagli R. Moss and lichen biomonitoring of atmospheric mercury: a review // Science of the Total Environment. – 2016. – V. 572. – P. 216–231.
6. Малышева Н.В. Лишайники городов европейской России: автореф. дис. ... д-ра наук. – СПб., 2005. – 38 с.
7. Nash Т.Н. Lichen biology. – Cambridge: Cambridge University Press, 1996. – 303 p.
8. Rossbach M., Lambrecht S. Lichens as Biomonitors: Global, Regional and Local Aspects // Croatica Chemica Acta. – 2006. – V. 79 (1). – P. 119–124.
9. Markert B., Wünschmann S., Baltrėnaitė E. Innovative observation of the environment. Bioindicators and biomonitors: definitions, strategies and applications // Journal of Environmental Engineering and Landscape Management. – 2012. – V. 20 (3). – P. 221–239.
10. Conti M.E., Cecchetti G. Biological monitoring: lichens as bioindicators of air pollution assessment – a review // Environmental Pollution. – 2001. – V. 114 (3). – P. 471–492.
11. Кузнецова В.Ф. Эпифитные лишайники как индикаторы загрязнения атмосферного воздуха газообразными поллютантами, тяжелыми металлами и радионуклидами: автореф. дис. ... канд. наук. – Нижний Новгород, 2004. – 24 с.
12. Richardson D.H.S. Understanding the pollution sensitivity of lichens // Botanical Journal of the Linnean Society. – 1988. – V. 96. – P. 31–43.
13. Большунова Т.С., Рихванов Л.П., Барановская Н.В. Элементный состав лишайников как индикатор загрязнения атмосферы // Экология и промышленность России. – 2014. – № 11. – С. 26–31.
14. Сафранкова Е.А. Комплексная лишайниковая индикация общего состояния атмосферы урбоэкосистем: дис. ... канд. наук. – Брянск, 2014. – 204 с.
15. Lichen biomonitoring near Karabash Smelter Town, Ural Mountains, Russia, one of the most polluted areas in the world / O.W. Purvis, P.J. Chimonides, G.C. Jones, I.N. Mikhailova, B. Spiro, D.J. Weiss, B.J. Williamson // Proc. R. Soc. Lond. B. – 2004. – V. 27. – P. 221–226. URL: <http://rspb.royalsocietypublishing.org> (дата обращения 25.10.2017).
16. Lichen monitoring as a potential tool in environmental forensics: case study of the Cu smelter and former mining town of Karabash, Russia / O.W. Purvis, B.J. Williamson, B. Spiro, V. Udachin, I.N. Mikhailova, A. Dolgoplova // Environmental and Criminal Geoforensics. – London: Geological Society, London, 2013. – Special Publications. – V. 384. – P. 133–136.
17. Mezhibor A.M., Bolshunova T.S., Rikhvanov L.P. Geochemical features of sphagnum mosses and epiphytic lichens in oil and gas exploitation areas (the case of Western Siberia, Russia). Environmental Earth Sciences: Scientific Journal. – 2016. – V. 17. – Iss. 165. – P. 1260. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-016-6062-y> (дата обращения 11.11.2017).
18. Dispersal patterns of meiospores shape population spatial structure of saxicolous lichens / M. Morando, E. Favero-Longo, E. Matteucci, S. Sandrone, L. Appolonia, M. Carrier, J. Nascimbene, R. Piervittori // The Lichenologist. – 2017. – V. 49. – № 4. – P. 397–413.
19. Contribution to the knowledge of genus Caloplaca in central European Russia / E. Muchnik, R. Wilk, J. Vondrak, I. Frolov // Polish Botanical Journal. – 2014. – V. 59. – № 2. – P. 263–270.
20. Бязров Л.Г., Пельгунова Л.А. Микрорентгенофлуоресцентная спектроскопия содержания химических элементов на поверхностях вегетативных частей и плодовых органов лишайникованных грибов семейства Teloschistaceae // Журнал прикладной спектроскопии. – 2015. – Т. 82. – № 6. – С. 923–927.
21. Закутнова В.И. Экобиоморфологический анализ лишайниковых дельты Волги: Таксономический состав, география, мониторинг городов и заповедных мест: дис. ... д-ра наук. – Астрахань, 2004. – 358 с.
22. Accumulation of inorganic contaminants / R. Bargagli, I. Mikhailova, P.L. Nimis, C. Scheidegger, P.A. Wolseley // Monitoring with Lichens. – Kluwer: Academic Publishers, 2002. – P. 65–84.
23. Состояние воздушного бассейна в районе г. Горно-Алтайска / Ю.В. Робертус, Р.В. Любимов, А.В. Кивацкая, Г.А. Шевченко // Проблемы и перспективы социально-экономического развития города: Матер. науч.-практ. конф. – Горно-Алтайск, 2013. – С. 112–115.
24. Бязров Л.Г. Лишайники в экологическом мониторинге. – М.: Научный мир, 2002. – 336 с.
25. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов: справочник: в 6 кн. Кн. 1. – М.: Недра, 1994. – 304 с.
26. Редкие элементы в углях Кузнецкого бассейна / С.И. Арбузов, В.В. Ершов, А.А. Поцелуев, Л.П. Рихванов. – Кемерово: Кемеровский полиграфкомбинат, 2000. – 248 с.
27. Сагт Ю.Е., Башаркевич И.Л., Ревич Б.А. Методические рекомендации по геохимической оценке источников загрязнения окружающей среды. – М.: ИМГРЭ, 1982. – 102 с.
28. Bargagli R. Trace Elements in Terrestrial Plants: an Ecophysiological Approach to Biomonitoring and Biorecovery. – Berlin: Springer, 1998. – 324 p.

Поступила 15.11.2017 г.

Информация об авторах

Робертус Ю.В., кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Горно-Алтайского филиала Института водных и экологических проблем СО РАН.

Рихванов Л.П., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Томского политехнического университета.

Ситникова В.А., аспирант Горно-Алтайского госуниверситета.

Савенко К.С., кандидат географических наук, старший научный сотрудник Алтайского регионального института экологии.

Большунова Т.С., кандидат геолого-минералогических наук, инженер-исследователь кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Томского политехнического университета.

UDC 581.571.151–25

ELEMENTAL COMPOSITION OF LICHEN ON ROOFING SLATE AS BIOINDICATOR OF AIR POLLUTION IN GORNO-ALTAYSK

Yury V. Robertus¹,
ariocol@mail.gorny.ru

Leonid P. Rikhvanov²,
rikhvanov@tpu.ru

Valentina A. Sitnikova³,
valya_90_well@mail.ru

Kseniya S. Savenko⁴,
ariocol@mail.gorny.ru

Tatiana S. Bolshunova²,
BolshunovaTS@gmail.com

¹ Institute of water and environmental problems SB RAS,
1, Molodezhnaya street, Barnaul, 656038, Russia.

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

³ Gorno-Altaysk State University,
1, Lenkina street, Gorno-Altaysk, 649000, Russia.

⁴ Altai Regional Institute of Ecology,
54, Zavodskaya street, Mayma, 649100, Russia.

Relevance of the work is caused by the need to assess and monitor the ecological condition of atmospheric air in Gorno-Altaysk as the most urbanized area of the Altai Republic.

The main aim of the study is the research of chemical composition and characteristics of distribution of elements in the lichen *Caloplaca* sp. (scale) on the slate as a bioindicator of the specificity and intensity of anthropogenic activities in Gorno-Altaysk.

The methods: lichen *Caloplaca* sp. (scale) and conjugate slate sampling from the roof of buildings, determination of content of 28 chemical elements using instrumental neutron activation analysis, processing and interpretation of the data obtained by the methods of applied statistics.

The results. The authors have obtained the data on the levels of contents of chemical elements in the lichen *Caloplaca* sp. (scale) on the slate near Gorno-Altaysk and compared them with local background and Clarke in the biosphere. Close relationship between the elements of As, Sb, Cr, Zn, Ba, Br, Co, Fe, U association, rare earth elements in lichen, as well as their level of concentration and content in coals of the Kuznetsk basin was determined. The paper introduces the argument in favor of admission of these elements in the lichen *Caloplaca* sp. from atmospheric air. The authors revealed the scope of their elevated concentrations in lichen, spatially coincident with areas of high dust load within the Metropolitan area. The conclusion is made about the possibility of using the elemental composition of the epilithic lichen *Caloplaca* sp. on the slate for bioindication of specificity and intensity of anthropogenic activities, as well as an additional indicator for monitoring the condition of surface atmosphere of the settlements within Gorno-Altaysk area.

Key words:

Gorno-Altaysk, air, lichen on slate, elemental composition, peculiarities of distribution, pollution, bioindicator.

REFERENCES

1. Sitnikova V.A. An overview of anthropogenic contamination of the natural environments within the Metropolitan area the city of Gorno-Altaysk. *Natural resources of Gornyy Altai*, 2014, no. 1–2, pp. 73–77. In Rus.
2. Robertus Yu.V. K voprosu formirovaniya antropogennykh otritsatelnykh geokhimicheskikh anomalii [About formation of negative anthropogenic geochemical anomalies]. *Biogeokhimiya tekhnogeneza i sovremennye problemy geokhimicheskoy ekologii. Materialy IX Mezhdunarodnoy biogeokhimicheskoy shkoly* [Biogeochemistry of technogenic and contemporary problems of geochemical ecology: Materials IX Int. Biogeochemical School]. Barnaul, 2015. Vol. I, pp. 197–200.
3. Gandois L., Agnan Y., Leblond S., Sejalon-Delmas N., Le Roux G., Probst A. Use of geochemical signatures, including rare earth elements, in mosses and lichens to assess spatial integration and the influence of forest environment. *Atmospheric Environment*, 2014, vol. 95, pp. 96–104.
4. Vasilevich M.I., Vasilevich R.S. The features of accumulation of heavy metals in epiphytic lichens in a taiga zone of background territories of the European northeast of Russia. *Ehkologiya*, 2018, no. 1, pp. 17–23. In Rus.
5. Bargagli R. Moss and lichen biomonitoring of atmospheric mercury: a review. *Science of the Total Environment*, 2016, vol. 572, pp. 216–231.
6. Malysheva N.V. *Lishayniki gorodov evropeyskoy Rossii*. Avtoreferat Kand. Diss. [Lichens of the cities of European Russia. Cand. Diss. Abstract]. St-Petersburg, 2005. 38 p.

7. Nash T.H. *Lichen biology*. Cambridge, Cambridge University Press, 1996. 303 p.
8. Roszbach M., Lambrecht S. Lichens as Biomonitors: Global, Regional and Local Aspects. *Croatica Chemica Acta.*, 2006, vol. 79 (1), pp. 119–124.
9. Markert B., Wünschmann S., Baltrėnaitė E. Innovative observation of the environment. Bioindicators and biomonitors: definitions, strategies and applications. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 2012, vol. 20 (3), pp. 221–239.
10. Conti M.E., Cecchetti G. Biological monitoring: lichens as bioindicators of air pollution assessment – a review. *Environmental Pollution*, 2001, vol. 114 (3), pp. 471–492.
11. Kuznetsova V.F. *Epifitnye lishayniki kak indikatorы zagryazneniya atmosfernogo vozdukhа gazoobraznyimi pollyutantami, tyazhelymi metallami i radionuklidami*. Avtoreferat Kand. Diss. [Epiphytic lichens as indicators of air pollution with gaseous pollutants, heavy metals and radionuclides. Cand. Diss. Abstract]. Nizhny Novgorod, 2004. 24 p.
12. Richardson D.H.S. Understanding the pollution sensitivity of lichens. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 1988, vol. 96, pp. 31–43.
13. Bolshunova T.S., Rikhvanov L.P., Baranovskaya N.V. Elemental composition of lichens as indicator of atmospheric pollution. *Ecology and industry of Russia*, 2014, no. 11, pp. 26–31. In Rus.
14. Safrankova E.A. *Kompleksnaya likhenoidikatsiya obshchego sotoyanija atmosfery urboekosistem*. Diss. Kand. nauk [Complex lichen-indications of the general condition of the atmosphere of urban ecosystems. Cand. Diss.]. Bryansk, 2014. 204 p.
15. Purvis O.W., Chimonides P.J., Jones G.C., Mikhailova I.N., Spiro B., Weiss D.J., Williamson B.J. Lichen biomonitoring near Karabash Smelter Town, Ural Mountains, Russia, one of the most polluted areas in the world. *Proc. R. Soc. Lond. B.*, 2004, vol. 27, pp. 221–226. Available at: <http://rspb.royalsocietypublishing.org> (accessed 25 October 2017).
16. Purvis O.W., Williamson B.J., Spiro B., Udachin V., Mikhailova I.N., Dolgoplova A. Lichen monitoring as a potential tool in environmental forensics: case study of the Cu smelter and former mining town of Karabash, Russia. *Environmental and Criminal Geoforensics*. London, Geological Society, London, Special Publications, 2013. Vol. 384, pp. 133–136.
17. Mezhibor A.M., Bolshunova T.S., Rikhvanov L.P. Geochemical features of sphagnum mosses and epiphytic lichens in oil and gas exploitation areas (the case of Western Siberia, Russia). *Environmental Earth Sciences: Scientific Journal*, 2016, vol. 17, Iss. 165, pp. 1260. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-016-6062-y> (accessed 11 November 2017).
18. Morando M., Favero-Longo E., Matteucci E., Sandrone S., Apponia L., Carrier M., Nascimbene J., Piervittori R. Dispersal patterns of meiospores shape population spatial structure of saxicolous lichens. *The Lichenologist*, 2017, vol. 49, no. 4, pp. 397–413.
19. Muchnik E., Wilk R., Vondrak J., Frolov I. Contribution to the knowledge of genus *Caloplaca* in central European Russia. *Polish Botanical Journal*, 2014, vol. 59, no. 2, pp. 263–270.
20. Biazrov L.G., Pelgunova L.A. Micro-x-ray fluorescence spectrometry of the chemical elements composition on surfaces of vegetative parts and fruit bodies of lichenized fungi family Teloschistaceae. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2015, vol. 82, no. 6, pp. 923–927. In Rus.
21. Zakutnova V.I. *Ekobiomorfologicheskyy analiz likhenoflory delty Volgi: Taksonomicheskyy sostav, geografiya, monitoring gorodov i zapovednykh mest*. Diss. Kand. nauk [Ecobiomorphological analysis of the lichen flora of the Volga Delta: taxonomic composition, geography, the monitoring of cities and protected areas. Cand. Diss.]. Astrakhan, 2004. 358 p.
22. Bargagli R., Mikhailova I., Nimis P.L., Scheidegger C., Wolsley P.A. Accumulation of inorganic contaminants. *Monitoring with Lichens*. Kluwer, Academic Publishers, 2002. pp. 65–84.
23. Robertus Yu.V., Lyubimov R.V., Kivatskaya A.V., Shevchenko G.A. Sostoyanie vozdušnogo basseyna v rayone g. Gorno-Altayska [The state of air basin in the city of Gorno-Altaysk]. *Problemy i perspektivy sotsialno-ekonomicheskogo razvitiya goroda: materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Problems and prospects of socio-economic development of the city. Proc. of scientific-practical conference]. Gorno-Altaysk, 2013. pp. 112–115.
24. Biazrov L.G. *Lishayniki v ekologicheskoy monitoringe* [Lichens in environmental monitoring]. Moscow, Nauchny mir Publ., 2002. 336 p.
25. Ivanov V.V. *Ekologicheskaya geokhimiya elementov: spravochnik* [Environmental Geochemistry of elements: handbook]. Moscow, Nedra Publ., 1994. 304 p.
26. Arbutov S.I., Ershov V.V., Potseluev A.A., Rikhvanov L.P. *Redkie elementy v uglyakh Kuznetskogo basseyna* [Rare elements in coals of the Kuznetsk basin]. Kemerovo, Kemerovskiy poligrafkombinat, 2000. 248 p.
27. Saet Yu.E., Basharkevich I.L., Revich B.A. *Metodicheskie rekomendatsii po geokhimicheskoy otsenke istochnikov zagryazneniya okruzhayushchey sredy* [Methodic recommendations for geochemical assessment of pollution sources of the environment]. Moscow, IMGRE Publ., 1982. 102 p.
28. Bargagli R. *Trace Elements in Terrestrial Plants: an Ecophysiological Approach to Biomonitoring and Biorecovery*. Berlin, Springer, 1998. 324 p.

Received: 15 November 2017.

Information about the authors

Yuriy V. Robertus, Cand. Sc., leading researcher, Gorno-Altai branch of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS.

Leonid P. Rikhvanov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Valentina A. Sitnikova, postgraduate student, Gorno-Altai State University.

Ksenia S. Savenko, Cand. Sc., senior researcher, Altai Regional Institute of Ecology.

Tatiana S. Bolshunova, Cand. Sc., researcher, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 556.343

ВОДОПРИТОКИ В ПОДЗЕМНЫЕ ГОРНЫЕ ВЫРАБОТКИ ПОД ВЛИЯНИЕМ ВНЕШНИХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ ШАХТЫ АЛЕКСИЕВСКАЯ)

Пургина Дарья Валерьевна¹,
purgina_darya@mail.ru

Кузеванов Константин Иванович¹,
kki@tpu.ru

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

Актуальность темы исследования. Безопасность и эффективность освоения угольных месторождений часто зависит от естественных гидрогеологических условий и их изменения под влиянием разработки месторождений различными способами. Особенно значительные и внезапные осложнения могут возникнуть при высокой обводненности горных пород, изменении их фильтрационных свойств под влиянием горных работ и питания водоносных комплексов. Многочисленные и разнонаправленные условия обводнения угольных месторождений определяют необходимость выявления и анализа ведущих факторов формирования водоприитоков в подземные горные выработки.

Целью исследования является описание процесса формирования водоприитоков при отработке угольных пластов подземным (шахтным) способом на примере угольной шахты Алексиевская; изучение гидрогеологических условий угольных месторождений, выявление закономерностей формирования водоприитоков в подземные горные выработки.

Методика: комплексные методы, включающие анализ и актуализацию фондовой литературы по объекту исследования, обработка данных велась с применением современных компьютерных технологий. С целью выявления закономерностей, влияющих на формирование водоприитока, использовались геолого-статистические методы обработки данных. В качестве исходных данных по водоприитокам и фильтрационным свойствам горных пород использовались материалы, предоставленные УК «Заречная» ООО «Георесурс», а также данные по водоприитокам на шахтах «7 Ноября», «Алексиевская», «им. Рубана», карьер «Суворовский». Для анализа влияния метеорологических изменений на водоприитоки материалом послужили специализированные электронные базы данных как среднемесячных, так и срочных наблюдений за температурой воздуха и количеством атмосферных осадков. Информационный массив обработан по метеостанции с. Кедровка (Кемерово) за период с 1955 по 2015 гг. Он получен из Всероссийского Научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мировой Центр Данных (ВНИИГМИ-МЦД), литературных источников и фондовых материалов. Обработка метеорологических характеристик, для выявления их закономерностей, основана на использовании статистических методов обработки данных. Визуализация результатов выполнена с использованием программных комплексов Microsoft Word, Excel, AutoCad.

Результаты. Выявлены факторы, оказывающие наибольшее влияние на формирование водоприитока в горные выработки, проведен анализ изменения климатических характеристик статистическими методами о случайности и наличии тренда с помощью критерия Питмена и критерия инверсий соответственно. По результатам исследования построена концептуальная модель формирования водоприитоков в горные выработки.

Ключевые слова:

Подземные воды, добыча, инфильтрационное питание, водоприиток, статистическая обработка временных рядов (критерий Питмана), шахта, Кузбасский адартезианский бассейн, лава, штрек.

Введение

Месторождения каменного угля являются одним из важнейших природных ресурсов России. Мировые цены на это полезное ископаемое динамично меняются. Так, на конец 2016 г., из-за ограничений на добычу в Китае и недостаточного предложения на мировом рынке, металлургический уголь подорожал в четыре раза, энергетический – вдвое, рост цен на уголь привел к подъему угольной отрасли [1]. Вместе с тем разработка месторождений этого сырья из-за сложности горно-геологических условий связана с высокими рисками. Например, за два последних года (2015, 2016) количество смертельно травмированных людей при добыче угля в России выросло вдвое, при этом число аварий осталось неизменным. Основываясь на статистических данных, представленных Ростехнадзором и опубликованных в «Российской газете», в 2015 г. как минимум один шахтер погибал при до-

быче 18,6 млн т угля, а в 2016 г. показатель ухудшился – один погибший на 6,88 млн т (рис. 1) [2].

Сохраняются актуальными задачи по обеспечению безопасного и эффективного освоения угольных месторождений. В свою очередь, безопасность и эффективность освоения угольных месторождений напрямую зависит от принятых мер по предотвращению катастрофических последствий при изменении естественных геологических и гидрогеологических условий под влиянием разработки месторождений различными способами [3, 4].

Для Кузбасса сложность отработки угольных месторождений часто связана с высокой степенью обводненности шахтных и карьерных полей, преимущественно в верхних частях геологического разреза в границах распространения водоносных горизонтов гидродинамической зоны активного водообмена. В этих условиях потенциальные водоприитоки в горные выработки контролируются че-

Источник: Ростехнадзор, ЦДУ ТЭК



Рис. 1. Динамика объемов добычи угля, смертельного травматизма и аварийности на шахтах [2]

Fig. 1. Dynamics of coal production, fatal injuries and accidents in mines [2]

тырьмя основными факторами: геологическим строением, включающим геоморфологические особенности местности; проницаемостью горных пород, климатическими условиями территории и техногенным воздействием на окружающую среду в процессе добычи полезного ископаемого [5, 6]. В последние десятилетия, в связи с частой реструктуризацией угольных предприятий, при открытии новых и затоплении (закрытии, консервации) старых угледобывающих предприятий наиболее ярко проявляется четвертый фактор формирования водоприитоков в подземные горные выработки – техногенный (антропогенный) [6]. Техногенный фактор формирования водоприитоков напрямую зависит от степени воздействия человека на гидрогеологические условия. Затопление подземных горных выработок, перенос русел рек, водоотлив из шахт и разрезов: все это деформирует природный и формирует новый нарушенный режим подземных вод. Таким образом, на формирование водоприитоков в горные выработки влияют не только природные факторы, но и сам процесс разработки месторождений. При суммарном воздействии естественных и искусственных факторов формируются внешние и внутренние граничные условия месторождений, под влиянием которых и формируется обводненность месторождений, изменяющаяся на различных этапах их отработки [8–10].

Объект, материалы и методы исследования

В качестве объекта для изучения формирования водоприитоков в подземные горные выработки авторами выбрана шахта «Алексиевская» Егзово-Красноярского угольного месторождения. Административно исследуемая площадь входит в Ленинск-Кузнецкий район Кемеровской области. Она расположена в 12 км юго-восточнее города Ленинск-Кузнецкий и в 30 км северо-восточнее города Белово. Ближайшими к участку населенными пунктами являются сельские поселения Мохово и село Грамотеино (рис. 2).

Район имеет развитую горнодобывающую инфраструктуру: Шахта «Алексиевская» на северо-западе, востоке и юге имеет общую границу с тремя участками «Моховского» угольного разреза. Нижняя граница горного отвода является общей с шахтами «Байкаимская» и «Полысаевская», на севере изучаемый участок граничит с полем шахты «Рубана».

В геоморфологическом отношении участок расположен в границах водосборного бассейна реки Иня. Рельеф поверхности образован эрозионной деятельностью её правых притоков – рек Еловка, Мереть и речки Сычевка – с более мелкими притоками. Долина реки Мереть резко ассиметрична: правый склон пологий, левый склон крутой, участками обрывистый, изрезан большим количеством логов, характеризующихся небольшой протяженностью. Русло реки извилистое, шириной до 10 м, расход реки изменяется от 0,0062 до 0,29 м³/с и в существенной степени зависит от количества атмосферных осадков [11–13]. В период весеннего таяния снега расход увеличивается в несколько раз. Речка Еловка с начала работы «Моховского» разреза в её первозданном виде уже не существует. В двух километрах от устья она перекрыта дамбой, выше которой образован отстойник гидроотвала угольного разреза «Моховский», занимающий большую площадь. Ниже дамбы в речку сбрасывается вода, откачиваемая из забоев угольного разреза. Долина реки сильно заболочена (рис. 2).

Естественная поверхность рельефа до начала отработки угля представляла собой холмистую равнину, постепенно и плавно понижающуюся с юга на север в сторону реки и представляющую водораздельное пространство между реками Мереть и Еловка. В настоящее время рельеф нарушен ведением открытых горных работ на разрезе «Моховский», одна часть разреза засыпана отработанной породой, а другая рекультивирована. Отработан-

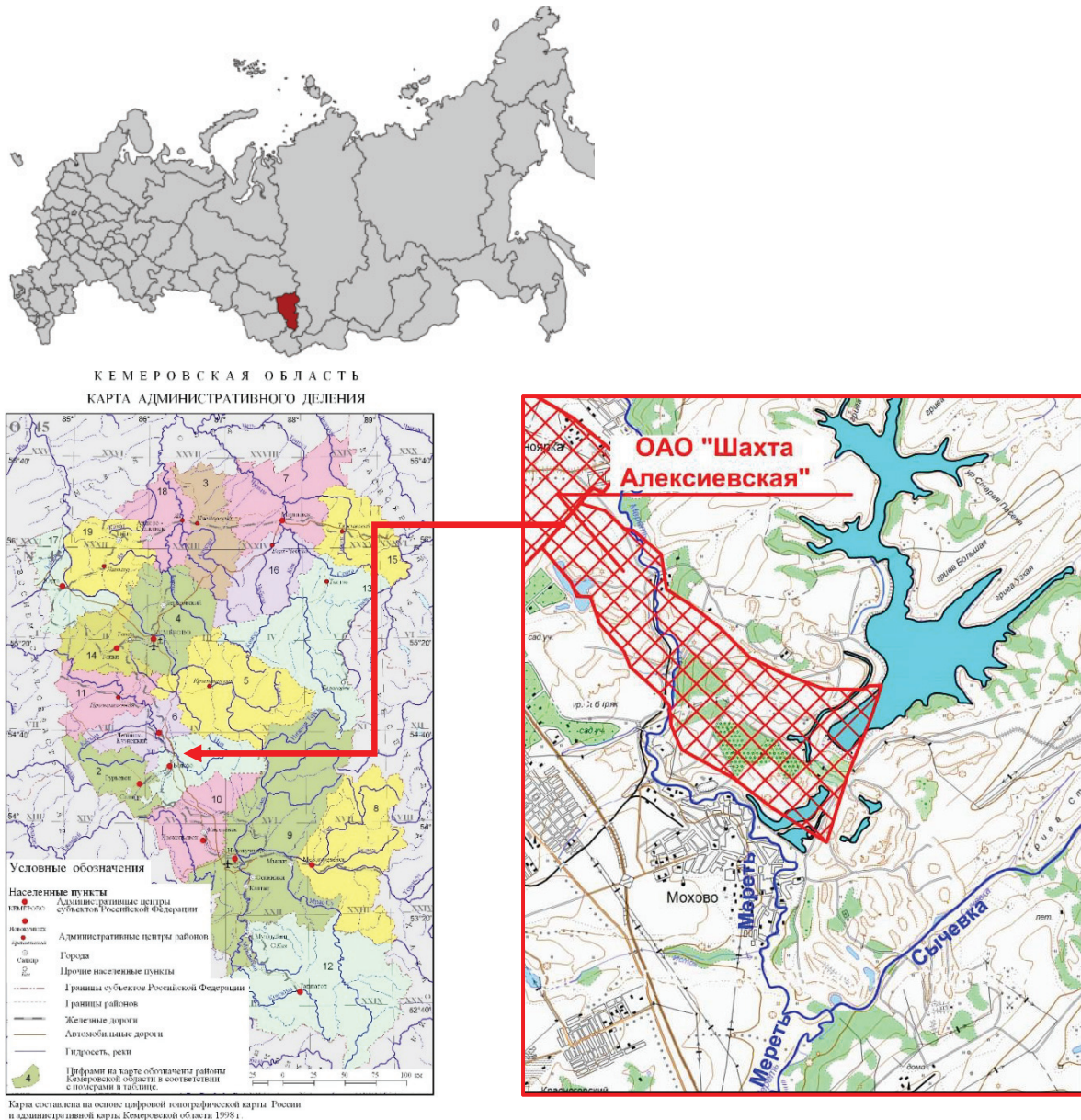


Рис. 2. Схема расположения объекта исследования

Fig. 2. Diagram of the research object location

ные площади разреза на поверхности представля-
 ют рывины, траншеи, каналы (рис. 3).

Абсолютные отметки ненарушенной поверхно-
 сти рельефа изменяются от 200 до 308 м (абс.). За-
 лесённость территории слабая. Климат резко кон-
 тинентальный, район относится к зоне умеренного
 увлажнения, среднегодовая сумма осадков при-
 ближается к 500 мм, максимальное количество осад-
 ков выпадает в летнее время (до 60 %) [15].

Геологическое строение

В геологическом строении Егозово-Краснояр-
 ского месторождения Ленинского района принима-
 ют участие осадочные отложения палеозойского
 и четвертичного возраста. Кольчугинская серия, в
 соответствии со стратиграфической схемой ФГУ

ВСЕГЕИ, утвержденной МПР ВФ Роснедра в
 2009 г., включает осадочные образования верхне-
 среднепермского возраста и подразделяется на две
 продуктивные подсерии: ильинскую и ерунаков-
 скую (рис. 4). Ерунаковская подсерия ($P_{2-3\text{ ер}}$) на ме-
 сторождении распространена повсеместно. Отло-
 жения ерунаковской подсерии представлены на
 участке образованиями ленинской свиты.

Ленинская свита ($P_{2-3\text{ лн}}$) включает угольную тол-
 щу от почвы пласта Красногорского до кровли пла-
 ста Безымянного. Литологический состав этой тол-
 щы представлен в основном переслаиванием мелко-
 зернистых песчаников и разномерных алевроли-
 тов, реже аргиллитов и пластов угля. В основной
 кровле пласта Красногорского залегает мощный
 слой песчаника мощностью 30–40 м. Пласты угля



Рис. 3. Нарушенная поверхность рельефа над шахтой «Алексиевская» [14]

Fig. 3. Broken relief surface above the Alexievskaya mine [14]

ленинской свиты на месторождении немногочисленные, их всего три: Красногорский, Наддальний и Безымянный. Пласт Безымянный имеет сложное строение, характеризуется как выдержанный по мощности и строению, Наддальний относится к угольным пластам нерабочей мощности, Красногорский же характеризуется весьма сложным строением.

Ильинская подсерия ($P_{2-3\text{ил}}$) на месторождении представлена отложениями казанково-маркинской и ускатской свит, в пределах участка отмечается ускатская свита. Ускатская свита ($P_{2\text{ус}}$) достаточно широко изучена на Ленинском, Уропском, Егозово-Красноярском и других месторождениях района. В разрезе Егозово-Красноярского месторождения она соответствует интервалу от почвы пласта Серебряниковского до почвы пласта Красногорского. Средняя мощность свиты в районе составляет 864 м. Литологический состав этой толщи представлен в основном алевролитами (46,3 %) и песчаниками (42,4 %), реже аргиллитами (4,6 %), рабочая угленосность составляет 6,1 %. В границах исследуемого участка угленосная толща представлена пластами Тонким, Несложным, Красноорловским. В кровле пласта Красноорловского прослеживается слой песчаника мелкозернистого, мощностью 20–30 м, сами пласты имеют простое строение и характеризуется выдержанным строением и мощностью. Отложения палеозоя перекрыты сплошным чехлом неоген-четвертичных отложений, исключая отдельные участки склонов и днищ речных долин. Представлены чаще суглинками, глинами, реже аллювиальными глинистыми песками. Мощность покрова меняется от 1 до 10 м на левом кру-

том склоне реки Мереть, до 50–60 м в правобережной части долины реки Мереть. Пойменные отложения террас распространены в долинах рек. Русловая фация сложена разнозернистыми заиленными песками с включением окатанной гальки. Мощность песчано-галечникового горизонта изменяется от 1–2 до 5–6 м. Пойменная фация сложена супесями, суглинками и глинами. Аллювиально-делювиальные отложения распространены в долинах небольших речек. Породы представлены серыми, голубоватыми суглинками, супесями, глинистыми песками.

По тектоническому районированию Кузбасса Егозово-Красноярское месторождение находится в Присалаирской зоне линейной складчатости, отличающейся блоковым строением. Месторождение приурочено к Ленинской подзоне, где преобладают брахисинклинальные складки. Егозово-Красноярская синклиналь имеет широкое дно и пологие крылья с углами падения пород 5–10°. Ось складки простирается с северо-запада на юго-восток, слабо погружаясь к северу. Вблизи от оси Красноярской синклинали пласты угля разрываются крупно-амплитудным нарушением II-II, которое представляет собой продольный согласный взброс, простирающийся с северо-запада на юго-восток под азимутом 130–140° (рис. 4). Нарушение имеет амплитуду смещения 40–50 м и сопровождается, как правило, зоной интенсивного дробления пород мощностью от 10 до 40 м. Залегание пластов моноклинальное. В пределах шахтного поля горными работами зафиксированы мелко-амплитудные нарушения типа «взброс» с амплитудами 0,3–2,5 м.

Гидрогеологические условия месторождения

Гидрогеологические условия в пределах участка «Благодатного» (рис. 5) изучались на всех стадиях разведки в комплексе с геологоразведочными работами на уголь начиная с 1930 г. В процессе бурения разведочных скважин велись элементарные гидрогеологические наблюдения, которые заключались в замерах уровней воды в период проходки и в наблюдениях за потерей промывочной жидкости.

До 1980 г. с целью количественного опробования водоносности пород на участке и прилегающей к нему площади пробурено 29 гидрогеологических скважин (рис. 5), в которых проведены опытные и пробные откачки (табл. 1). Скважинами охвачен весь стратиграфический разрез. Наиболее детально изучена верхняя гидродинамическая зона, и с меньшей детальностью исследована зона замед-

ленного водообмена. Большое внимание было уделено изучению предполагаемых границ области фильтрации, таких как долина реки Мереть и зоны крупных нарушений. С этой целью был пробурен гидрогеологический куст, состоящий из центральной и четырех наблюдательных скважин.

В 2006–2008 гг. на участке были проведены работы по организации мониторинга геологической среды по заявкам руководства «Моховского» разреза и администрации шахты «Алексиевская». С целью организации мониторинга было пробурено 10 наблюдательных скважин. На данный момент за счет продвижения очистного фронта горных работ шахты «Алексиевской» мониторинговые скважины осушены. В 2012–2014 гг. пробурены четыре водозаборные скважины, одна из которых показала низкую обводненность пород за счет большой срезки уровня подземных вод (табл. 1).

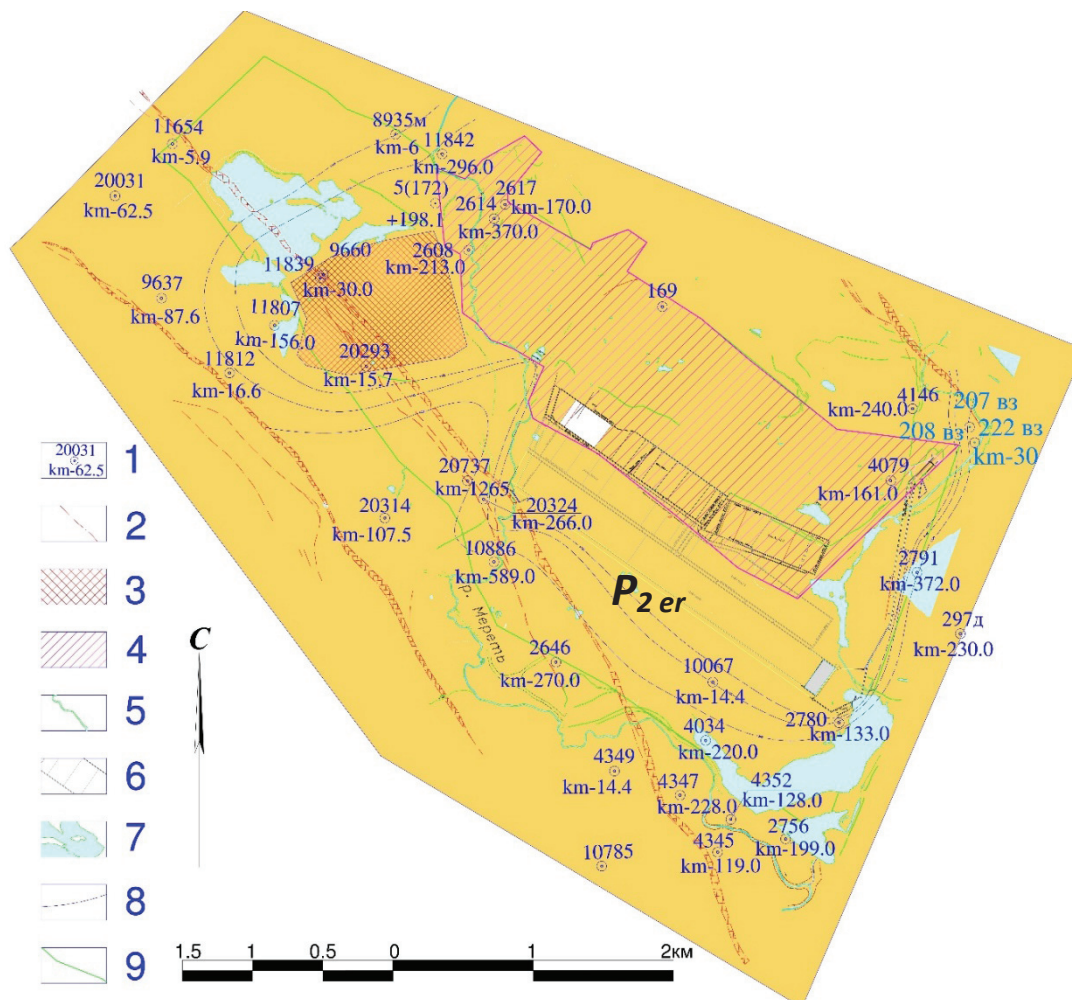


Рис. 5. Схема расположения гидрогеологических скважин: 1 – скважина, ее номер (сверху), коэффициент водопроницаемости (снизу); 2 – разрывные нарушения; 3 – территория отработки угля разрезом «Моховский»; 4 – поле шахты «Алексиевская»; 5 – реки; 6 – лавы; 7 – поверхностные водные объекты; 8 – линии равных напоров

Fig. 5. Map of location of hydrogeological wells: 1 is the well, its number (above), water conductivity coefficient (below); 2 are the disjunctive dislocations; 3 is the coal mining site Mokhovskiy slit; 4 is the Alexeyevskaya mine shaft; 5 are the rivers; 6 is the lava; 7 are the surface water bodies; 8 are the equal pressure lines

Таблица 1. Результаты опытно-фильтрационных работ
Table 1. Results of aquifer test

№ скважины Well	Глубина скважины, м Depth, m	Статический уровень, глубина, м Static level, m	Понижение, м Drawdown, m	Дебит, л/с Discharge, l/s	Удельный дебит, л/с Specific discharge yield, l/s	Коэффициент водопроницаемости, м ² /сут Transmissibility, m ² /day
11654	140	23,0	-	-	-	5,9
20031	155	28,1	-	-	-	62,5
9637	138	24,0	-	-	-	87,6
11842	160	12,0	-	-	2,52	296
9660	180	13,8	6,4	1,79	0,28	30
11839	210	14,5	-	-	1,13	-
11807	116	7,23	-	-	-	156
11812	120	40,0	-	-	-	16,6
2614	164	+2,37	-	-	3,09	370
2617	132	5,3	-	-	-	170
20314	154	15,6	-	-	-	107,5
2608	164	20,0	-	-	-	213
20293	172	42,0	-	-	1,09	15,7
20737	300	6,2	1,85	3,88	2,1	1265
20324	132	16,9	-	-	1,58	266
10886	105	4,7	-	-	-	589
20849*	119	45,1	-	-	0,16	14,4"
2646**	149	21,6	-	-	2,25	270"
4349	145	31,9	-	-	-	14,4
4146**	151	8,26	-	-	2,0	240"
10067*	1	33,5	9,0	1,6	0,18	14,4"
4079**	110	27,0	-	-	1,89	161"
4034	-	26	-	-	1,83	220
4347	-	24,2	-	-	-	228,0
4352	-	31,0	-	-	-	128,0
4345	-	29,7	-	-	-	119,0
2791	78	2,14	-	-	3,08	372
2780*	-	17,6	-	-	-	133"
2756	-	14,40	-	-	1,66	199
297д	100	27,74	15,38	2,0	0,13	230
207вз	120	30,0	-	12,8	-	180*
222 вз	117	28,5	9,75	2,8	0,29	30*
196 вз	150	75,0	33,0	0,23	0,007	-
8934	40,0	32,24	2,76	0,40	0,14	5**
8935	130	64,80	36,0	2	0,06	6**
8932	15,60	-	-	-	-	-

В гидрогеологическом отношении участок относится к центральной части адартезианского бассейна трещинно-пластовых вод Кузбасса. В пределах участка и прилегающей к нему площади, согласно материалам региональных съемочных гидрогеологических работ и геологоразведочных работ, распространен локально обводненный водоносный комплекс четвертичных отложений и водоносный комплекс верхнепермских угленосно-терригенных пород кольчугинской серии (рис. 6).

Водоносный комплекс четвертичных отложений представлен тремя горизонтами. Водоносный горизонт верхнечетвертичных элювиально-делювиальных отложений (ed Q_{III}), который представлен

отложениями красnodубровской свиты (Q_{I-II krd}), верхнечетвертичными-современными субаэральными отложениями еловской свиты (Q_{III-IV el}) и аллювиальными современными пойменными отложениями рек Мереть, Еловка и речки Сычевка. Локально обводненный водоносный горизонт субаэральных верхнечетвертичных-современных отложений (sa Q_{III-IV}) распространен повсеместно, а водовмещающими породами являются лессовидные суглинки на контакте с более плотными разностями или глинами. Водоносный горизонт верхнечетвертичных-современных аллювиальных образований представлен отложениями первой, второй и третьей надпойменными террасами р. Ини (an+3Q_{III-IV}). Водовмещающие толщи представлены гравийно-галечниковыми отложениями, песками с суглинисто-глинистым заполнителем, залегающими преимущественно в основании террас реки Ини.

В приповерхностной части геологического разреза встречаются горизонты верховодки. Образование верховодки обусловлено весенним таянием снегов, летними и осенними затяжными дождями. Линзы верховодки характеризуются низкой водообильностью и ограниченным распространением. Наличие верховодки является отрицательным фактором при строительстве и проходке подготовительных выработок. Даже при незначительном притоке воды насыщенные водой грунты склонны к оплыванию и резко снижают свои несущие свойства.

Вследствие незначительной обводненности четвертичных отложений каких-либо осложнений при проходке горных выработок, обуславливающих притоки в шахту, ожидать не следует (за исключением слабой устойчивости этих грунтов при замачивании, о чем было сказано выше). Поэтому под мелкими речками и логами оставление охраняемых целиков не предусматривается. Однако рыхлые отложения, имеющие довольно большую мощность (до 30–40 м), обладают значительными емкостными запасами подземных вод, влияние которых может определять постоянное питание нижележащих коренных образований за счет перетоков сверху при разработке продуктивных толщ на протяжении длительного времени.

Водоносный комплекс верхнепермских угленосно-терригенных пород отложений кольчугинской серии (P_{2-3kl}). Водоносный комплекс развит на всей площади района. Водовмещающие породы представлены чередованием средне-мелкозернистых песчаников, алевролитов, реже аргиллитов, углистых аргиллитов, каменных углей. Толща характеризуется неравномерной обводненностью, которая зависит от литологического состава горных пород, геоморфологического положения и степени развития эндогенной и экзогенной трещиноватости. Наиболее обводнены отложения в верхней трещиноватой зоне, развитой до глубины 120 м, где выделяется от двух до пяти водоносных зон.

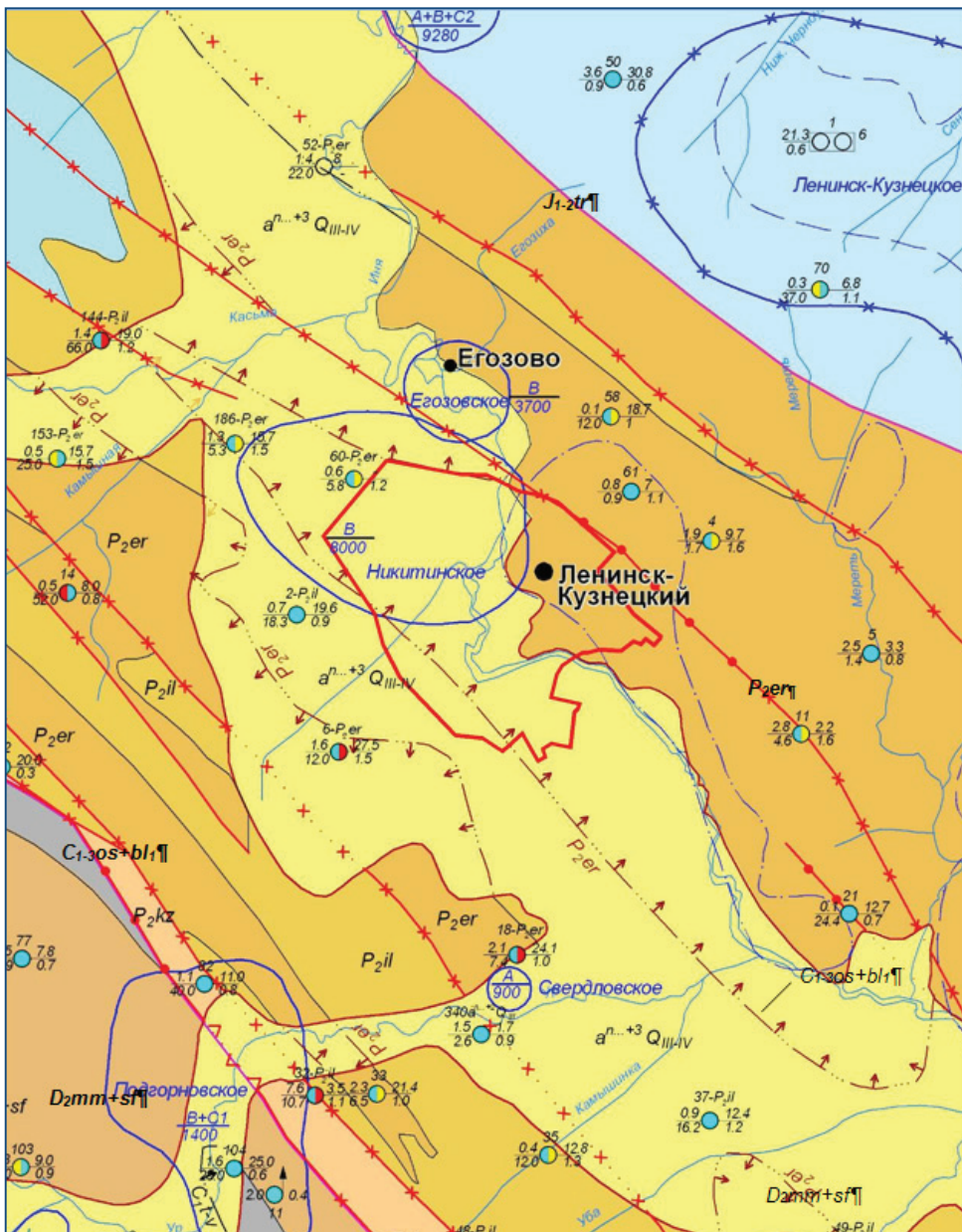


Рис. 6. Гидрогеологическая карта 1:200000

Fig. 6. Hydrogeological map 1:200000

Условные обозначения к гидрогеологической карте:

1.1. Гидрогеологические подразделения, распространенные по площади

- aⁿ⁺³Q_{III-IV} Водонесный комплекс верхнечетвертичных-современных аллювиальных образований пойменных, первых, вторых и третьих надпойменных террас крупных рек и их притоков. Пески, пески с гравием, суглинки, торф.
- J_{1-2tr} Водонесный комплекс нижне-среднеюрских терригенных пород терсюкской свиты Подобасско-Тутуяского бассейна. Песчаники, конгломераты, алевролиты, угли.

P_{2il}

Водонесная зона верхнепермских угленосно-терригенных пород ильинской подсерии. Песчаники, алевролиты, аргиллиты, угли.

P_{2kz}

Водонесный комплекс верхнепермских терригенных пород кузнецкой подсерии. Алевролиты, песчаники, реже аргиллиты.

P_{2er}

Водонесная зона верхнепермских угленосно-терригенных пород ерунаковской подсерии. Алевролиты, песчаники, аргиллиты, угли.

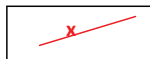
$C_{1-3}os+bl_1$

Водоносный комплекс нижневерхнекаменноугольных пород острогской свиты $C_{1-2}os$ и нижнебалахонской $C_{2-3}bl_1$ подсерии. Алевролиты, песчаники, аргиллиты, конгломераты, угли.

D_2mm+sf

Водоносный комплекс среднедевонских эффузивно-карбонатных пород мамонтовской – D_2mm и сафоновской (живетский ярус) – D_3sf свит. Туфопесчаники, конгломераты, гравелиты.

1.2. Подразделения, распространенные линейно (зоны разломов)



Водоносные



Не водоносные



Гидрогеологическое значение которых не выяснено

1.3. Водозаборные сооружения

74
 $\frac{1,8}{8,1} \frac{6,1}{0,8}$

Скважина. Цифра сверху – номер; слева в числителе – дебит, л/с; в знаменателе – понижение, м; справа в числителе – глубина установившегося уровня, м; в знаменателе – минерализация воды, г/дм³.

Никитинское
 В
 8000

Граница месторождения подземных вод.
 В числителе – категория запасов, в знаменателе – запасы, м³/сут.

Водообильность пород неоднородна, как в плане, так и в разрезе, и зависит от литологического состава водовмещающих пород, степени их трещиноватости и гипсометрических отметок залегания. Наибольшую обводненность имеют песчаники в зо-

не выветривания и тектонических нарушений. Прочие литологические различия пород менее водоносны, а слои аргиллитов иногда практически водоупорны. Дебиты скважин, вскрывающих воды отмеченного комплекса, при ненарушенном режиме колеблются от 0,5 л/с при понижении уровня от 3,1 м до 4,4 л/с при понижении уровня 28,0 м, в среднем составляя 1,6–2,1 л/с. Наиболее обводнены отложения в депрессиях рельефа и в значительной степени на водоразделах и склонах.

Водопроницаемость пород описываемого водоносного комплекса составляет 20–30 м²/сут, увеличиваясь на локальных участках до 60 м²/сут. Средний коэффициент фильтрации не превышает 0,5 м/сут, коэффициент уводнепроводности лежит в пределах $(3-8) \cdot 10^3$ м²/сут. С глубиной резко снижаются параметры, характеризующие степень обводненности пород. На глубинах свыше 150 м коэффициенты фильтрации не превышают значений 0,002–0,08 м/сут, редко достигая величины 0,5 м/сут; водопроницаемость низкая 0,1–1,8 м³/сут, реже 8 м³/сут. Обводненность пород в зонах разрывных нарушений, типа открытых взбросов, несколько повышена. Удельные дебиты скважины достигают значений от 0,002–0,03 до 2,06–5,74 л/с. Коэффициент водопроницаемости возрастает до 300 м²/сут, коэффициент фильтрации изменяется от 0,02–0,3 до 3,36 м/сут.

Питание подземных вод местное инфильтрационное, осуществляется за счет атмосферных осадков. Разгрузка при естественных условиях на площади распространения идет в местную гидрографическую сеть. Естественный поток направлен от водораздельной части к рекам Мереть и Еловка.

Общие водоприитоки в шахту «Алексиевская» по отработываемым пластам за 2005–2015 гг. составляли от 183 до 622 м³/ч (рис. 7, табл. 2). В весенний период водоприитоки кратковременно увеличиваются в 1,5–2 раза. Граничные условия фильтрации водоносного комплекса довольно сложные и определяются положением его относи-

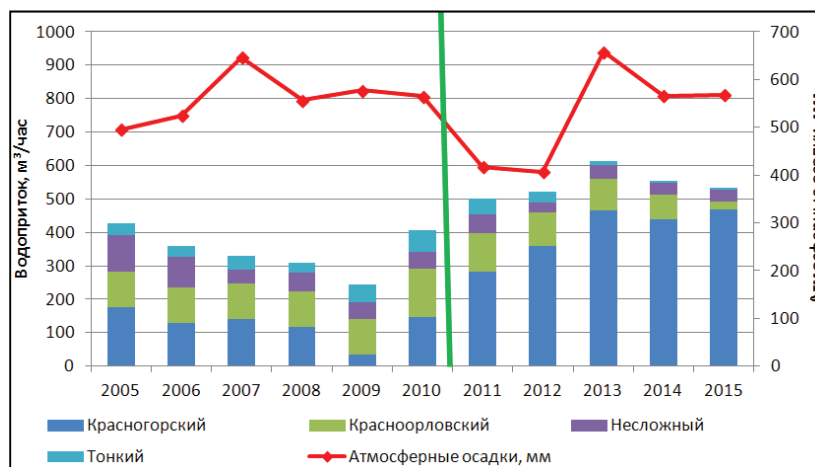


Рис. 7. Изменение среднегодового водоприитока и атмосферных осадков с 2005 по 2015 гг. на шахте «Алексиевская»

Fig. 7. Change in average annual water inflow and atmospheric precipitation from 2005 to 2015 in the mine Alexievskaya

тельно искусственных дренажных сооружений шахт и разрезов.

Таблица 2. Водоприитоки в горные выработки по шахте «Алексиевская»

Table 2. Water inflows into the mine Alexievskaya

Дата, год Data, year	Пласт Layer	Общий водоприиток, м ³ /ч Total water inflow, m ³ /h		
		max	min	mean
2005	Красноорловский Krasnoorlovsky	191	163	177
	Несложный/Neslozhny	130	89	110
	Тонкий/Tonky	36	30	33
	Итого/sum	348	280	320
2006	Красноорловский Krasnoorlovsky	159	100	130
	Несложный/Neslozhny	120	62	91
	Тонкий/Tonky	35	30	33
	Итого/sum	335	205	254
2007	Красноорловский Krasnoorlovsky	171	110	141
	Несложный/Neslozhny	625	21	42
	Тонкий/Tonky	48	31	40
	Итого/sum	284	195	240
2008	Красноорловский Krasnoorlovsky	118	115	117
	Несложный/Neslozhny	82	32	57
	Тонкий/Tonky	40	36	28
	Итого/sum	240	183	212
2009	Красногорский Krasnogorsky	66	2	34
	Красноорловский Krasnoorlovsky	110	102	106
	Несложный/Neslozhny	56	48	52
	Тонкий/Tonky	54	50	52
	Итого/sum	212	196	204
2010	Красногорский Krasnogorsky	240	53	147
	Красноорловский Krasnoorlovsky	172	114	143
	Несложный/Neslozhny	68	38	53
	Тонкий/Tonky	70	55	63
	Итого/sum	550	316	433
2011	Красногорский Krasnogorsky	360	203	282
	Красноорловский Krasnoorlovsky	143	91	117
	Несложный/Neslozhny	60	48	54
	Тонкий/Tonky	59	38	49
	Итого/sum	622	380	501

Группа пластов Красногорского, Красноорловского, Несложного, Тонкого развита практически по всему участку. На большей площади своего распространения эти пласты попадают в зону неблагоприятных гидрогеологических условий по отношению к их отработке. Вмещающие породы представлены слоями мощных песчаников, мощность которых составляет от 15 до 40 м, а они в свою оче-

редь отделены от пластов маломощными слоями алевролитов и аргиллитов. Песчаники, как правило, сильно трещиноватые и обладают высокой водопроницаемостью.

Водопроницаемость пород, залегающих над пластом Красногорским, в долине реки Мереть достигает 176–1180 м³/сут, а песчаников над пластом Красноорловским изменяется в пределах 160–1265 м³/сут. Наиболее высокие значения коэффициентов водопроницаемости характеризуют водопроницаемость отдельных открытых трещин, которые участвуют в формировании водоприитков.

В пределах водораздела рек Мереть и Еловка ранее велись горные работы по добыче пластов Колмогоровского-Шурфового, затем отработанное пространство было засыпано отработанной породой и рекультивировано. Глубина отработки составила в среднем 30–40 м (с локальным максимумом до глубины 50–70 м). Во время отработки угольных пластов наблюдалась срезка уровня подземных вод до глубины 30–40 м, после рекультивации уровень подземных вод частично или полностью восстановился. На поверхности участка располагается ряд гидроотвалов и отстойников, которые являются потенциальными источниками загрязнения поверхностных и подземных вод. По сложности гидрогеологических условий поле шахты относится ко второй группе со сложными гидрогеологическими условиями.

Результаты исследования

Авторами предпринята попытка оценить сезонную динамику водоприитков в открытые и подземные горные выработки. Понимая, что водоприитоки в горные выработки формируются под влиянием сложного сочетания естественных и искусственных факторов на каждом месторождении [16–19], считаем, что сезонную цикличность можно убедительно объяснить ведущей ролью влияния интенсивности атмосферных осадков и их внутригодовым распределением.

Наиболее существенное влияние на формирование и динамику водоприитков в центральной части Кузнецкого угольного бассейна оказывают многолетние и сезонные колебания суммы атмосферных осадков, особенно в тех случаях, когда это приходная статья водного баланса является основным, а иногда и единственным источником формирования водоприитков в горные выработки. Как показывают режимные наблюдения, величины водоприитков при открытой и подземной отработке угольных месторождений (рис. 8) испытывают сезонные изменения в соответствии с колебаниями интенсивности атмосферных осадков в течение календарного года.

Характерной особенностью цикличности сезонных изменений водоприитков является наличие двух хорошо выраженных максимумов, происходящих на период весеннего снеготаяния и осенних дождей.

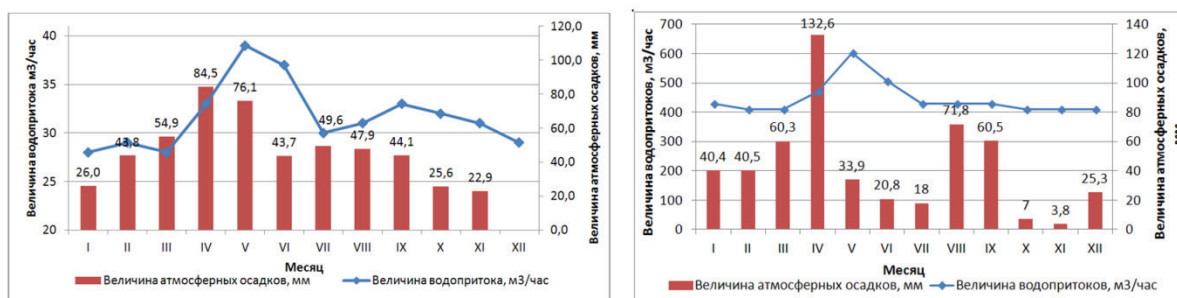


Рис. 8. Зависимость водоприитоков от величины атмосферных осадков на шахте «7 Ноября» 2010 г. (слева) и карьере «Суворовский» на 2006 г. (справа)

Fig. 8. Dependence of water inflows on the value of atmospheric precipitation on the section of the quarry Suvorovsky for 2006 (right) and in the mine 7 Noyabrya for 2010 (left)

Первый максимум водоприитоков характеризует инфильтрацию талых вод, то есть тесно связан с переходом в жидкую фазу всей суммы атмосферных осадков, накопленных за предшествующий период отрицательных температур.

При исследовании влияния атмосферных осадков на эксплуатацию подземных горных выработок замечено, что с увеличением глубины отработки полезного ископаемого время запаздывания максимума водоприитока от пика поступления талых вод увеличивается.

Интенсивность обводнения горных пород за счет инфильтрационного питания определяется не только гидрогеологическими условиями месторождения, но и способами разработки пластов полезного ископаемого. Все угольные шахты Кузбасса ведут подземную добычу угля с обрушением кровли, что может создавать крупные зоны сдвига горных пород и формировать системы открытых трещин. В этих зонах образуются области повышенной проницаемости, что способствует улучшению гидравлической связи горных выработок с поверхностью, изменяя условия инфильтрации атмосферных осадков.

Климатические условия относятся к группе основных быстроизменяющихся факторов, определяющих не только расходы и уровни поверхностных водотоков, но и, опосредованно, режим подземных вод. Значительную роль в изменении питания подземных вод играют в первую очередь атмосферные осадки в жидкой фазе. В условиях резко континентального климата важно учитывать наличие переходных сезонов года (весна, осень); весной происходит интенсивное таяние твердых осадков, накопленных в зимний период, что может приводить к заметному сезонному увеличению водоприитоков в горные выработки [20].

Нами проведен анализ многолетней изменчивости климатического фактора формирования водоприитоков в горные выработки. В основу анализа положены данные ежедневных срочных наблюдений за температурой воздуха и суммой атмосферных осадков. Оценка устойчивых тенденций в многолетней изменчивости метеорологических параметров с течением времени выполнена на основе

методов статического анализа. Исходным материалом послужили специализированные исходные базы данных метеорологической информации.

Для выявления закономерностей многолетней изменчивости температуры воздуха и атмосферных осадков их статистической значимости использован критерий Питмена. Проверка рабочей гипотезы случайности рассматриваемой величины или функции является неотъемлемым этапом статистического анализа. Сущность проверки заключается в выяснении вопроса о том, является ли изменение данной величины случайным или закономерным, связанным с каким-либо постоянно действующим фактором. Изменения могут быть объяснены случайными отклонениями или проявлением закономерностей, связанных с глобальными процессами изменения климата [21–23]. Многолетняя изменчивость климатических показателей за период с 1955 по 2015 гг. показана на рис. 9.

При исследовании изменения температуры воздуха в Кемерово за последние 60 лет получены следующие результаты (рис. 9). В среднем температура воздуха за период с 1955 по 2015 гг. увеличилась на 1,7 °С. Если в период с 1955 по 1985 гг. среднегодовая температура составляла 0–0,5 °С, то в последние десятилетия она превышает 1,5 °С.

По аналогии с исследованием изменения температуры была изучена особенность изменения суммы атмосферных осадков за период с 1955 по 2015 гг. для города Кемерово, вследствие чего получены следующие результаты (рис. 7). Выявлен тренд, направленный на увеличение среднегодовой величины атмосферных осадков на 200 мм за последние 60 лет. Следует подчеркнуть, что это увеличение составляет порядка 1/3 с начала периода, причем увеличение суммы атмосферных осадков фиксируется в зимний период.

Тенденция увеличения атмосферных осадков наблюдается с сентября по апрель, уменьшение фиксируется в августе. Статистически значимое увеличение наблюдается в зимний период – с октября по март, следовательно, увеличиваются запасы воды в твердой фазе осадков, которые при таянии провоцируют интенсификацию питания подземных вод (рис. 10).

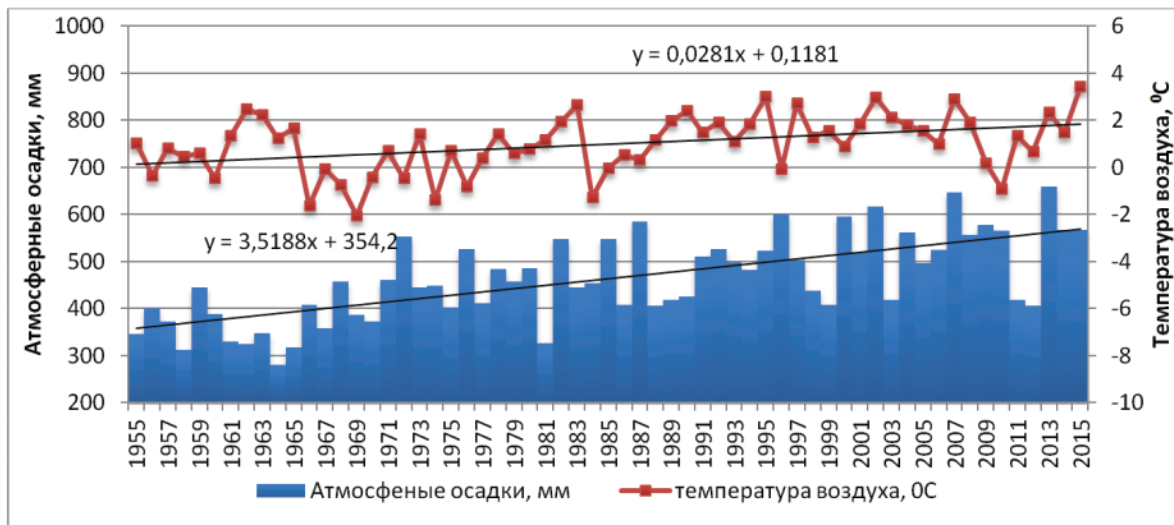


Рис. 9. Временной ход среднегодовой суммы атмосферных осадков и температуры воздуха с линейными трендами за период с 1955 по 2015 гг. в г. Кемерово

Fig. 9. Time course of atmospheric precipitation and air temperature with linear trends for 1955 to 2015 in Kemerovo

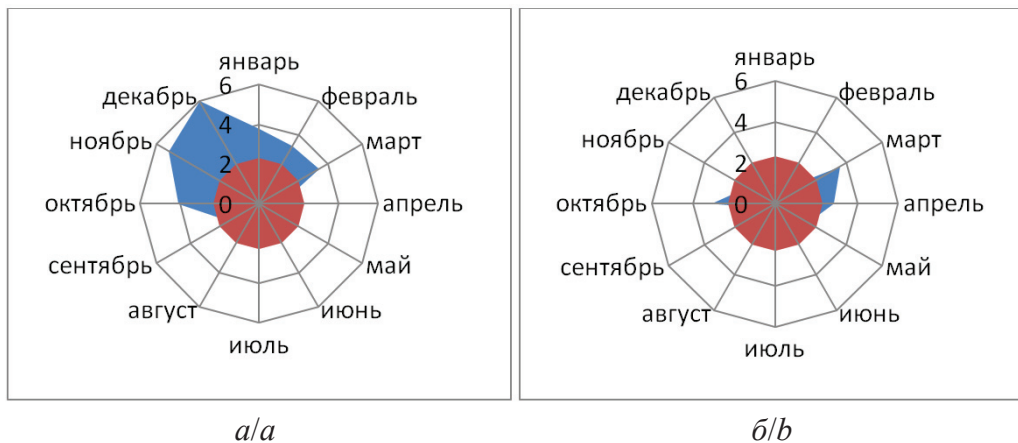


Рис. 10. Оценка однородности выборки по месяцам с 1955 по 2015 гг.: а) величина атмосферных осадков; б) слева – температура воздуха

Fig. 10. Homogeneity of the data by months from 1955 to 2015: a) amount of precipitation; b) air temperature

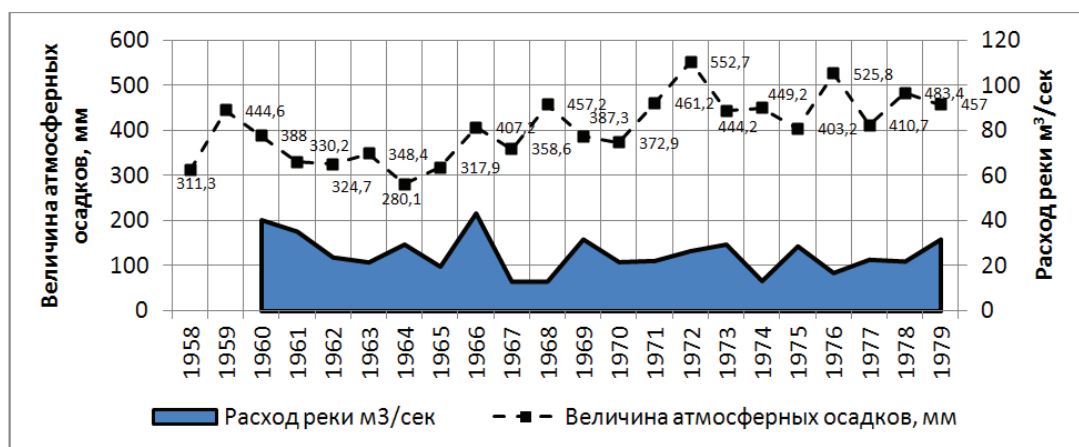


Рис. 11. Среднегодовая величина атмосферных осадков и расхода реки Инья

Fig. 11. Average annual value of atmospheric precipitation and discharge of the Inya River

Выявленная тенденция временной изменчивости атмосферных осадков приобретает особую значимость при решении геофильтрационных задач в нестационарной постановке, направленной на изучение изменения гидрогеологических условий методами численного моделирования под влиянием отработки месторождений твердых полезных

ископаемых и при подсчете запасов подземных вод.

Атмосферные осадки оказывают непосредственное влияние на условия формирования поверхностного стока (рис. 11), который может участвовать в формировании дополнительного питания подземных вод [24].

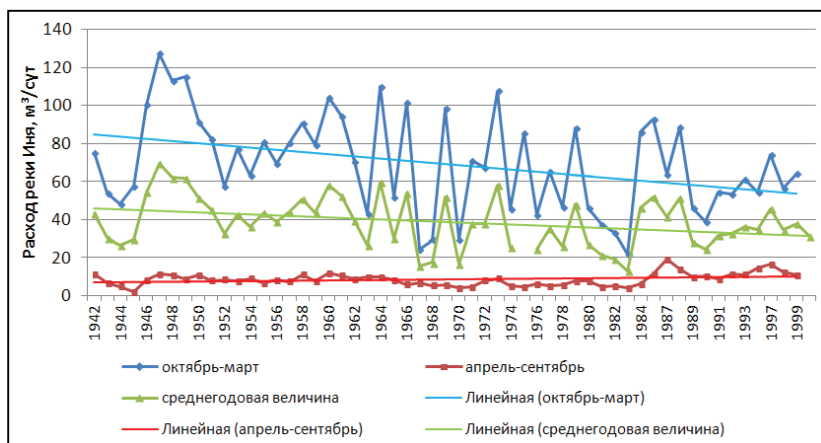


Рис. 12. Среднегодовое изменение расхода реки Иня в период с 1942 по 2000 гг.

Fig. 12. Average annual change in the flow of the Inya River between 1942 and 2000

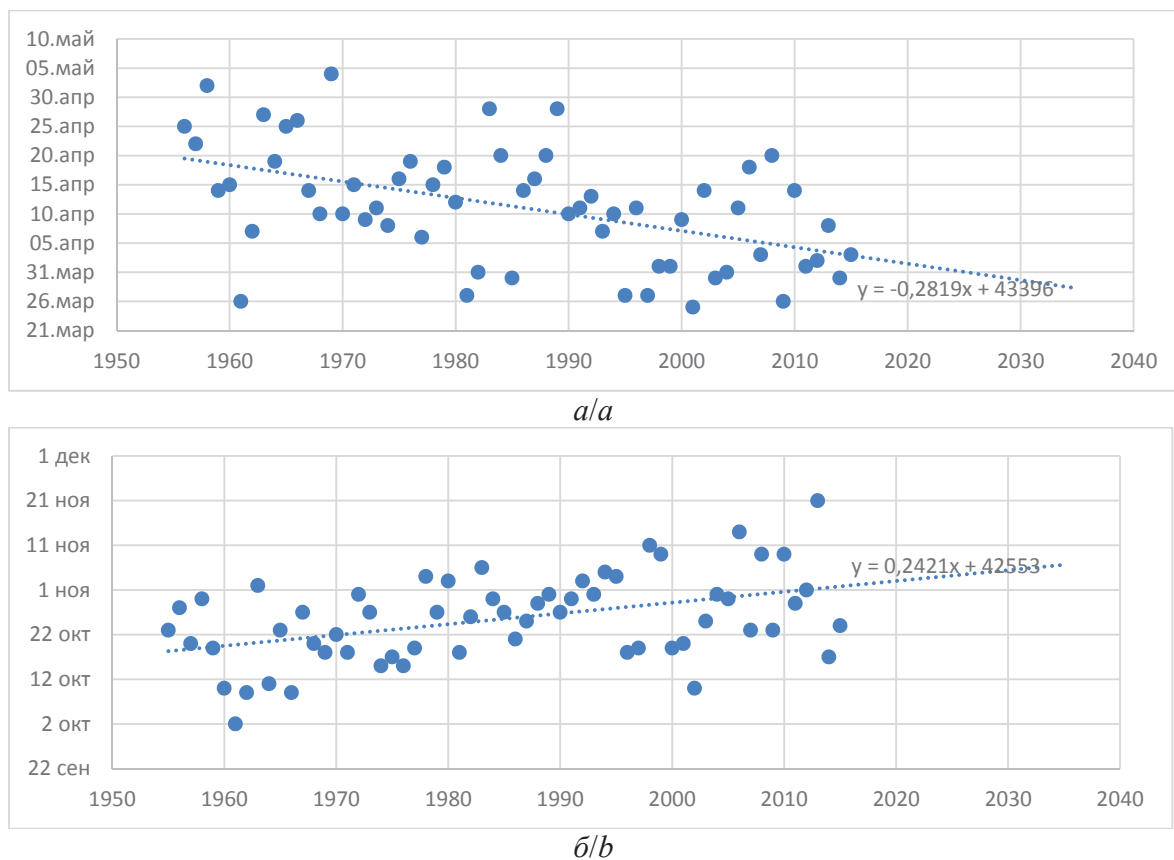


Рис. 13. Дата перехода температуры воздуха через 0 °С: а) от зимы к весне; б) от осени к зиме

Fig. 13. Data of air temperature transition through 0 °C: a) from winter to spring; b) from autumn to winter

Угольные месторождения, расположенные в непосредственной близости от поверхностных водоемов, отличаются высокой водообильностью горных пород, вследствие чего формируются дополнительные водоприитоки [25–27]. Нами изучен временной ряд изменения расходов реки Иня в период с 1942 по 2000 гг. (рис. 12).

В среднем за период исследований расход реки в створе города Ленинск-Кузнецкого уменьшается на $15 \text{ м}^3/\text{сут}$. Это уменьшение носит сложный характер. В зимний период – с октября по март – величина расхода растет (увеличение на $5 \text{ м}^3/\text{сут}$), а в летний сезон уменьшился на $19 \text{ м}^3/\text{сут}$ за 50 лет.

Внутригодовое перераспределение атмосферных осадков может быть связано и с многолетними тенденциями температурных изменений. Анализ показывает, что заметно смещаются границы зимнего и летнего сезонов. Эти изменения показаны на рис. 13.

Средняя дата перехода среднесуточной температуры воздуха через 0°C от зимы к лету в начале периода отмечалась 20-го апреля, а к 2015 г. сместилась к 5 апреля (рис. 13, а). Переход среднесуточной температуры через 0°C от лета к зиме также сместился с 17-го октября к 1-му ноября в 2015 г. (рис. 13, б). Таким образом, продолжительность безморозного периода за 50 лет возрасла в среднем от 180 до 210 суток (рис. 14).

Характерно, что влияние отмеченных температурных закономерностей сказывается на всей площади водосборного бассейна.

Кроме естественных факторов величина водоприитоков в существенной степени зависит от площади горных работ и объема подработанного пространства в подземных горных выработках [18, 25]. Рост водоприитоков пропорционально масштабам горных работ установлен на шахте Алексиевская (рис. 15).

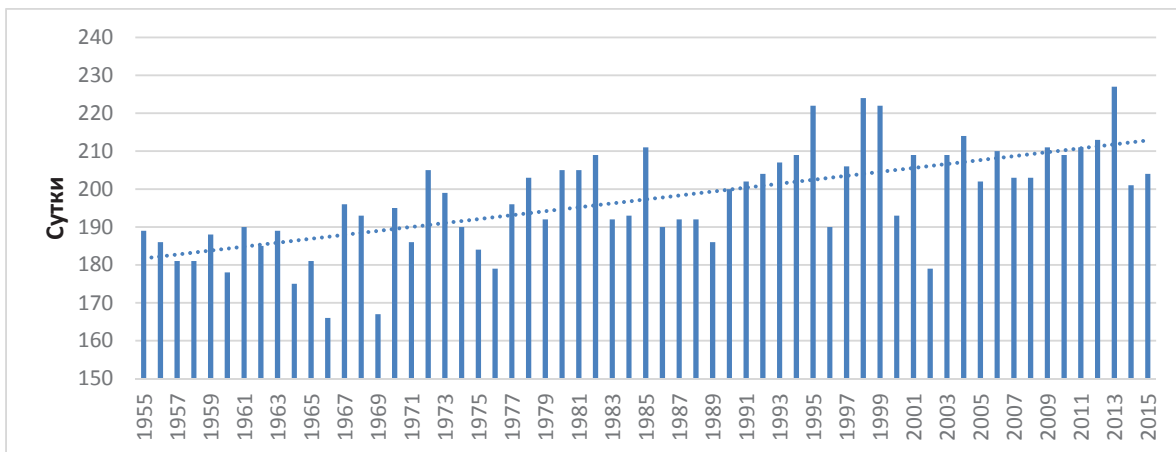


Рис. 14. Продолжительность безморозного периода

Fig. 14. Duration of the frost-free period

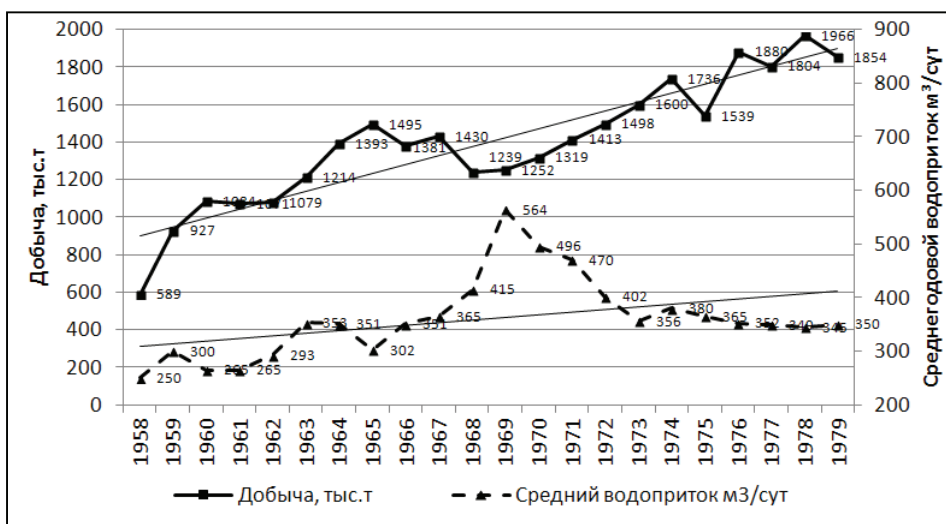


Рис. 15. Среднегодовой водоприиток и объемы добычи с 1958 по 1979 гг. на шахте «Алексиевская»

Fig. 15. Average annual water inflow and production volumes from 1958 to 1979 in the mine Aleksievskaya

Совместный анализ объема добычи и водоприитоков в подземные горные выработки шахты «Алексиевская» показывает, что с увеличением объема добычи угля водоприиток увеличивается, но данная зависимость не является линейной (рис. 15). С течением временем среднегодовые водоприитоки в горные выработки стабилизируются и отработка полезного ископаемого проходит в стационарном гидродинамическом режиме. С увеличением глубины отработки влияние высокообводненных зон экзогенной трещиноватости и питающих граничных условий ослабевает.

Рассматривая особенности формирования водоприитоков в подземных горных выработках нами выделено три режимных этапа. Первый этап характеризуется развитием фронта горных работ, сработкой естественных запасов подземных вод при усиленном влиянии климатических факторов. Второй этап с предельным развитием размеров депрессионной воронки и увеличением глубины отработки, что сопровождается стабилизацией водоприитоков. На третьем этапе водоприитоки формируются в зоне замедленного водообмена в условиях ослабленного влияния климатических факторов [28–30].

Ярким примером в данном случае может служить шахта «Алексиевская», водоприитоки на которой до 2010 г. формировались в квазистационарном режиме, преимущественно завися от объема добычи, с 2011 г. водоприиток в подземные горные выработки стабилизируется и прослеживается зависимость от величины атмосферных осадков, что свидетельствует об установившемся режиме.

Выводы

1. Оценка климатических характеристик продемонстрировала их ведущее влияние на формирование водоприитоков в горные выработки. Питание водоносных горизонтов осуществляется преимущественно за счет инфильтрации атмосферных осадков, а также в следствии просачивания сквозь подрусловые отложения вод поверхностных водотоков и водоемов.
2. При помощи статистических методов о случайности и наличии тренда с использованием критерия Питмена и критерия инверсий, соответственно, проведен анализ изменения метеоро-

логических характеристик во временного. В результате получено следующее:

- a) На протяжении последних 60 лет прослеживается положительный тренд величины атмосферных осадков на 200 мм. Тенденция, направленная на увеличение, наблюдается с сентября по апрель, и на уменьшение в августе, статистически значимое увеличение наблюдается в зимний период – с октября по март, следовательно, увеличиваются объемы воды в твердых осадках, которые при таянии провоцируют дополнительное питание подземных вод
 - b) За период с 1955 по 2015 гг. в среднем температура воздуха увеличилась на 1,7 °С. Если в период с 1955 по 1985 гг. среднегодовая температура составляла 0–0,5 °С, то последние десятилетия она превышает 1,7 °С. Выявленную тенденцию потепления можно связать с локальными причинами, обусловленными развитием инфраструктуры населенных пунктов, а также объяснить долговременными процессами естественного изменения климата.
 - c) За период с 1942 по 2000 гг. выявлен отрицательный тренд среднегодового расхода реки Иня на 15 м³/сут, в зимний период – с октября по март – среднегодовая величина расхода растет (увеличение на 5 м³/сут), а в летний период, среднегодовой расход за 50 лет уменьшился на 19 м³/сут. При сопоставлении полученных данных о расходе воды в реке Иня с величиной атмосферных осадков логично предположить, что на увеличение расхода потока в зимний период влияет увеличение атмосферных осадков, в то же время падение расхода возникает вследствие осушения водоносных зон при ведении горных работ.
3. Из анализа изменения водоприитоков в подземные горные выработки на примере шахты «Алексиевская» следует, что с увеличением объемов добычи водоприиток будет возрастать, но зависимость не является линейной.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Coalnews – Уголь Кузбасса. URL: <http://coalnews.ucoz.ru> (дата обращения 20.12.2017).
2. Воздвиженская А. Причина не за горами // Российская газета – Федеральный выпуск № 7208 (42). URL: <https://rg.ru/2017/02/28/smertnost-na-ugolnyh-shahtah-v-rossii-vyroslavdvoe.html> (дата обращения 20.12.2017).
3. Троянский С.В., Белицкий А.С., Чекин А.И. Гидрогеология и осушение месторождений полезных ископаемых. – М.: Углетехиздат, 1956. – 302 с.
4. Каменский Г.Н., Климентов П.П., Авчинников А.М. Гидрогеология месторождений полезных ископаемых. – М.: Госгеолгиздат, 1953. – 356 с.
5. Рогов Г.М., Попов В.К. Гидрогеология и катагенез пород Кузбасса. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1985. – 176 с.
6. Gridasov A., Kuzevanov K., Bogdanov A. Hydrogeological condition patterns of Kuznetsk Basin coalbed methane fields for estimating hydrodynamic calculations // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – V. 43. – № 1. – P. 1–6.
7. Угольная база России. Т. II. Угольные бассейны и месторождения Западной Сибири (Кузнецкий, Горловский, Западно-Сибирский, бассейны; месторождения Алтайского края и Республики Алтай). – М.: ООО «Геоинформцентр», 2003. – 604 с.
8. Yin S.X., Zhang J.C., Liu D.M. A Study of Mine Water Inrushes by Measurements of in Situ Stress and Rock Failures // Natural Hazards. – 2015. – V. 79. – № 3. – P. 1961–1979.

9. Changes in Water and Sediment Exchange between the Changjiang River and Poyang Lake under Natural and Anthropogenic Conditions, China / J.H. Gao, J.J. Jia, A.J. Kettner, F. Xing, Y.P. Wang, X.N. Xu, Y. Yang, X.Q. Zou, S. Gao, S.H. Qi, F.Q. Liao // *Science of the Total Environment*. – 2014. – V. 481. – P. 542–553.
10. Gui H.R., Song X.M., Lin M.L. Water-Inrush Mechanism Research Mining above Karst Confined Aquifer and Applications in North China Coalmines // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2017. – V. 10. – № 7. – P. 1–10.
11. Христофоров А.В. Надежность расчетов речного стока. – М.: Изд-во МГУ, 1993. – 168 с.
12. Rapp J., Schniewiese Ch.D. Atlas der Niederschlags und Temperaturentrends in Deutschland 1891–1990 // *Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten: Serie B Meteorologie und Geophysik*. – Frankfurt am Main: Universität Frankfurt, 1996. – Bd. 5. – 255 s.
13. Groundwater Outbursts from Faults above a Confined Aquifer in the Coal Mining / R. Zhang, Z.Q. Jiang, H.Y. Zhou, C.W. Yang, S.J. Xiao // *Natural Hazards*. – 2014. – V. 71. – № 3. – P. 1861–1872.
14. Степанов В. Угольные разрезы Кузбасса («Кузбассразрезуголь») – фоторепортаж. URL: <https://sdelanounas.ru/blogs/38557/> (дата обращения 20.12.2017).
15. Гидрогеология Ерунаковского района Кузбасса в связи с проблемой образования ресурсов и добычи угольного метана / Л. Шварцев, В.Т. Хрюкин, Е.В. Домрочева, К.И. Кузеванов, Н.М. Рассказов, Т.С. Попова, О.Е. Лепокурова, Е.В. Швачко // *Геология и геофизика*. – 2006. – Т. 47. – № 7. – С. 881–891.
16. Wang J.A., Tang J., Jiao S.H. Seepage Prevention of Mining-Disturbed Riverbed // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2015. – V. 75. – P. 1–14.
17. Scenario Analysis of Mine Water Inrush Hazard Using Bayesian Networks / J.S. Wu, S.D. Xu, R. Zhou, Y.P. Qin // *Safety Science*. – 2016. – V. 89. – P. 231–239.
18. Василенко Н.Г., Журавин С.А., Марков М.Л. Водно-балансовые расчеты при оценке водоприитока в действующие карьеры (на примере карьеров Костомукшского гока) // *Инженерные изыскания*. – 2016. – № 2. – С. 30–37.
19. In Situ Measurement of Hydraulic Properties of the Fractured Zone of Coal Mines / Z. Huang, Z.Q. Jiang, X. Tang, X.S. Wu, D.C. Guo, Z.C. Yue // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2016. – V. 49. – № 2. – P. 603–609.
20. Савичев О.Г. Гидрогеология, метеорология и климатология: гидрологические расчеты. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 224 с.
21. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). URL: <http://meteo.ru/> (дата обращения 20.12.2017).
22. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Ч. 1–6. Вып. 20. Томская, Новосибирская, Кемеровская области, Алтайский край. – СПб.: Изд-во «Гидрометеиздат», 1993. – С. 158–175.
23. Климатология / О.А. Дроздов, В.А. Васильев, Н.В. Кобышева, А.Н. Раевский, Л.К. Смекалова, Е.П. Школьный. – Л.: Изд-во «Гидрометиздат», 1989. – 568 с.
24. Аузина Л.И. Особенности обводненности золоторудных месторождений Витимо-патомского нагорья // *Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений*. – 2017. – Т. 40. – № 1 (58). – С. 127–136.
25. Fully Integrated Surface-Subsurface Flow Modelling of Groundwater-Lake Interaction in an Esker Aquifer: Model Verification with Stable Isotopes and Airborne Thermal Imaging / P. Ala-Aho, P.M. Rossi, E. Isokangas, B. Klove // *Journal of Hydrology*. – 2015. – V. 522. – P. 391–406.
26. Rudorff C.M., Melack J.M., Bates P.D. Flooding Dynamics on the Lower Amazon Floodplain: 2. Seasonal and Interannual Hydrological Variability // *Water Resources Research*. – 2014. – V. 50. – № 1. – P. 635–649.
27. Фи Хонг Тхинь, Строкова Л.А. Типизация грунтовых толщ территории города Ханой (Вьетнам) при изучении оседания земной поверхности при водопонижении // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328. – № 4. – С. 6–17.
28. Пургина Д.В., Строкова Л.А., Кузеванов К.И. Моделирование гидрогеологических условий для обоснования противооползневых мероприятий на участке набережной реки Камы в городе Перми // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2016. – Т. 327. – № 1. – С. 116–127.
29. The research underflooding processes of architecture monuments on the territory of Tomsk with using gistechnology / V. Pokrovskiy, D. Pokrovskiy, E. Dutova, A. Nikitenkov // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management*. – 2014. – V. 2 (1). – P. 935–941.
30. Hydrogeological Conditions Changes of Tomsk, Russia / V.D. Pokrovsky, E.M. Dutova, K. Kuzevanov, D.S. Pokrovsky, N.G. Nalivaiko // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2015. – V. 27. – P. 1–5.

Поступила 22.12.2017 г.

Информация об авторах

Пургина Д.В., аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Кузеванов К.И., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDK 556.343

WATER INFLOW INTO MINE UNDER THE INFLUENCE OF EXTERNAL BOUNDARY CONDITIONS AT COAL DEPOSIT EXPLOITATION (KUZBASS)

Darya V. Purgina¹,
purgina_darya@mail.ru

Konstantin I. Kuzevanov¹,
kki@tpu.ru

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

Relevance. Safety and efficiency of coal deposit development depends directly on natural hydrogeological conditions and their changes under the influence of mining deposits in various ways. Particularly significant and sudden complications can arise with high water cut of rocks, a sharp change in their filtration properties under the influence of mining operations or changes in supply of aquifer complexes. Multidirectional factors of water inflow of coal deposits determine the need to identify and analyze the leading factors in formation of water inflows into underground mines.

The aim of the study is to analyze natural factors effecting the change in the magnitude of water inflows in mining solid minerals by the underground method using the example of coal mines in the central part of Kuzbass; study the hydrogeological conditions of coal deposits, using a similar method; identify regularities and group the leading factors in formation of water inflows into underground mining.

Methodology. To study the magnitude of possible meteorological changes, the material was provided by specialized electronic databases, both monthly averages and urgent observations of air temperature and the amount of atmospheric precipitation. Information array processed by the weather station in Kedrovka (Kemerovo) for 1955 to 2015 was obtained from the All-Russian Scientific Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center (VNIIGMI-WDC), literature sources and stock materials. The materials provided by the «Zarechnaya» LLC «Georesurs» Ltd., as well as the data on water inflows in Alexeyevskaya mine and 7 Noyabrya mine were used as the initial data on water inflows and filtration properties of rocks for monitoring geological environment on the fields. Processing meteorological parameters to identify their patterns is based on the use of statistical methods of data processing. The results are visualized using Microsoft Word, Excel, Surfer, AutoCad.

Results. The authors have revealed the factors that have the greatest influence on formation of water inflow into the mine workings, and carried out the analysis of the change in climatic characteristics by the temporary statistical methods on randomness and presence of a trend using the Pitmen criterion and the inversion criterion, respectively. Based on the results of the research, a conceptual model of formation of water inflows into mining is constructed.

Key words:

Underground water, mining, infiltration recharge, water inflow, Pitman test, mine, Kuzbass Adartisian basin, longwall, coal heading.

The research was carried out at Tomsk Polytechnic University within the Competitiveness Enhancement Program.

REFERENCES

1. *Coalnews – Ugol Kuzbassa* [Coalnews – Coal of the Kuzbass]. Available at: <http://coalnews.ucoz.ru> (accessed 20 December 2017).
2. Vozdvizhenskaya A. Pritchina ne za gorami [The reason is not far off]. *Rossiyskaya gazeta – Federalny vypusk no. 7208 (42)* [Rossiyskaya Gazeta – Federal issue no. 7208 (42)]. Available at: <https://rg.ru/2017/02/28/smertnost-na-ugolnyh-shahtah-v-rossii-vyrosla-vdvoe.html> (accessed 20 December 2017).
3. Troyansky S.V., Belitsky A.S., Chekin A.I. *Gidrogeologiya i osushenie mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh* [Hydrogeology and drainage of mineral deposits]. Moscow, Ugletekhizdat Publ., 1956. 302 p.
4. Kamensky G.N., Klimentov P.P., Avchinnikov A.M. *Gidrogeologiya mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh* [Hydrogeology of mineral deposits]. Moscow, Gosgeolizdat Publ., 1953. 356 p.
5. Rogov G.M., Popov V.K. *Gidrogeologiya i katagenez porod Kuzbassa* [Hydrogeology and katagenesis Kuzbass rocks]. Tomsk, Tomsk State University Publ., 1985. 176 p.
6. Gridasov A., Kuzevanov K., Bogdanova A. Hydrogeological condition patterns of Kuznetsk Basin coalbed methane fields for estimating hydrodynamic calculations. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43, no. 1, pp. 1–6.
7. *Ugolnaya baza Rossii. T. II. Ugolnye basseyny i mestorozhdeniya Zapadnoy Sibiri (Kuznetsky, Gorlovsky, Zapadno-Sibirsky, basseyny; mestorozhdeniya Altayskogo kraia i Respubliki Altay)* [Coal base of Russia. Vol. II. Coal pools and deposits of Western Siberia (Kuznetsk, Gorlovsky and West-Siberian basins, deposits of the Altai region and the Altai Republic)]. Moscow, Geoinformatsentr Publ., 2003. 604 p.
8. Yin S.X., Zhang J.C., Liu D.M. A Study of Mine Water Inrushes by Measurements of in Situ Stress and Rock Failures. *Natural Hazards*, 2015, vol. 79, no. 3, pp. 1961–1979.
9. Gao J.H., Jia J.J., Kettner A.J., Xing F., Wang Y.P., Xu X.N., Yang Y., Zou X.Q., Gao S., Qi S.H., Liao F.Q. Changes in Water and Sediment Exchange between the Changjiang River and Poyang Lake under Natural and Anthropogenic Conditions, China. *Science of the Total Environment*, 2014, vol. 481, pp. 542–553.
10. Gui H.R., Song X.M., Lin M.L. Water-Inrush Mechanism Research Mining above Karst Confined Aquifer and Applications in North China Coalmines. *Arabian Journal of Geosciences*, 2017, vol. 10, no. 7, pp. 1–10.
11. Khristoforov A.V. *Nadezhnost raschetov rechnogo stoka* [Reliability of river flow calculations]. Moscow, MSU Publ., 1993. 168 p.
12. Rapp J., Schniewe Ch.D. Atlas der Niederschlags und Temperaturtrends in Deutschland 1891–1990 [Atlas of Precipitation and Temperature Trends in Germany 1891–1990]. *Frankfurt Geological Survey: Series B Meteorology and Geophysics*. Frankfurt am Main, University of Frankfurt, 1996. Vol. 5, pp. 255. In Ger.

13. Zhang R., Jiang Z.Q., Zhou H.Y., Yang C.W., Xiao S.J. Groundwater Outbursts from Faults above a Confined Aquifer in the Coal Mining. *Natural Hazards*, 2014, vol. 71, no. 3, pp. 1861–1872.
14. Stepanov V. *Ugolnye razrezy Kuzbassa* [Coal opencast of Kuzbass] («Kuzbassrazrezugol»). Available at: <https://sdelanounas.ru/blogs/38557/> (accessed 20 December 2017).
15. Shvartsev L.S., Kxrykin V.T., Domrocheva E.V., Kuzevanov K.I., Passkazov N.M., Popova T.C., Lepokupova O.E., Shvachko E.V. Hydrology of the Erunukovo area of the Kuznetsk basin in the context of the problem of coal methane formation and mining. *Russian Geology and Geophysics*, 2006, vol. 47, no. 7, pp. 881–891. In Rus.
16. Wang J.A., Tang J., Jiao S.H. Seepage Prevention of Mining-Disturbed Riverbed. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, vol. 75, pp. 1–14.
17. Wu J.S., Xu S.D., Zhou R., Qin Y.P. Scenario Analysis of Mine Water Inrush Hazard Using Bayesian Networks. *Safety Science*, 2016, vol. 89, pp. 231–239.
18. Vasilenko N.G., Zhuravin S.A., Markov M.L. Water balance computations for the assessment of the water inflow to the mining quarries (the Kostomuksha quarries case study). *Engineering survey*, 2016, no. 2, pp. 30–37. In Rus.
19. Huang Z., Jiang Z.Q., Tang X., Wu X.S., Guo D.C., Yue Z.C. In Situ Measurement of Hydraulic Properties of the Fractured Zone of Coal Mines. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, vol. 49, no. 2, pp. 603–609.
20. Savichev O.G. *Gidrogeologiya, meteorologiya i klimatologiya: gidrologicheskie raschety* [Hydrogeology, Meteorology und Climatology: hydrogeological calculation]. Tomsk, TPU Publ., 2011. 224 p.
21. *Federalnaya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchey sredy (Rosgidromet)* [Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (Roshydromet)]. Available at: <http://meteo.ru/> (accessed 20 December 2017).
22. *Nauchno-prikladnoy spravochnik po klimatu SSSR. Seriya 3. Mnogoletnie dannye. Ch. 1–6. Vyp. 20. Tomskaya, Novosibirskaya, Kemerovskaya oblasti, Altajskiy kray* [Scientific and Applied Handbook on the Climate of the USSR. Series 3. Perennial data. P. 1–6. Iss. 20. Tomsk, Novosibirsk, Kemerovo regions, Altai area] St. Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1993. pp. 158–175.
23. Drozdov O.A., Vasilyev V.A., Kobysheva N.V., Smekalova L.K., Shkolnyy E.P., *Klimatologiya* [Climatology]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1989. 568 p.
24. Auzina L.I. Water encroachment features of Vitim-patom highland gold deposits. *Proc. of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the RAEN. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits*, 2017, vol. 40, no. 1, pp. 127–136. In Rus.
25. Ala-Aho P., Rossi P.M., Isokangas E., Klove B. Fully Integrated Surface-Subsurface Flow Modelling of Groundwater-Lake Interaction in an Esker Aquifer: Model Verification with Stable Isotopes and Airborne Thermal Imaging. *Journal of Hydrology*, 2015, vol. 522, pp. 391–406.
26. Rudorff C.M., Melack J.M., Bates P.D. Flooding Dynamics on the Lower Amazon Floodplain: 2. Seasonal and Interannual Hydrological Variability. *Water Resources Research*, 2014, vol. 50, no. 1, pp. 635–649.
27. Phi Hong Thin, Strokova L.A. Classification of soil types for Hanoi (Vietnam) when studying land subsidence at groundwater extraction. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 4, pp. 6–17. In Rus.
28. Purgina D.V., Strokova L.A., Kuzevanov K.I. Modeling hydrogeological conditions for antilandslide measures justification on the plot of the Kama river embankment in Perm. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 1, pp. 116–127. In Rus.
29. Pokrovskiy, V., Pokrovskiy, D., Dutova, E., Nikitenkov, A. The research underflooding processes of architecture monuments on the territory of Tomsk with using gistechnology. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management*, 2014, vol. 2 (1), pp. 935–941.
30. Pokrovsky V.D., Dutova E.M., Kuzevanov K.I., Pokrovsky D.S., Nalivaiko N.G. Hydrogeological Conditions Changes of Tomsk, Russia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 27, pp. 1–5.

Received: 22 December 2017.

Information about the authors

Darya V. Purgina, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Konstantin I. Kuzevanov, Cand Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 528.02

ОСОБЕННОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ

Уставич Георгий Афанасьевич¹,
ystavich@mail.ru

Аврунев Евгений Ильич¹,
avrynev_ei@ngs.ru

Сальников Валерий Геннадьевич¹,
salnikov@ssga.ru

Попов Виктор Константинович²,
pvk@tpu.ru

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10.

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

Актуальность исследования. В настоящее время достаточно хорошо разработанный и применяющийся состав инженерно-геодезических работ в условиях наличия грунтов с сезонным промерзанием требует проведения дальнейших исследований применительно к вечномерзлым грунтам в части разработки методики создания геодезического обоснования и обеспечения стабильности пунктов этого обоснования на разных этапах его создания. Особое внимание эти вопросы заслуживают при строительстве и эксплуатации энергетических объектов, расположенных на вечномерзлых грунтах.

Цель исследования: разработать и внедрить технологическую схему создания стабильного планово-высотного обоснования в условиях наличия вечномерзлых грунтов на Няганской и Серовской ГРЭС (г. Нягань, Ханты-Мансийский автономный округ).

Объекты: грунтовые репера, пункты строительной сетки, опорные геодезические пункты, универсальные геодезические пункты, многолетнемерзлые грунты.

Методы: метод «свободной станции», обратная линейно-угловая засечка, спутниковые измерения, определение пространственного положения каркаса градири, геометрическое нивелирование короткими лучами, наблюдение за осадками и деформациями зданий, сооружений и основного оборудования.

Результаты. Предложена технологическая схема геодезического мониторинга в условиях наличия вечномерзлых грунтов. Представлена схема опорного геодезического пункта, способного сохранять стабильное пространственное положение в период строительно-монтажных работ, а также в период эксплуатации энергетического объекта. Разработана методика деформационного мониторинга градирен различной формы каркаса. Разработанная методика позволяет определить пространственное положение каркаса градири при различных режимах работы основного оборудования от 0 до 100 % мощности, со среднеквадратической ошибкой не более 2,0 мм.

Ключевые слова:

Планово-высотное обоснование, турбина, башенная градирия, геометрическое нивелирование, тахеометр, деформационный мониторинг.

Тепловые электрические станции (ТЭС) являются сложным инженерным энергетическим комплексом, состоящим из зданий, сооружений, энергетического и иного оборудования.

Основными инженерными сооружениями и оборудованием ТЭС [1, 2], при строительстве и эксплуатации которых необходимо выполнение высокоточных инженерно-геодезических работ, являются: главный корпус, градири, дымовые трубы, котельная и паротурбинная установки.

Непосредственно после выбора места расположения промплощадки состав основных инженерно-геодезических работ включает в себя:

- создание на территории промплощадки планово-высотного геодезического обоснования соответствующей точности;
- сгущение геодезического обоснования для обеспечения строительства конкретного инженерного сооружения;

- передачу геодезического обоснования внутрь инженерного сооружения и его последующее сгущение для обеспечения монтажа и дальнейшей эксплуатации оборудования каждого инженерного сооружения;
- поддержание на необходимом техническом уровне геодезического обоснования и при необходимости его периодическое восстановление в течение всего периода строительства инженерного сооружения;
- производство высокоточных инженерно-геодезических работ при эксплуатации инженерного сооружения и применяемого оборудования.

Указанный состав инженерно-геодезических работ достаточно хорошо разработан и применяется в настоящее время на промплощадках в условиях наличия грунтов с сезонным их промерзанием. Применительно же к вечномерзлым грунтам его использование требует проведения дальней-

ших исследований в части разработки методики создания геодезического обоснования и обеспечения стабильности пунктов этого обоснования на разных этапах его создания. К таким условиям, в нашем случае, относится промплощадка Няганской ГРЭС (НГРЭС).

Площадка под строительство Няганской ГРЭС площадью 302,2 га (территория строительной площадки занимает 196000 кв. м) находится в 6 км от г. Нягань. По данным инженерно-геологических изысканий площадка до глубины от 5,00 до 10,00 м в основном сложена глинистыми грунтами, предрасположенными к морозному пучению и относящимися к средне- и сильнопучинистым. В северо-западной части площадки отмечается наличие многолетнемерзлых грунтов. Мерзлотные процессы прослеживаются в виде небольших по площади бугров пучения. Высота бугров от дневной поверхности составляет от 0,50 до 1,20 м. Многолетнемерзлые грунты прослеживаются на глубину от 1,40 до 5,10 м от дневной поверхности. Представлены они твердомёрзлым слабо- и среднеразложившимся торфом. В двух скважинах было обнаружено наличие пластичномёрзлого суглинка. Нормативная глубина промерзания для района строительства составляет: для глин и суглинков 2,40 м; для супесей и песков 2,90 м; для торфа 0,80 м.

С учетом рассмотренных условий встает задача разработки схемы создания внешней планово-высотной основы (ПВО), разбивочной сети сгущения и сети для проведения монтажа оборудования и дальнейшей его эксплуатации. При этом необходимо учитывать величину промерзания грунта, его морозное пучение и возможность появления грунтовых вод под главным корпусом ТЭС.

В начале строительства на территории Няганской ГРЭС применяется классический подход для создания планово-высотной основы в виде строительной сетки и грунтовых реперов [3, 4].

В табл. 1 указаны этапы создания геодезической основы классическим методом.

На первом этапе происходит передача координат от пунктов государственной геодезической сети (ГГС) на несколько пунктов строительной сетки [4–6].

Так как ошибка взаимного положения пунктов ГГС больше, чем величина допустимой ошибки взаимного положения пунктов сетки, то на промплощадке принимается условная система координат – строительная система координат (ССК). Направление осей координат выбирается параллельно главным осям инженерных сооружений [6, 7].

Для контроля выноса координат часто измерения повторяются при помощи глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС). Расхождение координат между двумя способами передачи плановой основы не превышает от 3 до 5 мм [8, 9].

Затем производится перенос высотной основы на грунтовые репера. Для этого от пунктов ГГС прокладываются нивелирные хода II класса.

В процессе нивелирования необходимо охватить все репера замкнутыми ходами, опирающимися как минимум на три пункта ГГС.

Таблица 1. Классическая схема создания геодезического обоснования

Table 1. Classical scheme of developing geodetic control

№	Этапы создания геодезической основы Stages of development of geodetic base	Методы, используемые при создании геодезической основы Methods used for developing the geodetic base
1	Создание проекта развития планово-высотной основы Development of the project of vertical and horizontal base	Изыскательские работы, рекогносцировка и закладка геодезических пунктов Exploration, reconnaissance survey and establishment of geodetic points
2	Передача координат в район строительства от пунктов государственной геодезической сети или местной системы координат Coordinate data transmission from State Geodetic Network or local coordinate system	Хода полигонометрии, засечки (прямая угловая, обратная угловая и пр.), спутниковые методы Traverses, sights (direct angular, back angular etc.), satellite techniques
3	Развитие геодезической основы в виде строительной сетки Development of geodetic base in the form of construction netting	Хода полигонометрии Traverses
4	Сгущение геодезической основы – создание внешней разбивочной сети Thickening geodetic base – development of external demarcation	Способ полярных координат Polar coordinate method
5	Создание внутренней разбивочной сети Development of inner mark out network	Способ полярных координат, метод вертикального проектирования Coordinate method, vertical design method

Для сгущения планово-высотной сети используются пункты строительной сетки (ПСС) [4]. Строительная сетка имеет размеры 200×200 м (рис. 1). Вынос ПСС в натуру выполняется при помощи спутниковых измерений [10]. Сами пункты изготавливаются из нержавеющей металла размером 15×15 см. Заложение ПСС проводится в вершины квадратов строительной сетки. После установки ПСС через два месяца на них передается планово-высотная основа, выполняются линейно-угловые измерения и производится их редуцирование. На каждой пластине высверливается центр, которому присваиваются пространственные координаты [3].

Для главного корпуса ГРЭС дополнительно создается внешняя разбивочная основа [3, 7] (4 этап, табл. 1). Вокруг каждого из главных корпусов закладываются по четыре–шесть пунктов ПСС (Г-1,...Г-12, рис. 1). После этого планово-высотная основа переносится на эти пункты с ошибкой взаимного положения ±5 мм. Для обеспечения этой

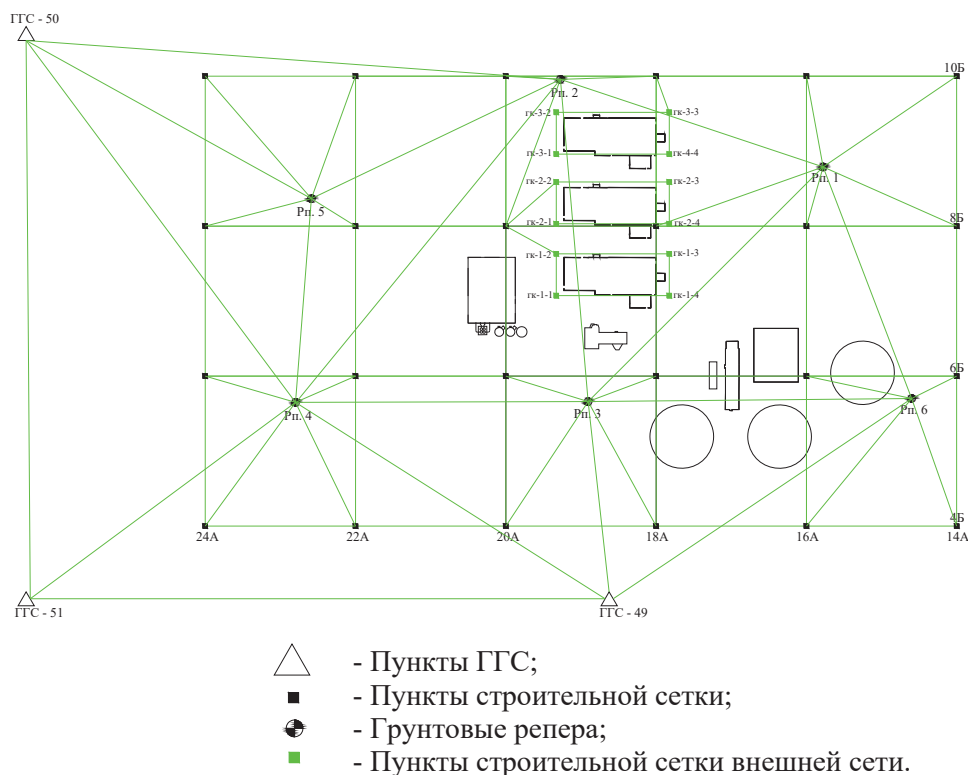


Рис. 1. Схема создания геодезической основы по классической схеме

Fig. 1. Diagram of development of geodetic base on the classical pattern

точности координаты передаются от пунктов строительной сетки на один пункт внешней сети сооружения, а затем по всем четырем–шести пунктам прокладывается замкнутый тахеометрический ход. После чего уравниваемые координаты присваиваются данным пунктам [3].

Достоинством классической схемы является простота и сравнительно невысокая цена установки ПСС и грунтовых реперов.

Недостатками классической схемы являются:

- а) выбранная конструкция грунтовых реперов не удовлетворяет условиям наличия на строительной площадке вечномерзлых грунтов, так как она лишена опорной части внизу и боковых сил сцепления с грунтом по бокам. Из-за отсутствия скальных пород на глубине заложения реперов в каждом случае якорь реперной трубы помещается в грунт с неизвестными свойствами (в основном в песок). Поскольку в данной конструкции труба опирается всем весом только на якорь, устойчивость репера полностью зависит от несущей способности грунта в каждом конкретном случае. В весенне-осенний период происходит затопление грунтовых реперов тальми водами (рис. 2).
- б) использование ПСС в качестве пунктов планово-высотной основы также не удовлетворяет геологическим условиям строительной площадки, так как в межсезонный период ПСС заметно изменяют свое плановое и высотное положение; перемещение отдельных пунктов дости-

гает 42 мм. Это обусловлено таянием или морозным пучением грунта, близкой работой строительной техники, а зачастую и наездами этих механизмов на пункты (рис. 3);

- в) каждый пункт ПСС имеет только одну верхнюю точку с известными координатами.

С учетом указанных недостатков классической схемы нами разработана и внедрена схема, основанная на многоцелевом использовании конструкций пунктов сети (табл. 2). Эта схема учитывает состояние грунтов и особенно тот факт, что они в основном вечномерзлые [11, 12].

На первом этапе учитываются данные, полученные при проведении комплекса изыскательных работ. После анализа и принятия решение о создании технико-экономического обоснования строительства приступают к рекогносцировке плано-высотной геодезической основы [13, 14].

На втором этапе производится создание геодезического обоснования на промплощадке. Для обеспечения надежной и долговечной плано-высотной основы площадки строительства ГРЭС предлагается использовать разработанные нами опорные геодезические пункты (ОГП) [3].

Рассмотрим схему конструкции ОГП, которая представлена на рис. 4. Она представляет собой стандартную железобетонную сваю длиной 12 м. Высота такой сваи после установки должна быть выше вертикальной планировки благоустройства территории примерно от 1,0 до 1,3 м.



Рис. 2. Общий вид грунтового репера № 3

Fig. 2. General view of ground benchmark no. 3



Рис. 3. Внешний вид ПСС после наезда гусеничной техники

Fig. 3. Layout of construction netting points after track machine runover

Таблица 2. Предлагаемая схема создания геодезической разбивочной основы

Table 2. Proposed scheme of developing geodetic control network

Этапы создания геодезической основы Stages of development of geodetic base	Методы, используемые при создании геодезической основы Methods used for developing the geodetic base
Создание проекта развития планово-высотной основы Development of the project of vertical and horizontal base	Изыскательские работы, рекогносцировка и закладка геодезических пунктов Exploration, reconnaissance survey and establishment of geodetic points
Передача координат на промплощадку от пунктов государственной геодезической сети или местной системы координат на опорные или универсальные геодезические пункты Coordinate data transmission to the industrial site from State Geodetic Network or local coordinate system to fundamental or universal geodetic points	Хода полигонометрии, засечки (прямая угловая, обратная угловая и пр.), спутниковые методы Traverses, sights (direct angular, back angular etc.), satellite techniques

После достижения нужной глубины с помощью распорок и домкратных рам данная конструкция фиксируется неподвижно.

Затем под установку обсадной трубы вокруг сваи диаметром 0,6 м разрабатывается скважина глубиной от 1,5 м до 2 м. Дно скважины утрамбо-



Сверху сваи устанавливается столик размером 200×200 мм со станвым винтом. С целью расширения возможностей пункта на каждой стороне сваи устанавливаются металлические пластины, и к ним приклеиваются отражающие пленки (ОП-90). Для обеспечения возможности восстановления поврежденных отражающих пленок на металлической пластине штихелем наносится перекре-

стие и затем, при необходимости, приклеивается новая отражающая пластина, после совмещения ее краев с начерченными линиями. Непосредственно у земли сооружается реперная головка, на которую будет передаваться отметка от репера.

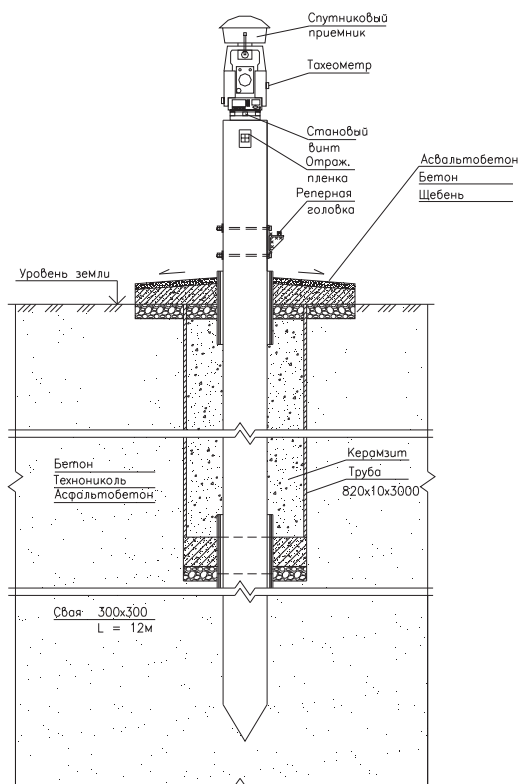


Рис. 4. Схема опорного геодезического пункта

Fig. 4. Fundamental geodetic point (FGP) design

После установки ОГП на отражающие пленки, становой винт и реперную головку передаются координаты. Для этого от пунктов государственной геодезической сети (ГГС) прокладываются ходы до каждого ОГП с точностью не хуже полигонометрии 1-го разряда. Вследствие этого на промплощадке образуется сеть из замкнутых треугольников (рис. 5).

Как и в первой схеме на промплощадке принимается условная система координат. Направление осей координат также выбирается параллельно главным осям инженерных сооружений [3].

Для контроля выноса координат измерения повторяются при помощи ГНСС. Если расхождение координат между двумя способами создания плановой основы не превышает 3–5 мм, производится перенос высотной основы на ОГП. Для этого от пунктов ГГС на реперную головку и столик прокладываются нивелирные хода II класса, а на перекрестье каждой отражающей пленки отметка передается с точностью нивелирования IV класса. В процессе выполнения нивелирования в ходы необходимо включать все пункты сети.

Таким образом, предлагаемая конструкция опорного геодезического пункта позволяет произ-

водить сгущение и разбивочные работы спутниковыми, линейно-угловыми и высотными измерениями [3, 10, 12].

Его конструкция обеспечивает применение:

- тахеометра с принудительным центрированием;
- спутниковых измерений;
- тахеометра и спутникового приемника (например, Leica TPS 1200+);
- предлагаемого пункта для решения обратной линейно-угловой засечки методом «свободной станции»;
- высотного репера для наблюдения за осадками и деформациями сооружений ГРЭС;
- контроля устойчивости пунктов сети, перед началом выполнения разбивочных работ.

Если для создания обоснования или выполнения разбивочных работ используется только тахеометр, то после его принудительного центрирования на пункте измерения могут выполняться способом полярных координат или координатным способом.

При использовании только спутниковых технологий приемник также принудительно центрируется на пункте, после чего производится дальнейшее сгущение сети или разбивочные работы. Совместное применение тахеометра и спутникового приемника позволяет производить измерения одним или сразу двумя способами [3].

Для реализации метода «свободной станции» используются принудительно отцентрированные на пункте отражатели или светоотражающие пленки.

Для наблюдения за осадками и деформациями сооружений и оборудования в качестве исходной высотной основы используется репер, расположенный внизу сваи. При применении тахеометра из тригонометрического нивелирования определяется также и отметка пунктов сети сгущения или разбивочной основы.

Таким образом, использование пунктов такой конструкции значительно облегчает геодезическое обеспечение строительства и повышает точность определения координат исходных и определяемых пунктов. Важным достоинством предлагаемой конструкции пункта является тот факт, что на нем имеются координаты шести точек, в то время как пункт строительной сетки имеет только одну точку. Это позволяет производить установку тахеометра и выполнять измерения практически в любой точке промплощадки.

Создание планово-высотной основы с использованием ОГП позволяет проводить деформационный мониторинг как на этапе строительномонтажных работ, так и при эксплуатации основных объектов ТЭС.

Согласно нормативным документам к обязательным объектам, подлежащим деформационному мониторингу, в частности наблюдению за осадками и деформациями, относятся [14–18]:

- здания (главный корпус ТЭС; здания дробильных устройств; многоэтажный административ-

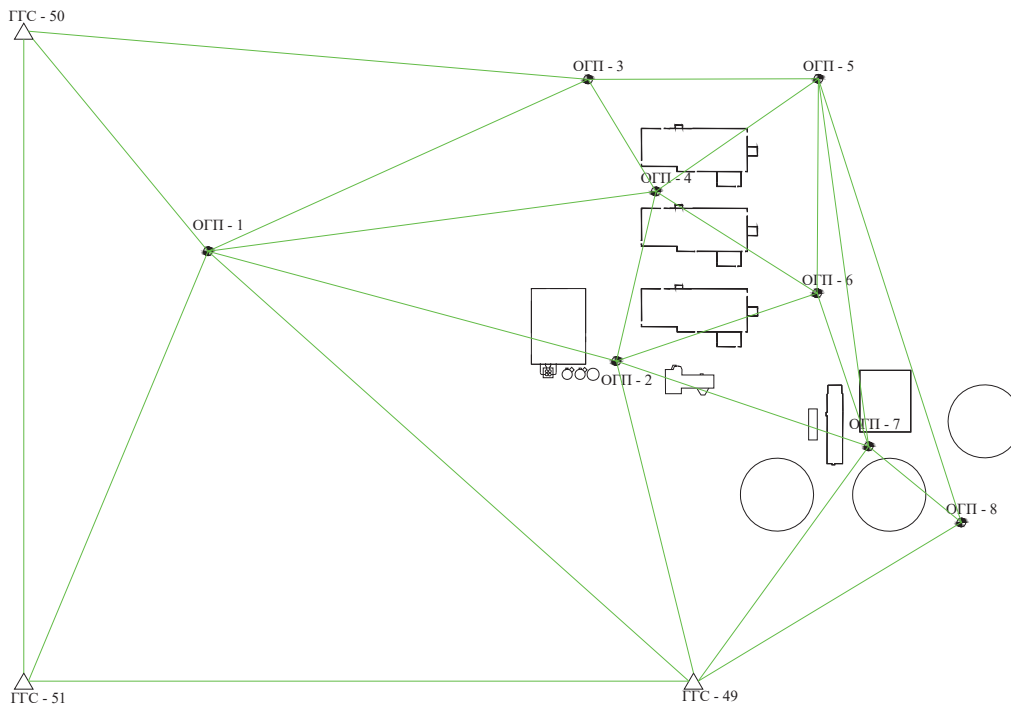


Рис. 5. Схема создания обоснования с применением ОГП

Fig. 5. Diagram of development of background applying FGP

ный корпус; береговые насосные станции; здания водоподготовительной установки с баками на опорах);

- сооружения (дымовые трубы; градирни; опоры эстакад топливоподдачи; опоры эстакад технологических трубопроводов; фундаменты под турбоагрегаты; фундаменты под котлы; фундаменты под дробилки; резервуары для хранения мазута 10000 м³ и более; плотины водохранилища).

Градирни являются одним из наиболее эффективных устройств, предназначенных для охлаждения воды в системах оборотного водоснабжения промышленных предприятий [19]. В зависимости от конструкции каркаса, градирни делятся на прямоугольные (рис. 6) и башенные (рис. 7).

В градирнях с прямоугольным каркасом охлаждение воды происходит за счет вентиляторных установок, расположенных на верхнем ярусе градирни (рис. 8).

Вентиляторная установка градирни состоит:

- из электродвигателя, установленного на раме; рама путем болтового соединения прикреплена к металлическому каркасу градирни;
- приводного вала; одним концом вал муфтой соединен с электродвигателем, другим концом муфтой соединен с редуктором;
- углового редуктора, установленного на раме; рама путем болтового соединения прикреплена к металлическому каркасу градирни;
- рабочего колеса, жестко посаженного на выходном валу редуктора;

- выходного диффузора, установленного на кольцевой балке; балка болтами крепится к каркасу градирни.

В подвижных элементах вентиляторной установки возможно возникновение вибрации, которая оказывает влияние на основное оборудование градирни. Вследствие чего возникает аварийная ситуация и выход из строя основного оборудования [18].

В градирнях с конструкцией башенного каркаса тяга воздуха, охлаждающего циркулирующую воду, создается за счет высокой вытяжной башни.

Вытяжные башни служат для создания естественной тяги благодаря разности удельных весов воздуха, поступающего в градирню, и нагретого воздуха, выходящего из градирни. В настоящее время высота башенного каркаса достигает 60–150 м. При данной высоте вытяжной башни необходимо контролировать ее вертикальное положение [17].

В данном случае при любой форме каркаса градирни необходимо проводить деформационный мониторинг.

В деформационный мониторинг эксплуатируемых градирен входит:

- сбор и анализ данных о проведении предыдущих циклов деформационного мониторинга;
- определение осадки и деформации градирни;
- определение пространственного положения каркаса градирни, при различной мощности основного оборудования градирни.

На основе практического опыта проведения деформационного мониторинга в условиях вечно-



a/a



б/б

Рис. 6. Основные виды градирен прямоугольной формы с вентиляторной установкой на крыше: а) сухая градирня Серовской ГРЭС; б) шестисекционная градирня

Fig. 6. Main types of rectangular cooling towers with fan system on the roof: a) dry cooling tower of Serovsk region power station; b) six section cooling tower



Рис. 7. Общий вид башенных градирен с металлическим (слева) и железобетонным (справа) каркасами

Fig. 7. General view of chimney-type cooling power with metal (left) and reinforced concrete (right) frames

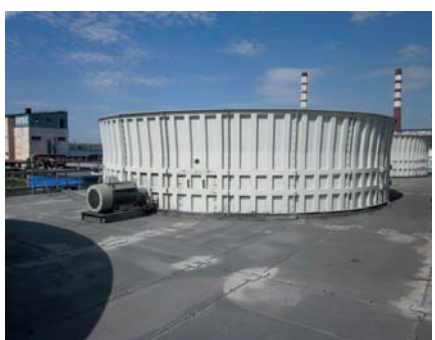


Рис. 8. Расположение вентиляторных установок

Fig. 8. Fan installation location

мерзлых грунтов на действующих энергетических объектах Няганской ГРЭС и Серовской ГРЭС были разработаны технологические схемы деформационного мониторинга эксплуатируемых градирен (рис. 9).

Первый этап деформационного мониторинга. Важным этапом при сборе и анализе данных о предыдущих циклах деформационного мониторинга является достоверность полученной информации. Встречаются не профильные организации, выполнявшие работы по наблюдению за осадками и деформации градирен, которые оши-

бочно определяют фактическое положение градирни.

В связи с этим рекомендуем выполнять контрольные циклы деформационного мониторинга способом высокоточного геометрического нивелирования короткими лучами по осадочным маркам, расположенным на монолитных фундаментах или колоннах каркаса градирни по программе I или II классов [18, 19].

В качестве примера на рис. 10 представлена схема нивелирного хода по доступным осадочным маркам каркаса градирни.

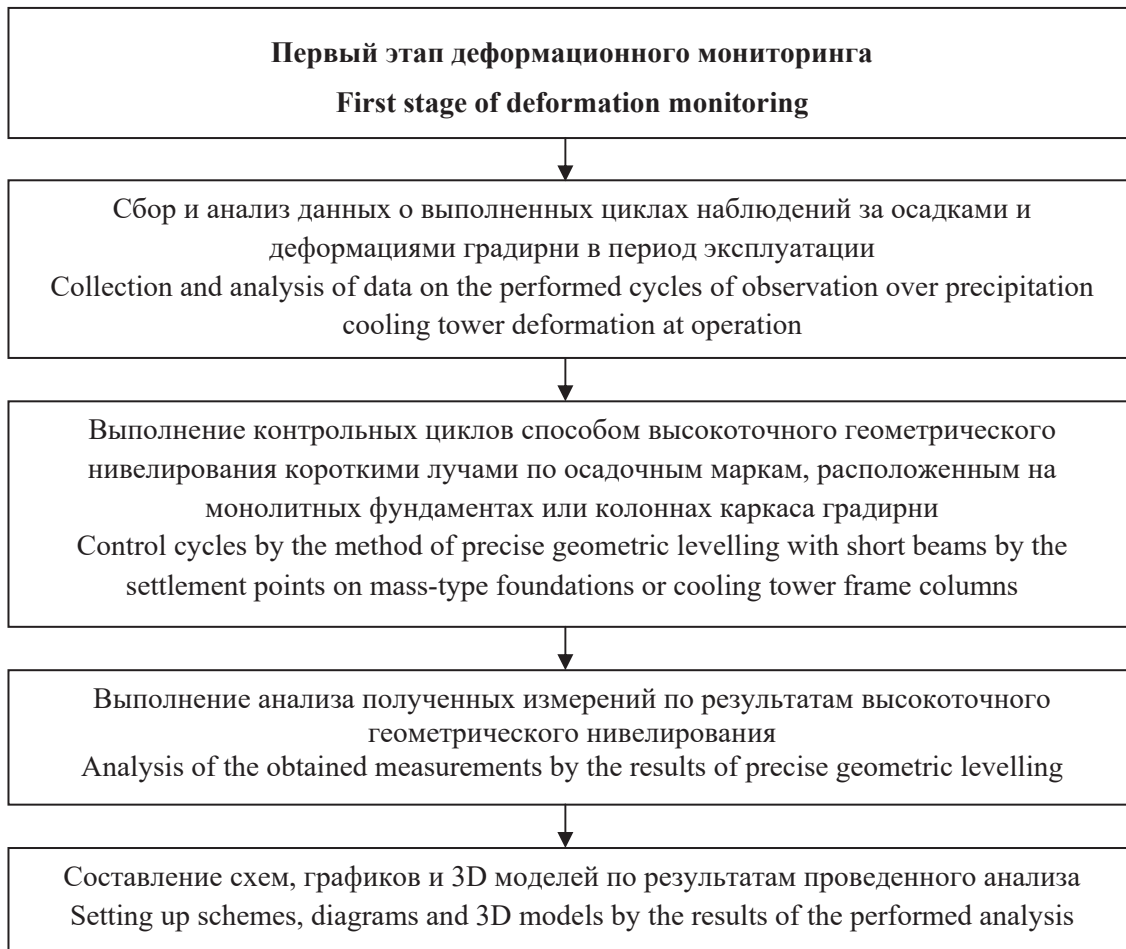


Рис. 9. Технологическая схема первого этапа деформационного мониторинга

Fig. 9. Processing chart of the first stage of deformation monitoring

Далее выполняется анализ полученных измерений по результатам высокоточного геометрического нивелирования. На основе этих данных составляются схемы, графики и 3D модели деформационного состояния фундаментов каркаса градирни [20–22].

На втором этапе деформационного мониторинга определяется пространственное положение каркаса при различной нагрузке основного оборудования градирни [19, 21, 22] (рис. 11).

Перед началом выполнения измерений необходимо провести рекогносцировку пунктов планово-высотной основы на территории эксплуатируемой градирни. Часто данные пункты после введения в эксплуатацию градирен утрачиваются. В таком случае необходимо создавать планово-высотную основу в станционной системе координат или условной системе координат.

Данная система создается с помощью пленочных отражателей ОП-50, так как является менее трудозатратной и экономически целесообразной [23]. Далее система уравнивается в программном продукте Credo, и уравненные координаты присваиваются пленочным отражателям. Сходимость

взаимного положения в созданной системе должна быть не грубее 1 мм. Перед началом проведения циклов деформационного мониторинга необходимо провести маркирование характерных точек каркаса градирни. Для этого используется кернение, окраска маркерами или установка пленочных отражателей.

Затем приступают к выполнению циклов деформационного мониторинга при различной номинальной мощности основного оборудования градирни согласно технологической схеме второго этапа деформационного мониторинга (рис. 10).

Завершающим этапом проведения деформационного мониторинга является анализ полученных данных по результатам полевых измерений и выявление недопустимых отклонений пространственного положения каркаса градирни [19, 21, 22].

Деформационный мониторинг необходимо проводить и в зимний период, т. к. происходит существенное обледенение несущих колонн каркаса градирни. Возникает дополнительная нагрузка, что может повлечь за собой деформации каркаса (рис. 12).

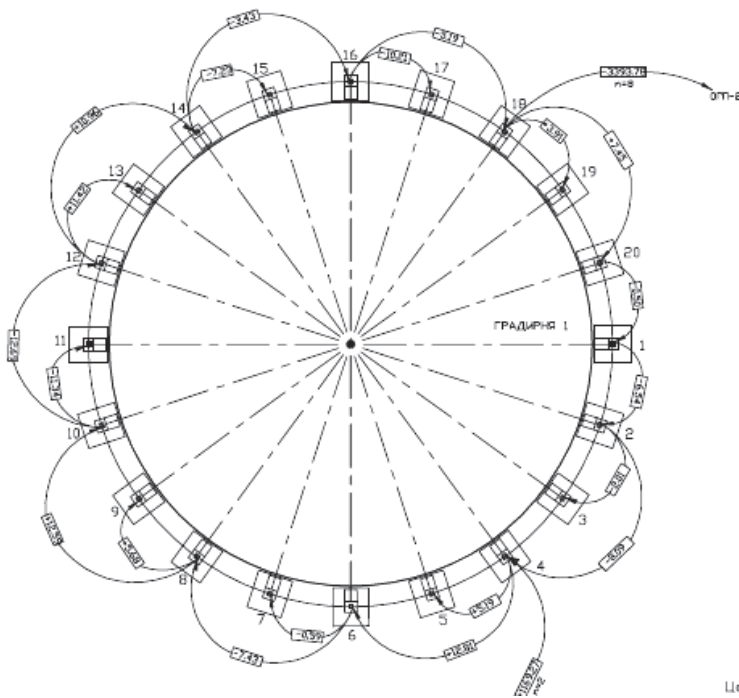


Рис. 10. Схема нивелирного хода

Fig. 10. Levelling line diagram



Рис. 11. Технологическая схема второго этапа деформационного мониторинга

Fig. 11. Process scheme of the second stage of deformation monitoring



Рис. 12. Каркас градирни в зимний период

Fig. 12. Cooling tower frame in winter

Заключение

1. Использование ОГП значительно облегчает деформационный мониторинг в условиях вечномёрзлых грунтов. Важным достоинством предлагаемой конструкции пункта является тот факт, что на нем имеются координаты шести точек, в то время как пункт строительной сетки имеет только одну точку. Это позволяет производить установку тахеометра и выполнять измерения практически в любой точке промплощадки. Выбранная конструкция ОГП позволяет сохранить стабильное планово-высотное положения в данных физико-геологических условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 31937–2011 Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. URL: http://www.spbgasu.ru/upload-files/users/iastahov/norm/GOST_31937-2011_.pdf (дата обращения: 10.12.2017).
2. Aydin S. Power of global test in deformation analysis // Journal of Surveying engineering. – 2012. – V. 138. – № 2. – P. 51–56.
3. Behr J.A., Hudnut K., King N. Monitoring structural deformation at Pacoima dam, California, using continuous GPS // Proc. of ION-GPS98. – Nashville TN, USA, September 15–18, 1998. – P. 59–68.
4. СП 47.13330.2016. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения (Engineering survey for construction. Basic principles). Актуализированная редакция СНиП 11–02–96. – М.: Минрегион России, 2016. – 141 с.
5. Жуков Б.Н. Геодезический контроль сооружений и оборудования промышленных предприятий: монография. – Новосибирск: СГГА, 2003. – 356 с.
6. Инженерно-геодезические работы для проектирования и строительства энергетических объектов / А.А. Карлсон, Л.И. Пик, О.А. Пономарев, В.И. Сердюков. – М.: Недра, 1986. – 349 с.
7. ГОСТ 24846–2012 Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-24846-2012> (дата обращения: 10.12.2017).
8. Analysis of Thermal Deformations of an Arched Theatre Ceiling / A. Eichhorn, J. Fabiankowsch et al. // FIG Working Week 2007. – Hong Kong, China, May 13–17, 2007. URL: http://www.fig.net/pub/fig2007/papers/ts_1f/ts01f_01_eichhorn_etal_1279.pdf (дата обращения: 10.12.2017).

2. Данные этапы деформационного мониторинга позволяют определить пространственное положение каркаса разной формы и компоновки основного оборудования эксплуатируемой градирни.
3. Разработанная методика позволяет определить пространственное положение каркаса градирни при различных режимах работы основного оборудования от 0 до 100 % мощности, со среднеквадратической ошибкой не более 2,0 мм.
4. Разработанная методика деформационного мониторинга была внедрена в процесс эксплуатации градирен на трех пусковых комплексах Няганской ГРЭС и Серовской ГРЭС.

9. Аврунев Е.И. Анализ стабильности исходных пунктов на основании спутниковых определений в геодезической сети сгущения // Гео-Сибирь-2010. Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия: VI Международный научный конгресс: сб. материалов. – Новосибирск: СГГА, 2010. – Ч. 2. – С. 127–133.
10. Zienkiewicz M., Hejbudzka K., Dumalski A. Multi split functional model of geodetic observations in deformation analyses of the Olsztyn Castle // Acta Geodyn. Geomater. – 2017. – V. 14. – № 2 (186). – P. 195–204. DOI: 10.13168/AGG.2017.0003
11. Методика развития ПВО с использованием элементов строительных конструкций / Г.Г. Китаев, В.Г. Сальников, Н.М. Рябова, Е.Л. Соболева // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Международный научный конгресс. Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия: Междунар. науч. конф.: сб. материалов в 2 т. Т. 1. – Новосибирск, 8–18 апреля 2014. – Новосибирск: СГГА, 2014. – С. 7–13.
12. Олейник А.М. Выбор мест закладки грунтовых реперов с учетом прогнозного изменения геокриологической обстановки от техногенной деятельности // ГЕО-Сибирь-2011. VII Международный научный конгресс. Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия: Междунар. науч. конф.: сб. материалов в 6 т. – Новосибирск, 19–29 апреля 2011. – Новосибирск: СГГА, 2011. – Т. 1. – Ч. 1. – С. 37–40.
13. Афонин Д.А. Оптимизационная модель выбора схемы плановой геодезической разбивочной сети на застроенной террито-

- рии // Геодезия и картография. – 2011. – № 9. – С. 16–22.
14. РД 34.21.322–94. Методические указания по организации и проведению наблюдений за осадками фундаментов и деформациями зданий и сооружений строящихся и эксплуатирующихся тепловых электростанций. – М.: Оргрэс, 1997. – 63 с.
 15. Hiller B., Jambaev H. Development and natural tests of automated systems of deformation monitoring // Vestnik SSUGT. – 2016. – Iss. 1 (33). – P. 48–61.
 16. СО 153–34.21.322–2003. Методические указания по организации и проведению наблюдений за осадками фундаментов и деформаций зданий и сооружений строящихся и эксплуатируемых тепловых электростанций. – М.: ЦПТИиТО ОРГРЭС, 2003. – 45 с.
 17. Measurement of Structural Deformation using Terrestrial Laser Scanners / S. Gordon, D. Lichti, J. Franke, M. Stewart // 1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering. – Nottingham, U.K., 2004. – 16 p.
 18. Гурьев В.В., Стражников А.М. О проблемах безопасной эксплуатации большепролетных зданий и сооружений // Промышленное и гражданское строительство. – 2007. – № 5. – С. 35–36.
 19. Новиков В.Ю. Применение деформационного мониторинга для предотвращения аварий промышленных объектов // Экология и промышленность России. – 2014. – № 2. – С. 46–48.
 20. Mill T., Ellmann A. Terrestrial Laser Scanning Technology for Deformation Monitoring of a Large Suspension Roof Structure // INGENEO 2014 – 6th International Conference on Engineering Surveying. – Prague, Czech Republic, April 3–4, 2014. – P. 179–186.
 21. Terrestrial laser scanning technology for deformation monitoring and surface modeling of arch structures / Hao Yang, Mohammad Omidalizandi, Xiangyang Xu, Ingo Neumann // Composite Structures. – 2017. – № 169. – P. 173–179.
 22. Measurement of dam deformations by terrestrial interferometric techniques / M. Alba, L. Fregonese et al. // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. V. XXXVII. P. B1. – Beijing, 2008. – P. 133–139. URL: www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/1_pdf/23.pdf (дата обращения: 10.12.2017).
 23. Zienkiewicz M.H., Baryla R. Determination of vertical indicators of ground deformation in the Old and Main City of Gdansk area by applying unconventional method of robust estimation // Acta Geodyn. Geomater. – 2015. – № 3 (179). – P. 249–257.

Поступила 07.02.2018 г.

Информация об авторах

Уставич Г.А., доктор технических наук, профессор кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела Сибирского государственного университета геосистем и технологий.

Аврунев Е.И., кандидат технических наук, заведующий кафедрой кадастра и территориального планирования Сибирского государственного университета геосистем и технологий.

Сальников В.Г., кандидат технических наук, зав. кафедрой инженерной геодезии и маркшейдерского дела Сибирского государственного университета геосистем и технологий.

Попов В.К., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и землеустройства Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 528.02

FEATURES OF DEFORMATION MONITORING OF ENGINEERING STRUCTURES IN PERMAFROST CONDITIONS

Georgy A. Ustavich¹,

ystavich@mail.ru

Evgeny I. Avrunev¹,

avrynev_ei@ngs.ru

Valery G. Salnikov¹,

salnikov@ssga.ru

Viktor K. Popov²,

pvk@tpu.ru

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies,
10, Plakhotny street, Novosibirsk, 630108, Russia.

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

Relevance. Nowadays the list of engineering geodetic survey with the soils with seasonal frost, which has been developed and applied now, require further studies of permafrost soils relating to development of technique of generating geodetic control and delivering stability of this control sections at different stages of its development. These issues are of great importance at construction and operation of energy sites at permafrost soils.

The aim of the research is to develop and introduce the process chart of developing stable field compilation survey under conditions of permafrost soils at Nyagan and Seversk District Power Plants (Nyagan, Khanty-Mansiisk autonomous district).

Subjects: ground benchmarks, construction netting items, fundamental geodetic points, general geodetic points, permafrost soils.

Methods: free station method, back linear-angular sight, satellite observations, determination of space position of cooling tower frame, geometric levelling by short beams, observation over precipitation and deformation of buildings, constructions and main equipment.

Results. The authors have proposed the processing chart of geodetic monitoring in permafrost soils. The paper introduces the diagram of fundamental geodetic point, which is capable of conserving stable space position during construction and installation activities and at operation of power plants. The authors developed the technique of deformation monitoring of cooling tower with different frame shape. The developed technique allows determining the space position of the cooling tower frame at different operation modes of the main equipment with power from 0 to 100 %, with root-mean square error not more than 2,0 mm.

Key words:

Horizontal and vertical survey, turbine, chimney-type cooling tower, geometric levelling, tacheometer, deformation monitoring.

REFERENCES

1. GOST 31937–2011 Zdaniya i sooruzheniya. Pravila obsledovaniya i monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya [State Standard 31937–2011 Buildings and structures. Rules of investigation and monitoring of technical condition]. Available at: [http://www.spbgasu.ru/upload-files/users/iastahov/norm/GOST_31937–2011_.pdf](http://www.spbgasu.ru/upload-files/users/iastahov/norm/GOST_31937-2011_.pdf) (accessed: 10 October 2017).
2. Aydin C. Power of global test in deformation analysis. *Journal of surveying engineering*, 2012, vol. 138, no. 2, pp. 51–56.
3. Behr J.A., Hudnut K., King N. Monitoring structural deformation at Pacoima dam, California, using continuous GPS. *Proc. of ION-GPS98*. Nashville TN, USA, September 15–18, 1998. pp. 59–68.
4. SP 47.13330.2016. Inzhenerye izyskaniya dlya stroitelstva. Osnovnye polozeniya [SR 47.13330.2016. Engineering survey for construction. Basic principles]. Moscow, Minregion Russia Publ., 2016. 141 p.
5. Zhukov B.N. Geodezichesky kontrol sooruzheny i oborudovaniya promyshlennykh predpriyaty: monografiya [Geodetic control of structures and equipment at enterprises: monography]. Novosibirsk, SGGa Publ., 2003. 356 p.
6. Karlson A.A., Pik L.I., Ponomarev O.A., Serdyukov V.I. Inzhenerno-geodezicheskie raboty dlya proektirovaniya i stroitelstva energeticheskikh obektov [Engineering and geodetic operations for design and construction of power objects]. Moscow, Nedra Publ., 1986. 349 p.
7. GOST 24846–2012 Grunty. Metody izmereniya deformatsy osnovany zdany i sooruzheny [State Standard 24846–2012 Soils. Methods of measuring deformation of building bases]. Available at: [http://docs.cntd.ru/document/gost-24846–2012](http://docs.cntd.ru/document/gost-24846-2012) (accessed: 10 December 2017).
8. Eichhorn A., Fabiankowitsch J. Analysis of Thermal Deformations of an Arched Theatre Ceiling. *FIG Working Week 2007*. Hong Kong, China, May 13–17, 2007. Available at: http://www.fig.net/pub/fig2007/papers/ts_1f/ts01f_01_eichhorn_etal_1279.pdf (accessed: 10 October 2017).
9. Avrunev E.I. Analiz stabilnosti iskhodnykh punktov na osnovanii sputnikovykh opredeleny v geodezicheskoy seti sgushcheniya [Analysis of initial points stability based on satellite definitions in geodetic fine grid]. *Geo-Sibir-2010. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya: VI Mezhdunarodny nauchnyy congress* [Geo-Sibir-2010. Geodetics, geoinformatics, mapping, mine surveying. VI International Scientific congress. Proc.]. Novosibirsk, SGGa Publ., 2010. P. 2. pp. 127–133.
10. Zienkiewicz M., Hejbudzka K., Dumalski A. Multi split functional model of geodetic observations in deformation analyses of the Olsztyn Castle. *Acta Geodyn. Geomater.*, 2017, vol. 14, no. 2 (186), pp. 195–204. DOI: 10.13168/AGG.2017.0003

11. Kitaev G.G., Salnikov V.G., Ryabova N.M., Soboleva E.L. Metodika razvitiya PVO s ispolzovaniem elementov stroitelnykh konstruktov [Method of PVO development using structural building components]. *Interespo GEO-Sibir-2014. X Mezhdunarodny nauchnyy kongress. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya* [GEO-Sibir-2014. Geodetics, geoinformatics, mapping, mine surveying. X International Scientific congress. Proc.]. Novosibirsk, 8–18 April 2014. Novosibirsk, SGGa Publ., 2014. pp. 7–13.
12. Oleynik A.M. Vybór mest zakladki gruntovykh reperov s uchétom prognoznoy izmeneniya geokriologicheskoy obstanovki ot tekhnogennoy deyatel'nosti [Selection of places for filling ground benchmarks considering prospecting changes in permafrost environment because of technogenic activity]. *Interespo GEO-Sibir-2011. VII Mezhdunarodny nauchnyy kongress. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya* [GEO-Sibir-2014. Geodetics, geoinformatics, mapping, mine surveying. X International Scientific congress. Proc.]. Novosibirsk, 19–29 April 2011. Novosibirsk, SGGa Publ., 2011. Vol. 1, P. 1, pp. 37–40.
13. Afonin D.A. Optimization model of selecting the scheme of planning geodetic mark out network in the built-up area. *Geodeziya i kartografiya*, 2011, no. 9, pp. 16–22. In Rus.
14. RD 34.21.322–94. *Metodicheskie ukazaniya po organizatsii i provedeniyu nablyudeny za osadkami fundamentov i deformatsiyami zdaniy i sooruzheny stroyashchikhsya i ekspluatiruyushchikhsya teplovykh elektrostantsy* [RD 34.21.322–94. Guidelines in organization and performance of observations over settlement of foundations and deformation of buildings and structures of power stations]. Moscow, Orgres Publ., 1997. 63 p.
15. Hiller B., Jambaev H. Development and natural tests of automated systems of deformation monitoring. *Vestnik SSUGT*, 2016, Iss. 1 (33), pp. 48–61.
16. SO 153–34.21.322–2003. *Metodicheskie ukazaniya po organizatsii i provedeniyu nablyudeny za osadkami fundamentov i deformatsii zdaniy i sooruzheny stroyashchikhsya i ekspluatiruyemykh teplovykh elektrostantsy* [SO 153–34.21.322–2003. Guidelines in organization and performance of observations over settlement of foundations and deformation of buildings and structures of power stations]. Moscow, TsTIITO ORGRES Publ., 2003. 45 p.
17. Gordon S., Lichti D., Franke J., Stewart M. Measurement of Structural Deformation using Terrestrial Laser Scanners. *1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering*. Nottingham, U.K., 2004. 16 p.
18. Guryev V.V., Strazhnikov A.M. On the issue of safety use of long-span buildings and constructions. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo*, 2007, no. 5, pp. 35–36. In Rus.
19. Novikov V.Yu. Application of deformation monitoring for preventing accidents at enterprises. *Ekologiya i promyshlennost*, 2014, no. 2, pp. 46–48. In Rus.
20. Mill T., Ellmann A. Terrestrial Laser Scanning Technology for Deformation Monitoring of a Large Suspension Roof Structure. *INGEO 2014 – 6th International Conference on Engineering Surveying*. Prague, Czech Republic, April 3–4, 2014. pp. 179–186.
21. Hao Yang, Mohammad Omidalizarandi, Xiangyang Xu, Ingo Neumann. Terrestrial laser scanning technology for deformation monitoring and surface modeling of arch structures. *Composite Structures*, 2017, no. 169, pp. 173–179.
22. Alba M., Fregonese L. Measurement of dam deformations by terrestrial interferometric techniques. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Beijing, 2008. Vol. XXXVII, P. B1, pp. 133–139. Available at: www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/1_pdf/23.pdf (accessed: 10 December 2017).
23. Zienkiewicz M.H., Baryla R. Determination of vertical indicators of ground deformation in the Old and Main City of Gdansk area by applying unconventional method of robust estimation. *Acta Geodyn. Geomater.*, 2015, no. 3 (179), pp. 249–257.

Received: 7 February 2018.

Information about the authors

Georgy A. Ustavich, Dr. Sc., professor, Siberian State University of Geosystems and Technologies.

Evgeny I. Avrunev, Cand. Sc., head of the department, Siberian State University of Geosystems and Technologies.

Valery G. Salnikov, Cand. Sc., head of the department, Siberian State University of Geosystems and Technologies.

Viktor K. Popov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 550.834; 621.373

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ИНДУКТИВНО-ИМПУЛЬСНОГО ГЕНЕРАТОРА В ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОМ ИСТОЧНИКЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Пустынный Сергей Владимирович¹,
pustynnikov@tpu.ru

Хан Вей²,
whan@jlu.edu.cn

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

² Цзилиньский университет,
КНР, 130012, г. Чанчунь, пр. Чанцзина, 2699.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки новых источников мощных импульсов тока для работы на электрогидравлический излучатель, который может применяться для возбуждения сейсмических волн в невзрывной сейсмо-разведке.

Цель: провести расчетные и экспериментальные исследования работы модели индуктивно-импульсного генератора, использующего обобщенные законы коммутации для получения импульсов тока в активной нагрузке; изучить влияние индуктивной связи катушек на амплитуду и крутизну импульсов тока.

Объекты: лабораторная модель индуктивно-импульсного генератора, имеющего индуктивно связанные катушки индуктивности для увеличения мощности и крутизны импульса тока в линейной активной нагрузке.

Методы: метод переменных состояния для расчета уравнений переходного процесса в цепи после коммутации, составленных по законам Кирхгофа, применение обобщенных законов коммутации для расчета начальных значений токов в катушках индуктивностей и в нагрузке.

Результаты. Разработана схема индуктивно-импульсного генератора, использующего обобщенные законы коммутации для получения мощных импульсов тока в активной нагрузке. Генератор содержит индуктивно-связанные катушки, что позволяет увеличить запасаемую энергию и мощность получаемых импульсов. С помощью метода переменных состояния получена математическая модель работы схемы на линейную активную нагрузку. Проведены расчетные и экспериментальные исследования лабораторной модели схемы. Экспериментальные значения токов в катушках индуктивностей и в нагрузке примерно совпали с расчетными значениями. Длительность полученных импульсов тока в нагрузке и крутизна переднего фронта импульсов тока делают перспективным применение индуктивно-импульсного генератора в сейсморозведке в качестве источника импульсов тока в электрогидравлическом излучателе при работе на взрывающуюся проволочку.

Ключевые слова:

Генератор, импульс тока, математическая модель, катушка индуктивности, коэффициент связи, осциллограмма, сейсморозведка.

Введение

В настоящее время для питания электрофизических установок применяются источники мощных импульсов тока, например [1–4]:

- 1) электростатические (конденсаторы);
- 2) индуктивные накопители;
- 3) инерционные – ударные генераторы, униполярные генераторы;
- 4) электрохимические – аккумуляторные батареи;
- 5) МГД генераторы.

Импульсная энергетическая система состоит из устройств, позволяющих медленно в течение длительного времени запасать энергию, и устройства, позволяющего высвободить её в нагрузку в виде мощного импульсного разряда.

Все применения таких генераторов можно разделить на следующие области:

- 1) электромагнитные ускорители пучков заряженных частиц;
- 2) импульсные лазеры с электрической накачкой;
- 3) опыты по термоядерному синтезу;

- 4) мощные радары;
- 5) мощные микроволны;
- 6) импульсные источники излучения;
- 7) генерация ударных волн;
- 8) обработка и формовка материалов;
- 9) исследования по физике высоких плотностей энергии;
- 10) сейсморозведка с помощью электрогидравлических источников сейсмических колебаний.

При сейсморозведке на акваториях применение взрывов запрещено в целях сохранения фауны, поэтому возбуждение упругих волн производится электроискровыми источниками, газовзрывными установками, пневматическими излучателями, при помощи вибрационных источников [5]. В отличие от взрывов при таком возбуждении волн амплитуда и давление на фронте ударной волны меньше, что оказывается безопасным для фауны [6].

Невзрывная сейсморозведка позволяет упростить производство работ, обеспечить безопасное их проведение для обслуживающего персонала и окружающей среды. К таким методам относится

возбуждение сейсмических волн с помощью электрического разряда в воде, вызывающего импульсное преобразование электрической энергии в энергию упругой волны давления [7–11]. При низком напряжении источника для пробоя межэлектродного промежутка применяют его шунтирование взрывающимися проволочками [12, 13]. Для быстрого взрыва проволочки и возникновения электрогидравлического удара необходимо обеспечить малую длительность и большую крутизну переднего фронта импульса тока [14, 15].

В качестве источника импульсов тока для возбуждения сейсмических колебаний обычно применяют конденсаторные батареи, ударные генераторы. В таблице приведены сравнительные характеристики различных типов первичных накопителей электроэнергии [16].

Таблица. Сравнительные характеристики различных типов первичных накопителей электроэнергии

Table. Comparative descriptions of different types of primary energy stores

Тип накопителя Type of energy store	Плотность энергии, Дж/дм ³ Density of electromagnetic energy, J/dm ³	Предельная энергия, Дж Maximum energy, J	Длительность импульса вывода энергии, с Pulsewidth of energy, s	Удельная мощность импульса, Вт/дм ³ Pulse output power, W/dm ³
Конденсаторы Capacitors	$(0,5-3) \cdot 10^2$	10^7	10^{-6}	$(1-5) \cdot 10^8$
Индуктивные накопители Inductive energy store	10^5	10^8	10^{-1}	$(1-10) \cdot 10^5$
Ударные генераторы Impulse generator	$(1-4) \cdot 10^4$	10^8	10^{-4}	$(3-10) \cdot 10^4$
Аккумуляторы Accumulator battery	$(1-5) \cdot 10^5$	10^8	10^{-3}	$(3-10) \cdot 10^2$

В условиях массогабаритных ограничений, накладываемых требованиями автономности и транспортабельности, энергия конденсаторной батареи относительно невысока и составляет от 5 до 20 кДж при напряжении от 30 до 70 кВ. К недостаткам таких установок следует отнести наличие высокого напряжения, снижающего безопасность работ, и высокочастотный спектр возбуждаемых волн давления, обуславливающий низкий сейсмический КПД [14].

Увеличить энергоёмкость и повысить акустический КПД можно, применяя в качестве накопителя энергии электромагнитный импульсный (ударный) генератор. Впервые исследования применения ударного генератора для возбуждения сейсмических колебаний были выполнены в Томском политехническом университете [17]. Иницирование канала разряда осуществляется предварительным разрядом высоковольтной конденсаторной батареи или при низком напряжении – взрывающимися проволочками. Амплитуда импульса давления определяется величиной тока в момент взрыва

проводника. Установлено, что максимальный гидродинамический эффект достигается в момент, близкий к максимуму тока короткого замыкания ударного генератора [13, 14]. Длительность импульса тока в нагрузке по результатам эксперимента составляла порядка $t_{\text{имп}} \approx 10$ мс, при этом ток короткого замыкания во взрывающейся проволочке до её взрыва имеет синусоидальный передний фронт, что снижает эффективность работы ударного генератора.

Плотность энергии магнитного поля, запасаемой в индуктивных накопителях, на три порядка выше, чем плотность энергии электрического поля, запасаемая в конденсаторах, и на порядок выше, чем в ударных генераторах [16]. Разработанные в настоящее время индуктивные накопители с обычными катушками имеют запасаемую энергию порядка 10^8 Дж и используются в качестве источников импульсных токов для питания мощных ускорителей, импульсной зарядки конденсаторов и формирующих линий. Однако длительность импульса вывода энергии в активную нагрузку из индуктивного накопителя составляет $t_{\text{имп}} \approx 100$ мс, т. е. на порядок больше, чем в ударных генераторах и на пять порядков больше, чем у конденсаторных батарей, что не позволяет формировать импульсы тока большой мощности. Кроме того, передний фронт импульсов тока в активной нагрузке имеет форму экспоненты с невысокой крутизной, что делает их неперспективными для применения в качестве источника в электрогидравлических технологиях, и в частности в сейсморазведке.

Основное внимание в статье уделяется исследованию индуктивно-импульсного генератора, в котором импульс тока при передаче энергии в нагрузку формируется при помощи обобщенных законов коммутации и в котором запасенная энергия увеличивается при помощи индуктивной связи катушек индуктивности [18]. В активной нагрузке формируется импульс тока, имеющий крутой передний фронт и длительность, соизмеримую с длительностью импульсов от ударного генератора, что делает индуктивно-импульсный генератор перспективным в качестве источника импульса тока в сейсморазведке при работе на взрывающуюся проволочку.

Постановка задачи

На рис. 1 представлена схема индуктивно-импульсного генератора, использующего обобщенные законы коммутации для получения импульсов тока в нагрузке. До размыкания ключа K энергия постоянного источника ЭДС E запасается в катушках индуктивности $R_1, L_1, R_2, L_2, R_3, L_3$. Индуктивности L_3 и L_4 имеют индуктивную связь M_{34} и включены согласно, что позволяет запастись дополнительной энергией взаимной индуктивности. Индуктивности L_1 и L_2 имеют встречное включение благодаря трансформаторной связи M_{12} . До размыкания коммутатора K в момент времени t_0 – источник ЭДС E создает в последовательно включенных

катушках индуктивности R_4, L_4 и R_1, L_1 и в параллельно включенной им катушке R_3, L_3 постоянные токи $i_1(0_-) = \frac{E}{R_1 + R_4}$ и $i_3(0_-) = \frac{E}{R_3}$ (рис. 2). Ток в нагрузке $i_2(0_-) = 0$.

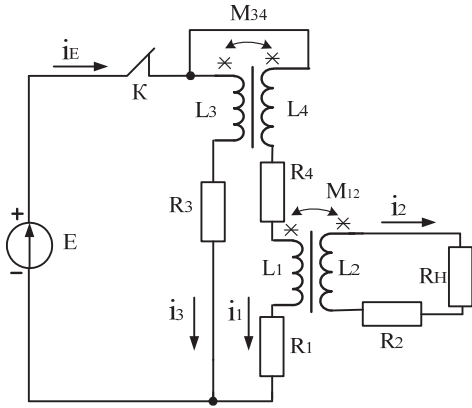


Рис. 1. Схема индуктивно-импульсного генератора

Fig. 1. Scheme of inductance-capacitance oscillator

В момент времени $t=0_+$, после размыкания коммутатора K , катушки R_1, L_1 , R_4, L_4 и R_3, L_3 оказываются включенными последовательно и встречно, в них возникает общий ток $i(0_+)$. В соответствии с обобщенным законом коммутации, исходя из принципа непрерывности суммарного потокосцепления [19, 20]:

$$\psi(0_-) = \psi(0_+),$$

получим:

$$\left. \begin{aligned} &(L_3 i_3(0_-) + M_{34} i_1(0_-)) - (L_4 i_1(0_-) + M_{34} i_3(0_-)) - \\ &- (L_1 i_1(0_-) - M_{12} i_2(0_-)) = \\ &= i(0_+) (L_1 + L_3 + L_4 - M_{34}) + M_{12} i_2(0_+) \\ &L_2 i_2(0_-) - M_{12} i_1(0_-) = L_2 i_2(0_+) + M_{12} i(0_+) \end{aligned} \right\}.$$

Учитывая, что до коммутации $i_2(0_-) = 0$, величина общего тока $i(0_+)$ в момент времени $t=0_+$ составит:

$$i(0_+) = \frac{(L_3 - M_{34}) i_3(0_-) - i_1(0_-) \left(L_1 - M_{34} + L_4 - \frac{M_{12}^2}{L_2} \right)}{L_1 + L_3 + L_4 - M_{34} - \frac{M_{12}^2}{L_2}},$$

в нагрузке возникает скачок тока:

$$i_2(0_+) = \frac{-M_{12} i(0_+) - M_{12} i_1(0_-)}{L_2}.$$

Токи в катушках индуктивности в момент коммутации t_{0+} изменяются скачком (рис. 2). При условии, что $\frac{L_3 - M_{34}}{R_3} \geq \frac{L_1 + L_4 - M_{34}}{R_1 + R_4}$, в катушке

R_3, L_3 возникает скачок тока $\Delta i_3 = i_3(0_-) - i(0_+)$ и ток i_3 не изменяет своего направления, а в первичной обмотке импульсного трансформатора R_1, L_1 ска-

чок тока составит $\Delta i_1 = i_1(0_-) - (-i(0_+))$ и ток i_1 изменит своё направление на противоположное. Таким образом, скачок тока Δi_1 индуцирует в нагрузке импульс тока i_2 , имеющий крутой передний фронт, малую длительность и большую мощность (рис. 3).

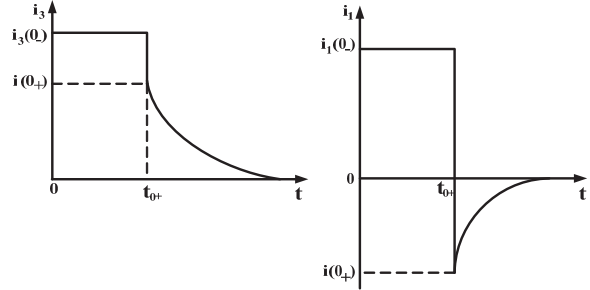


Рис. 2. Токи в катушках R_3, L_3 , R_1, L_1 и R_4, L_4

Fig. 2. Currents in inductive coils R_3, L_3 , R_1, L_1 and R_4, L_4

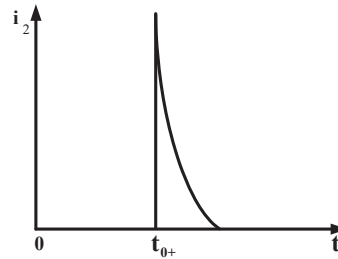


Рис. 3. Ток в нагрузке

Fig. 3. Load current

Задачей статьи является теоретическое и экспериментальное исследование работы лабораторной модели индуктивно-импульсного генератора и изучение влияния взаимной индуктивности M_{34} на величину импульса тока в линейной активной нагрузке.

Теория

Были проведены теоретические исследования работы лабораторной модели размыкателя индуктивно-импульсного генератора. Для устранения условия некорректной коммутации размыкание коммутатора эквивалентно подключению в цепь с током i_1 дополнительного сопротивления R_d , имеющего достаточно большую величину, такую, что после размыкания K ток, протекающий через ЭДС E , $i_E \approx 0$.

С момента времени $t=0_+$ переходный процесс описывается системой уравнений, составленной по законам Кирхгофа для мгновенных значений [19]:

$$\left. \begin{aligned} &i_1 (R_1 + R_4 + R_d) + (L_1 + L_4) \frac{di_1}{dt} - \\ &- M_{12} \frac{di_2}{dt} + M_{34} \frac{di_3}{dt} + i_3 R_d = E \\ &i_2 (R_2 + R_H) + L_2 \frac{di_2}{dt} - M_{12} \frac{di_1}{dt} = 0 \\ &L_3 \frac{di_3}{dt} + M_{34} \frac{di_1}{dt} + i_3 (R_3 + R_d) + i_1 R_d = E \end{aligned} \right\}.$$

Взаимная индуктивность равна $M_{12} = K_{12}\sqrt{L_1L_2}$,
 а $M_{34} = K_{34}\sqrt{L_3L_4}$, где $K_{12} \leq 1$, $K_{34} \leq 1$ – коэффициенты связи обмоток.

Полученная система дифференциальных уравнений решается при помощи метода переменных состояния в пакете программ MathCad, согласно которому в матричной форме дифференциальные уравнения переменных состояния записываются в виде [21]:

$$(dx/dt) = (A)(x) + (B)(V),$$

где (x) – матрица-столбец переменных состояния; (A) – матрица состояния; (V) – матрица-столбец источников энергии; (B) – матрица коэффициентов при источниках; (dx/dt) – матрица-столбец первых производных по времени от переменных состояния.

Расчетные и экспериментальные исследования

Работа схемы лабораторной модели индуктивно-импульсного генератора (рис. 4) была рассчитана для конкретных значений параметров элементов, показанных на рис. 1:

$$\begin{aligned} E &= 10\text{В}, R_1 = 0,6\text{ Ом}, L_1 = 0,00675\text{ Гн}, \\ R_2 &= 1,8\text{ Ом}, L_2 = 0,00675\text{ Гн}, R_3 = 5,8\text{ Ом}, \\ L_3 &= 0,0694\text{ Гн}, R_4 = 1,6\text{ Ом}, L_4 = 0,0068\text{ Гн}, \\ K_{12} &= 0,6, K_{34} = 0,5, M_{12} = 0,00405\text{ Гн}, \\ M_{34} &= 0,01\text{ Гн}, R_{\text{ш}} = 1\text{ Ом}, R_d = 10000\text{ Ом}. \end{aligned}$$

При этом $R_2 = R_2^1 + R_{\text{ш}}$, $R_3 = R_3^1 + R_{\text{ш}}$, $R_4 = R_4^1 + R_{\text{ш}}$, где R_2^1 , R_3^1 , R_4^1 – активные сопротивления катушек индуктивности; $R_{\text{ш}} = 1\text{ Ом}$ – сопротивление токоизмерительного шунта. В качестве коммутатора K применялся тумблер ТП1–2, предназначенный для ручной коммутации низковольтных электрических цепей малой мощности, не требующих частотного переключения.

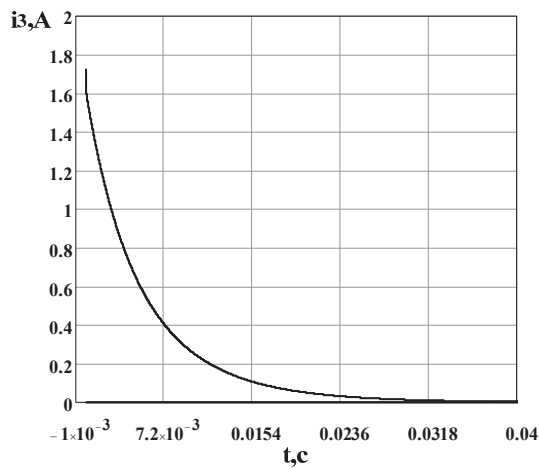


Рис. 5. Ток в катушке R_3, L_3 при $K_{34}=0,5$

Fig. 5. Current in the inductance coil R_3, L_3 at $K_{34}=0,5$

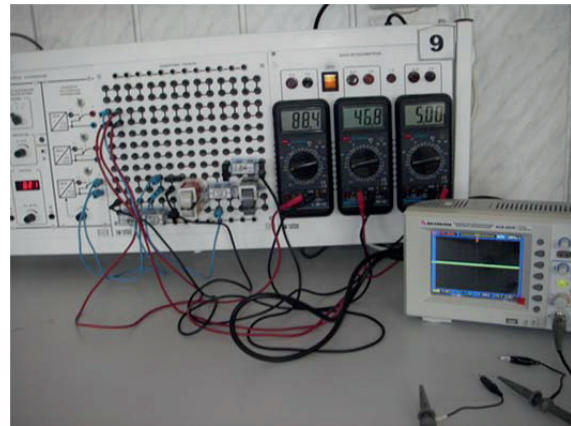


Рис. 4. Лабораторная модель индуктивно-импульсного генератора

Fig. 4. Laboratory model of inductive pulse generator

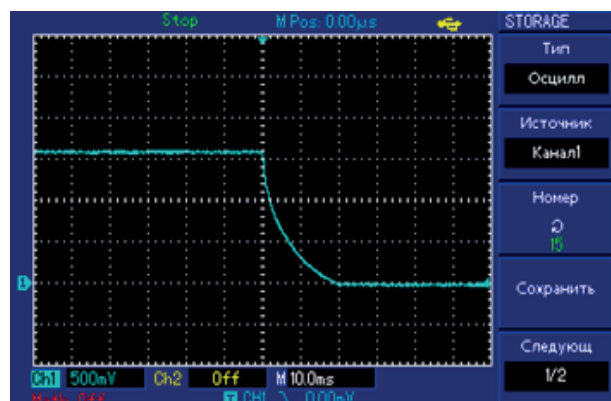
Установившиеся значения токов до размыкания коммутатора K $i_1(0_-) = 4,545\text{ А}$, $i_3(0_-) = 1,724\text{ А}$, $i_1(0_+) = 0\text{ А}$.

На рис. 5, а, б показаны результаты математического моделирования и осциллограммы тока i_3 в катушке индуктивности R_3, L_3 .

Общий ток, возникающий в катушках R_1, L_1 и R_3, L_3 при размыкании коммутатора K , по результатам расчета составляет $i(0_+) = 1,59\text{ А}$, по результатам эксперимента $-i(0_+) \approx 1,3-1,4\text{ А}$.

По результатам моделирования в катушке R_3, L_3 возникает скачок тока $\Delta i_3 = i_3(0_-) - i(0_+) = 0,137\text{ А}$, причем ток i_3 не меняет своего направления. По результатам эксперимента скачок тока составил $\Delta i_3 = 0,2\text{ А}$. Расчетная длительность кривой тока переходного процесса составляет $\Delta t_3 = 25\text{ мс}$, экспериментальная – $\Delta t_3 \approx 18-19\text{ мс}$.

На рис. 6, а, б показан расчетный и экспериментальный импульсы тока i_1 в катушке индуктивности R_1, L_1 . По результатам моделирования в катушке возникает скачок тока $\Delta i_1 = i_1(0_-) - i(0_+) = 6,135\text{ А}$,



б/б

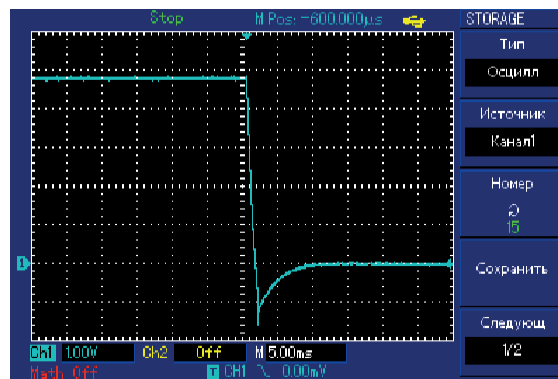
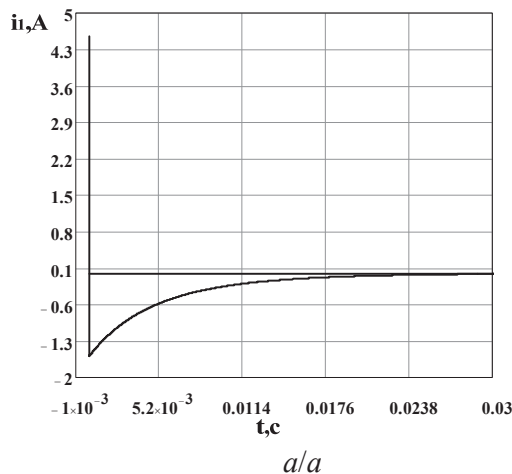


Рис. 6. Ток в катушке R_1, L_1 при $K_{34}=0,5$

Fig. 6. Current in the inductance coil R_1, L_1 at $K_{34}=0,5$

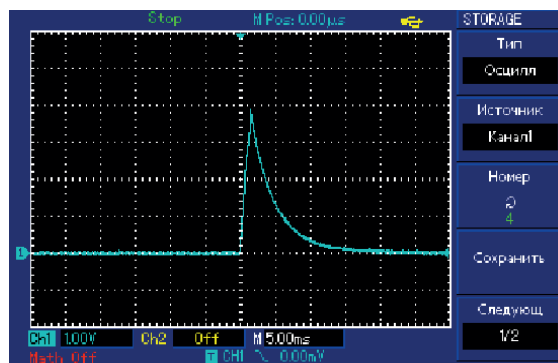
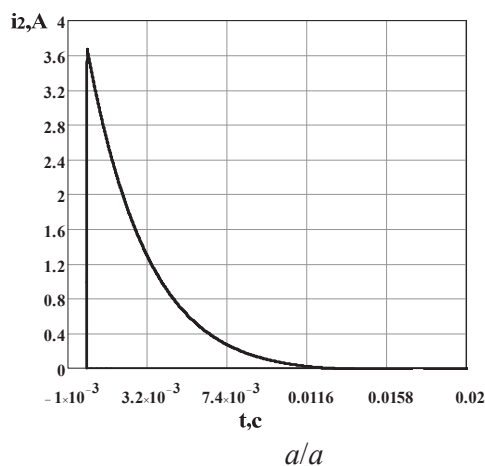


Рис. 7. Ток в нагрузке $R_H=10$ Ом при $K_{34}=0,5$

Fig. 7. Load current $R_H=10$ Ohm at $K_{34}=0,5$

причем ток i_1 меняет направление на противоположное. Экспериментальный скачок тока $\Delta i_1 \approx 6-6,3$ А, что примерно совпадает с расчетным значением. Расчетная длительность импульса тока $\Delta t_1 = 18$ мс, экспериментальная $\Delta t_1 \approx 12-15$ мс.

На рис. 7, а, б показан расчетный и экспериментальный импульс тока в нагрузке $R_H=10$ Ом. Расчетное значение тока $i_2(0_+) = 3,7$ А, при длительности импульса $t_{\text{имп}} \approx 12$ мс, экспериментальное значение $-i_2(0_+) \approx 3,8$ А, при длительности импульса $t_{\text{имп}} \approx 15$ мс, что примерно совпадает с расчетным значением. Амплитудная мощность импульса тока в нагрузке по результатам расчета равна $P_m = i_2^2(0_+)R_H = 14$ Вт. В расчетном импульсе ток после коммутации мгновенно нарастает до максимального значения, а в экспериментальном импульсе тока крутизна переднего фронта составляет $di/dt \approx 3166$ А/с, что связано с перемagnetиванием ферромагнитного сердечника.

Таким образом, длительность импульса тока в низкоомной нагрузке $R_H=10$ Ом составляет $t_{\text{имп}} \approx 15$ мс, что на порядок меньше, чем длитель-

ность импульса вывода энергии из индуктивных накопителей $t_{\text{имп}} \approx 100$ мс, а крутизна переднего фронта импульса $di/dt \approx 3166$ А/с соизмерима с крутизной импульса тока от конденсаторной батареи, что может обеспечить максимально быстрый взрыв проволоочки и быстрый ввод энергии в канал разряда электрогидравлического излучателя в реальном устройстве.

Преимуществом индуктивно-импульсного генератора (рис. 1) является наличие индуктивной связи между катушками индуктивности R_3, L_3 и R_4, L_4 , что позволяет запастись дополнительной электромагнитную энергию и увеличить импульс тока в нагрузке. Были произведены расчеты величины импульса тока в нагрузке $i_2(0_+)$, запасаемой в катушках индуктивности $R_1, L_1, R_3, L_3, R_4, L_4$, электромагнитной энергии W до коммутации и амплитудной мощности импульса тока в нагрузке $P_m = i_2^2(0_+)R_H$ в зависимости от коэффициента связи K_{34} при неизменном коэффициенте связи $K_{12}=0,6$ (рис. 8, а-в). Расчет электромагнитной энергии W производился по формуле:

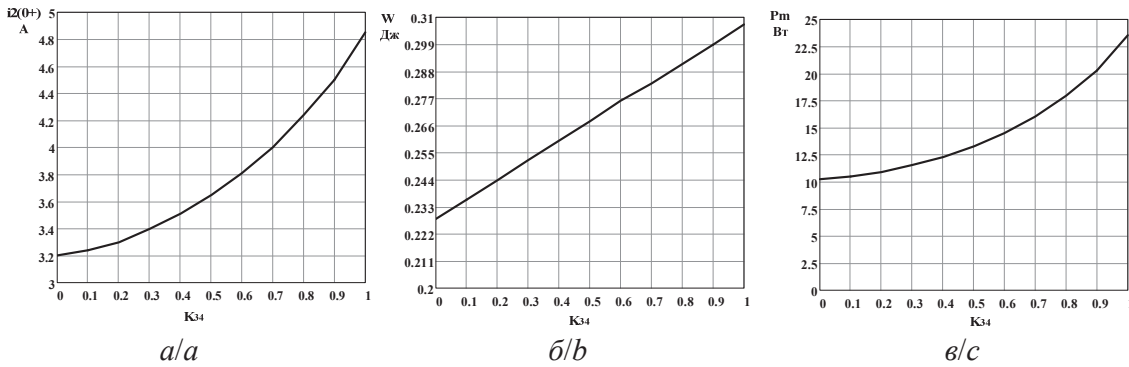


Рис. 8. Зависимости $i_2(0_+)$, W , P_m от K_{34}

Fig. 8. Charts $i_2(0_+)$, W , P_m from K_{34}

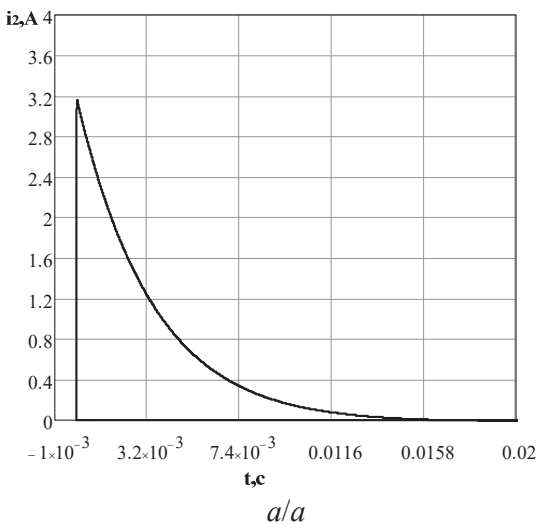
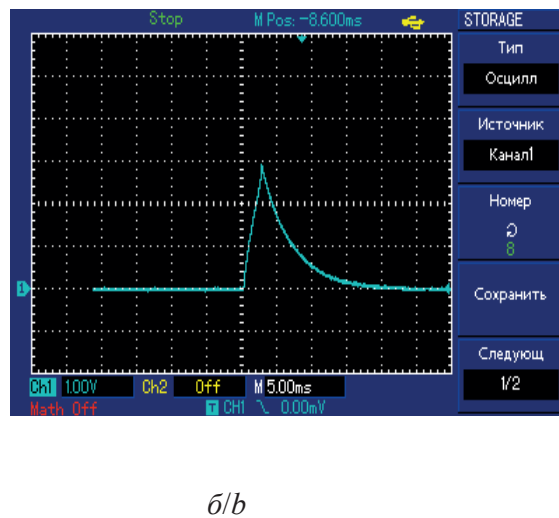


Рис. 9. Ток в нагрузке $R_H=10$ Ом при $K_{34}=0$

Fig. 9. Terminal current $R_H=10$ Ом at $K_{34}=0$



б/б

$$W = 0,5((L_1 + L_4)i_1^2(0_-) + L_3i_3^2(0_-) + M_{34}i_1(0_-)i_3(0_-)).$$

При увеличении коэффициента связи K_{34} от 0 до 1 запасенная электромагнитная энергия W возрастает в 1,34 раза, вследствие чего величина импульса тока в нагрузке $i_2(0_+)$ возрастает в 1,51 раза, а амплитудная мощность импульса тока в нагрузке P_m – в 2,3 раза.

На рис. 9, а, б приведены расчетный и экспериментальный импульс тока в нагрузке i_2 при отсутствии индуктивной связи $K_{34}=0$ катушек индуктивности R_3, L_3 и R_4, L_4 .

Расчетное значение тока $i_2(0_+)=3,1$ А при длительности импульса $t_{имп} \approx 15$ мс, экспериментальное значение $i_2(0_+) \approx 3$ А при длительности импульса $t_{имп} \approx 18$ мс, что примерно совпадает с расчетным значением. Амплитудная мощность импульса тока в нагрузке по результатам расчета равна $P_m=10,5$ Вт, что в 1,33 раза меньше, чем для импульса на рис. 6, б. Крутизна переднего фронта экспериментального импульса тока $di/dt \approx 1000$ А/с, что в 3,16 раз ниже, чем для импульса на рис. 6, б. Следовательно, наличие индуктивной связи между катушками индуктивности R_3, L_3 и R_4, L_4 приво-

дит к существенному увеличению амплитудной мощности и крутизны переднего фронта импульса тока в нагрузке.

Выводы

1. Предложена схема индуктивно-импульсного генератора импульсов тока, позволяющая увеличить амплитуду и мощность импульсов тока в нагрузке с помощью индуктивной связи.
2. Разработана математическая модель работы схемы индуктивно-импульсного генератора на линейную активную нагрузку с применением метода переменных состояния.
3. Проведены сравнительные расчетные и экспериментальные исследования лабораторной модели индуктивно-импульсного генератора при работе на линейную активную нагрузку. Экспериментальные значения токов в катушках индуктивностей и в нагрузке примерно совпали с расчетными значениями.
4. По результатам исследований работы индуктивно-импульсного генератора на линейную активную нагрузку $R_H=10$ Ом при неизменном коэффициенте связи $K_{12}=0,6$ и при увеличении

коэффициента связи K_{34} от 0 до 1 запасенная электромагнитная энергия W возрастает в 1,34 раза, вследствие чего величина импульса тока в нагрузке $i_2(0_+)$ возрастает в 1,51 раза, а амплитудная мощность импульса тока в нагрузке P_m – в 2,3 раза.

- Исследования лабораторной модели индуктивно-импульсного генератора показали, что длительность импульса тока в низкоомной нагрузке $R_H=10$ Ом при коэффициентах индуктивной связи $K_{12}=0,6$, $K_{34}=0,5$ составляет $t_{имп} \approx 15$ мс, что на порядок меньше, чем длительность импульса вывода энергии из индуктивных накопителей $t_{имп} \approx 100$ мс, а крутизна переднего фронта импульса $di/dt \approx 3166$ А/с соизмерима с

крутизной импульса тока от конденсаторной батареи. Это позволит обеспечить максимально быстрый взрыв проволоочки и быстрый ввод энергии в канал разряда электрогидравлического излучателя в реальном устройстве. Кроме того, длительность импульса тока в нагрузке соизмерима с длительностью импульса тока от ударного генератора, $t_{имп} \approx 12-15$ мс, что позволяет сформировать низкочастотный импульс возбуждаемых волн давления, обуславливающий высокий сейсмический КПД, что делает индуктивно-импульсный генератор перспективным для применения в качестве источника импульса тока в сейсморазведке при работе на взрывающуюся проволоочку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- McNab I.R. Large-Scale Pulsed Power Opportunities and Challenges // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2014. – V. 42. – № 5. – P. 1118–1127.
- Fair H.D. The Past, Present and Future of Electromagnetics Launch Technology and the IEEE International EML Symposia // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2013. – V. 41. – № 5. – P. 1024–1027.
- Underwater Electrical Wire Explosion and its Applications / Ya. Krasik, A. Grinenko, A. Sayapin, S. Efimov, A. Fedotov, V. Gurovich, V. Oreshkin // Transactions on Plasma Science. – 2008. – V. 36. – № 2. – P. 423–434.
- Пичугина М.Т. Мощная импульсная энергетика. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2005. – 98 с.
- Aristov A.V., Aristova L.I., Ekkert I.A. The control system of electric vibrating motor under the potential phase modulation // Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (ME-ACS): Proc. of the International Conference. – Tomsk, 1–4 December, 2015 <http://dx.doi.org/10.1109/MEACS.2015.7414854> (дата обращения 10.02.2018).
- Методическое пособие по оценке размера вреда водным биоресурсам при сейсморазведке и электроразведке / В.Н. Семёнов, Ю.И. Зуенко, И.А. Атаманова, О.Н. Мухаметова, Г.С. Зеленихина, Б.В. Архипов, А.Б. Корниенко. – М.: Изд-во ВНИРО, 2016. – 86 с.
- Lu Zhu, Zheng-Hao He, Zhi-Wen Gao, Fa-Li Tan, Jen-Shih Chang. Research on the influence of conductivity to pulsed arc electrohydraulic discharge in water // Journal of Electrostatics. – 2014. – V. 72 (1). – P. 53–58.
- Оценка возможностей лабораторных измерений упругих свойств неконсолидированных осадков с использованием электроискрового источника упругих волн и пьезоэлектрических приемников давления / М.Л. Владов, С.С. Бричева, В.А. Стручков, М.Ю. Токарев // Технология сейсморазведки. – 2016. – № 3. – С. 114–121.
- Buckingham M.J., Richardson M.D. On tone-burst measurements of sound speed and attenuation in sandy marine sediments // IEEE Journal of oceanic engineering. – 2002. – V. 27. – P. 429–453.
- Wojtowicz Jo., Wojtowicz H., Wajs W. Simulation of electrohydrodynamic phenomenon using computational intelligence methods // Computeria Computer Science. – 2015. – V. 60. – P. 188–196.
- Электроискровой источник упругих волн для целей наземной сейсморазведки / под ред. А.В. Калинина. – М.: Изд-во МГУ, 1989. – 193 с.
- Иницирование канала разряда в воде электрическим взрывом алюминиевой фольги / М.В. Сильников, С.И. Кривошеев, К.С. Кулаков, С.Л. Кулаков // Известия Российской Академии Наук, Энергетика. – 2013. – № 3. – С. 36–39.
- Франковский Б.А., Шмигирилов Ю.Г. Электрогидравлический источник волн давления для малоглубинной сейсморазведки // Механизация строительства. – 2015. – № 5. – С. 45–48.
- Франковский Б.А., Шмигирилов Ю.Г. Применение электромашиного генератора для сейсморазведки // Геофизика. – 2015. – № 1. – С. 82–86.
- Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. – Л.: Изд-во «Машиностроение», 1986. – 252 с.
- Соковин С.Ю. Мощная импульсная техника. – Екатеринбург: Изд-во ГОУ-ВПО УГТУ-УПИ, 2008. – 65 с.
- О применении электрических машин для электрогидравлического метода сейсморазведки / Г.А. Сипайлов, К.А. Хорьков, Б.А. Франковский, Ю.Г. Шмигирилов // Силовые импульсные системы. – Новосибирск: Институт горного дела, СОАН СССР, 1973. – С. 66–70.
- Индуктивно-импульсный генератор: пат. Рос. Федерация № 156007; заявл. 24.02.2015; опубл. 27.10.2015. Бюл. № 30. – 2 с.
- Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В. Основы теории цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 286 с.
- Pustynnikov S.V. Application of generalized switching laws for increasing current pulse value // Russian Electrical Engineering. – 2016. – V. 87. – № 1. – P. 35–40. URL: <http://dx.doi.org/10.3103/S1068371216010077> (дата обращения 10.02.2018).
- Tubbs St.P. Mathcad for Electrical Engineers and Technologists: Mathcad Tutorial with Practical Electrical Examples. – United States: Published by Stephen, 2009. – 108 p.

Поступила 13.02.2018 г.

Информация об авторах

Пустынников С.В., кандидат технических наук, доцент Инженерной школы электротехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Хан В., кандидат технических наук, профессор института Физики, заместитель директора международного центра «Наука будущего» Цицилинского университета.

UDC 550.834; 621.373

POSSIBILITY OF APPLICATION OF INDUCTANCE-CAPACITANCE OSCILLATOR IN ELECTRO-HYDRAULIC SOURCE OF SEISMIC VIBRATIONS

Sergey V. Pustynnikov¹,

pustynnikov@tpu.ru

Wei Han²,

whan@jlu.edu.cn

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

² Jilin University,
Qianin Street 2699, Changchun, 130012, P.R. China.

The relevance of the research is caused by the need to develop new sources of powerful current pulses for creation of seismic waves in non-explosive seismic exploration.

The aim of the research is to carry out estimated and pilot investigations of operation of inductance-capacitance oscillator model using the generalized laws of switching for receiving current pulses in the resistive load.

Objects: laboratory model of the inductance-capacitance oscillator with inductively connected inductance coils for increasing current pulse power and steepness in linear active loading.

Methods: method of state-space variables for calculating the equations of transient phenomenon in a circuit after switching which are worked out under Kirchhoff's laws, application of the generalized laws of switching for calculating the starting values of currents in the inductance coils and in load resistance.

Results. The authors have designed the diagram of the inductance-capacitance oscillator which uses the generalized laws of switching for receiving power current pulses in the resistive load. The oscillator contains the inductive and connected coils that allow increasing the reserved energy and power of the received pulses. Using the method of state-space variables, the mathematical model of operation of the diagram on the linear resistive load was obtained. The authors performed the estimation and pilot researches of the diagram laboratory model. The experimental values of currents in inductance coils and in loading coincided approximately with the calculated ones. Duration of the received current pulses in loading and steepness of the forward front of current pulses make perspective the application of the inductance-capacitance oscillator in seismic exploration, as a source of seismic waves at explosion of a delay.

Key words:

Generator, current pulse, mathematical model, inductance coil, coefficient of connection, oscillogram, seismic exploration.

REFERENCES

- McNab I.R. Large-Scale Pulsed Power Opportunities and Challenges. *Trans. on Plasma Science*, 2014, vol. 42, no. 5, pp. 1118–1127.
- Fair H.D. The Past, Present and Future of Electromagnetics Launch Technology and the IEEE International EML Symposia. *IEEE Trans. on Plasma Science*, 2013, vol. 41, no. 5, pp. 1024–1027.
- Krasik Ya.E., Grinenko A., Sayapin A., Efimov S., Fedotov A., Gurovich V.Z., Oreshkin V.I. Underwater Electrical Wire Explosion and its Applications. *IEEE Trans. on Plasma Science*, 2008, vol. 36, no. 2, pp. 423–434.
- Pichugina M.T. *Moshchnaya impulsnaya energetika* [Powerful pulse energy]. Tomsk, TPU Publ. house, 2005. 98 p.
- Aristov A.V., Aristova L.I., Ekkert I.A. The control system of electric vibrating motor under the potential phase modulation. *Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (ME-ACS). Proc. of the International Conference*. Tomsk, 1–4 December, 2015. <http://dx.doi.org/10.1109/MEACS.2015.7414854> (accessed 10 February 2018).
- Semenov V.N., Zuenko Yu.I., Atamanova I.A., Mukhametova O.N., Zelenichina G.S., Arkhipov B.V., Kornienko A.B. *Metodicheskoe posobie po otsenke razmera vreda vodnym bioresursam pri seismorazvedke i elektrorazvedke* [Guidelines on assessment of damage to water bioresources in seismic exploration and electrical prospecting]. Moscow, VNIRO Publ., 2016. 86 p.
- Lu Zhu, Zheng-Hao He, Zhi-Wen Gao, Fa-Li Tan, Jen-Shih Chang. Research on the influence of conductivity to pulsed arc electrohydraulic discharge in water. *Journal of Electrostatics*, 2014, vol. 72 (1), pp. 53–58.
- Vladov M.L., Bricheva S.S., Struchkov V.A., Tokarev M.Ju. Assessment of the advantages of the elastic waves source spark coupled with piezoelectric pressure receivers in laboratory measurements of the unconsolidated deposits elastic properties. *Seismic technology journal*, 2016, no. 3, pp. 114–121. In Rus.
- Buckingham M.J., Richardson M.D. On tone-burst measurements of sound speed and attenuation in sandy marine sediments. *IEEE Journal of oceanic engineering*, 2002, vol. 27, pp. 429–453.
- Wojtowicz Jo., Wojtowicz H., Wajs W. Simulation of electrohydrodynamic phenomenon using computational intelligence methods. *Computeria Computer Science*, 2015, vol. 60, pp. 188–196.
- Kalinin A.V. *Elektroiskrovoy istochnik uprugikh voln dlya tszeley nazemnoy seyismorazvedki* [The spark source of elastic waves for land seismic works]. Moscow, MGU Publ., 1989. 193 p.
- Silnikov M.V., Krevosheev S.I., Kulakov K.S., Kulakov S.L. Initiation of the discharge channel in water by electrical explosion of aluminum foil. *News of Russian Academy of Sciences, Energy Publ.*, 2013, no. 3, pp. 36–39. In Rus.
- Frankovskiy B.A., Shmigirilov Yu.G. Electro-hudraulic pressure waves for shallow seismic. *Mechanization of building*, 2015, no. 5, pp.45–48. In Rus.
- Frankovskiy B.A., Shmigirilov Yu.G. Application of an electric machine generator for seismic. *Geophysics*, 2015, no. 1, pp. 82–86. In Rus.
- Yutkin L.A. *Elektrogidravlichesky effekt i ego primeneniye v promyshlennosti* [Electrohydraulic effect and its application in industry]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1986. 252 p.

16. Sokovnin S.Yu. *Moshchnaya impulsnaya energetika* [Powerful pulse energy]. Ekaterinburg, GOU-VPO UGTU-UPI Publ., 2008. 65 p.
17. Sipaylov G.A., Khorkov K.A., Frankovskiy B.A., Shmigiriyov Yu.G. O primeneniі elektricheskikh mashin dlya elektrogidravlicheskogo metoda seysmorazvedki [On application of electrical machines for electrohydraulic seismic survey method]. *Silovye impulsnye sistemy* [Power impulse systems]. Novosibirsk, Institute of mining, SOAN SSSR, 2008. pp. 66–70.
18. Pustynnikov S.V. *Induktivno-impulsny generator* [Inductive generator of impulses of current]. Patent RF, no. 156007, 2015.
19. Zeveke G.V., Ionkin P.A., Netushil A.V. *Osnovy teorii tsepey* [Fundamentals of the theory of circuits]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 286 p.
20. Pustynnikov S.V. Application of generalized switching laws for increasing current pulse value. *Russian Electrical Engineering*, 2016, vol. 87, no. 1, pp. 35–40. Available at: <http://dx.doi.org/10.3103/S1068371216010077> (accessed 10 February 2018).
21. Tubbs St.P. *Mathcad for Electrical Engineers and Technologists: Mathcad Tutorial with Practical Electrical Examples*. United States, Stephen Publ., 2009. 108 p.

Received: 13 February 2018.

Information about the authors

Sergey V. Pustynnikov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Wei Han, Cand. Sc., professor, Executive Deputy Director of International Center of Future Science, Jilin University.

УДК 621.314.58:681.5.015

МНОГОМЕРНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ПОГРУЖНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Букреев Виктор Григорьевич¹,
bukreev@tpu.ru

Шандарова Елена Борисовна¹,
shandarovaelena@mail.ru

Рулевский Виктор Михайлович²,
rulevsky@nii.aem.tomsk.ru

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

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

Актуальность работы определяется необходимостью построения линеаризованных математических моделей систем электропитания такими сложными технологическими объектами, как погружные насосы нефтяных скважин и электромеханическое оборудование привязных подводных аппаратов, предназначенных для решения задач аналитического конструирования стабилизирующих регуляторов напряжения в кабельной линии. Особенности систем электропитания данного класса объектов является не только наличие кабель-троса большой протяженности и невозможность передачи точного информационного сигнала о питающем напряжении непосредственно на полезной нагрузке, но и значительная размерность нелинейной модели разомкнутой системы управления. Наиболее рациональным вариантом может служить линеаризованная математическая модель системы электропитания, позволяющая построить регулятор напряжения требуемого качества методами линейной теории управления.

Цель работы: аппроксимация априорной нелинейной многомерной модели системы электропитания с передачей энергии переменного тока по кабель-тросу линеаризованной математической моделью меньшего порядка в пространстве переменных состояния.

Методы: операторный метод, методы пространства состояния и математического моделирования.

Результаты. Разработан алгоритм, позволяющий уменьшить порядок математической модели системы электропитания путем применения эквивалентных передаточных функций для представления всей системы или ее составляющих звеньев линеаризованными моделями. Проведена сравнительная оценка результатов моделирования исходной системы электропитания и полученной в результате предлагаемой в работе методики упрощенной системы, подтверждающая возможность описания исходной системы моделью пониженного порядка в пространстве состояний на основе передаточных функций.

Выводы. Предложена методика аппроксимации нелинейной математической модели системы электропитания технологического оборудования с передачей энергии по кабель-тросу. Полученная упрощенная модель такого объекта записывается в пространстве переменных состояний и позволяет использовать хорошо апробированные методы теории управления линейными объектами для синтеза оптимального регулятора напряжения на удаленной нагрузке.

Ключевые слова:

Система электропитания погружного оборудования, математическая модель, аппроксимация, передаточная функция, метод переменных состояния.

Введение

Важными направлениями в настоящее время являются исследования земной коры, Мирового океана и более эффективное освоение нефтегазового потенциала России и Арктики [1–4]. Для выполнения таких исследований используют различное погружное оборудование с передачей энергии по кабель-тросу от удаленного источника энергии. В состав такого оборудования входят электродвигатели погружных электроцентробежных насосов и электротехническое оборудование привязных подводных аппаратов [5, 6]. Длительная работа данного класса технологических объектов требует непрерывного и качественного обеспечения энергией соответствующей электромеханической полезной нагрузки. Решение этой задачи возможно в результате использования специализированных систем электропитания, обеспечивающих необхо-

димое преобразование напряжения переменного или постоянного тока от первичного источника энергии, чаще всего ограниченной мощности [7–9].

Основой для создания оптимального закона стабилизации выходного напряжения подобных систем электропитания (СЭП) может служить линеаризованная математическая модель, позволяющая построить методами линейной теории управления регуляторы требуемого качества. Одним из вариантов описания СЭП является применение эквивалентных передаточных функций для представления всей системы или ее составляющих звеньев линеаризованными моделями [10]. Полученные таким образом математические модели в виде детерминированных дифференциальных уравнений позволяют в дальнейшем учитывать не только нелинейный характер внутренних и внешних возму-

щений, но и произвольные начальные условия функционирования объекта управления.

Математическая модель системы электропитания и алгоритм понижения порядка

Рассматриваемая в работе система электропитания включает трехфазный автономный инвертор напряжения (АИН) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), на вход которого через LC -фильтр с параметрами R_s, L_s, C_s (блок «filter1» на рис. 1) поступает постоянное напряжение U_s (рис. 1). Инвертор формирует трехфазную систему линейных напряжений $u_{AB}(t), u_{BC}(t), u_{CA}(t)$ с определенной частотой ω . Для сглаживания пульсаций напряжения на входе кабельной линии (блок «cable») между инвертором и повышающим трансформатором (блок «transformer1» на рис. 1) включен LC -фильтр с параметрами R_a, L_a, C_a («filter2» на рис. 1). Напряжение на конце кабельной линии понижается трансформатором, представленным на рис. 1 блоком «transformer 2». Пульсации напряжения, вызванные коммутацией ключей выпрямителя (блок «rectifier»), сглаживаются фильтром с параметрами R_v, L_v, C_v («filter3» на рис. 1). Параметрами трансформаторов являются активные сопротивления ($R_{a1}, R_{a2}, R_{a1T}, R_{a2T}$) и индуктивности рассеяния ($L_{a1}, L_{a2}, L_{a1T}, L_{a2T}$) обмоток, учитывающие влияние потоков рассеяния. Длина кабельной линии СЭП не превышает 6 км и, согласно исследованиям [11], при расчетах учитывается как линия с сосредоточенными параметрами R_{ak}, L_{ak}, C_{ak} . Полезная нагрузка системы электропитания имеет активный характер и на схеме представлена сопротивлением R_l .

мы электропитания имеет активный характер и на схеме представлена сопротивлением R_l .

В работе [12] записана система дифференциальных уравнений в форме Коши для рассматриваемой СЭП, при этом работа автономного инвертора и выпрямителя описывалась коммутационно-разрывными функциями. Проведенные в [12] исследования показали, что большое количество дифференциальных уравнений (одиннадцать на одну фазу), а также присутствие коммутационно-разрывных функций в системе дифференциальных уравнений значительно усложняет задачу синтеза регулятора напряжения в СЭП.

В данной работе для упрощения системы уравнений, описывающих работу СЭП, представленной на рис. 1, выходные линейные напряжения инвертора предлагается представить рядом Фурье на основании исследований их гармонического состава.

Управление автономным инвертором напряжения в рассматриваемой реальной СЭП строится на принципе ШИМ с предмодуляцией третьей гармоникой. Применение несинусоидального закона для модуляции длительности импульсов АИН обеспечивает увеличение отношения амплитуды первой гармоники выходного напряжения автономного инвертора к напряжению источника питания на 15,47 %, что, в свою очередь, повышает энергетические характеристики СЭП [13, 14]. Кроме того, предмодуляция третьей гармоникой повышает качество выходного напряжения АИН [15].

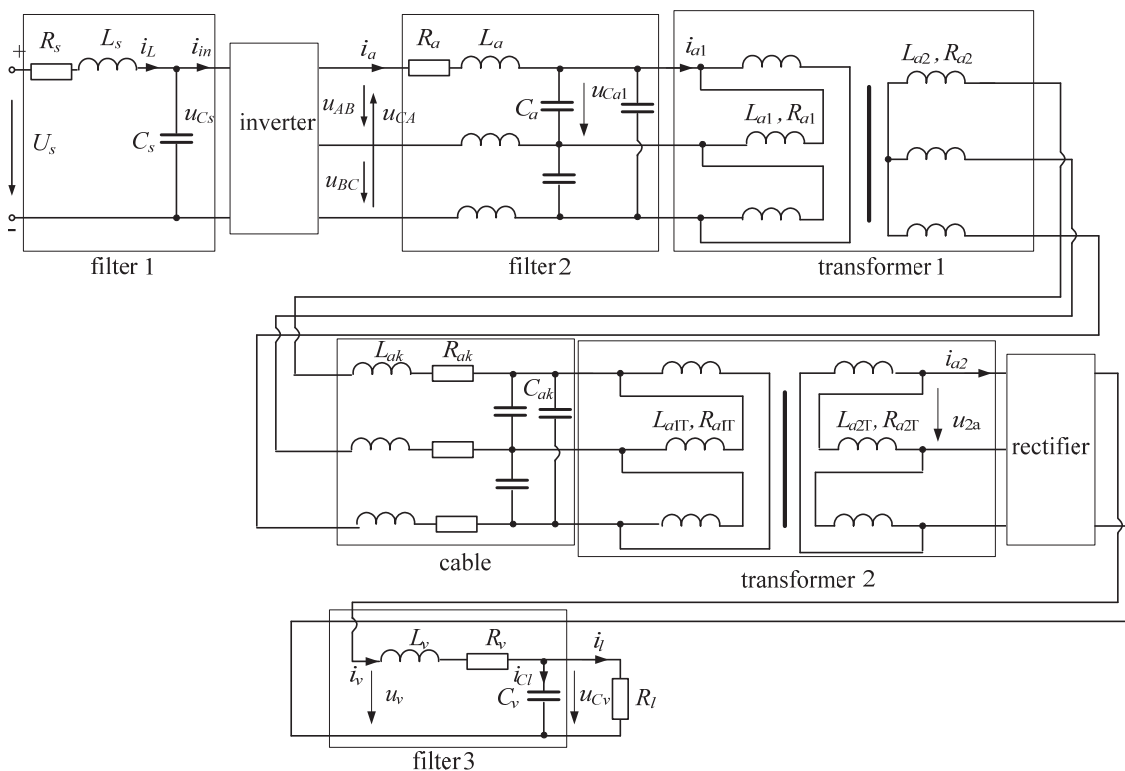


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения СЭП

Fig. 1. Power supply system (PSS) equivalent circuit

Управляющий сигнал каждой фазы содержит нулевую последовательность, включающую третью гармонику основной частоты в указанной ниже пропорции:

$$\begin{aligned}
 u_{as}(t) &= \frac{k_m U_m}{\cos\left(\frac{\pi}{6}\right)} \left[\sin(\omega t) + \left(1 - \cos\left(\frac{\pi}{6}\right)\right) \sin(3\omega t) \right]; \\
 u_{bs}(t) &= \frac{k_m U_m}{\cos\left(\frac{\pi}{6}\right)} \left[\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \left(1 - \cos\left(\frac{\pi}{6}\right)\right) \sin(3\omega t) \right]; \\
 u_{cs}(t) &= \frac{k_m U_m}{\cos\left(\frac{\pi}{6}\right)} \left[\sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) + \left(1 - \cos\left(\frac{\pi}{6}\right)\right) \sin(3\omega t) \right], \quad (1)
 \end{aligned}$$

где k_m , U_m – коэффициент модуляции и амплитуда управляющих сигналов. При моделировании работы трехфазного мостового инвертора на симметричную нагрузку источник питания и ключи принимались идеальными, интервал «мертвой» паузы не учитывался.

Тогда законы формирования импульсов управления АИН можно описать коммутационно-разрывными функциями фаз [16]:

$$\begin{aligned}
 K_a(t) &= \begin{cases} 1 & \text{if } \xi_a(t) \geq 0 \\ -1 & \text{if } \xi_a(t) < 0 \end{cases}, \\
 K_b(t) &= \begin{cases} 1 & \text{if } \xi_b(t) \geq 0 \\ -1 & \text{if } \xi_b(t) < 0 \end{cases}, \\
 K_c(t) &= \begin{cases} 1 & \text{if } \xi_c(t) \geq 0 \\ -1 & \text{if } \xi_c(t) < 0 \end{cases}, \quad (2)
 \end{aligned}$$

где $\xi_a(t) = u_{as}(t) - u_r(t)$, $\xi_b(t) = u_{bs}(t) - u_r(t)$,
 $\xi_c(t) = u_{cs}(t) - u_r(t)$

– разностные функции фаз, определяемые как разность задающего напряжения фазы и пилообразного сигнала $u_r(t)$, представленного рядом Фурье

$$\begin{aligned}
 u_r(t) &= \cos(\omega_r t) + \frac{1}{9} \cos(3\omega_r t) + \\
 &+ \frac{1}{25} \cos(5\omega_r t) + \frac{1}{49} \cos(7\omega_r t), \quad (3)
 \end{aligned}$$

где $\omega_r = 2\pi f_r$ – угловая частота основной гармоники; f_r – частота коммутации широтно-импульсного модулятора.

Расчет потенциалов фаз и нулевой точки нагрузки $u_0(t)$ осуществляется через напряжение на входе инвертора $u_{cs}(t)$ (рис. 1) по формулам

$$\begin{aligned}
 u_{a0}(t) &= \frac{u_{Cs}(t)}{2} \xi_a(t); \quad u_{b0}(t) = \frac{u_{Cs}(t)}{2} \xi_b(t); \\
 u_{c0}(t) &= \frac{u_{Cs}(t)}{2} \xi_c(t); \\
 u_0(t) &= \frac{1}{3} (u_{a0}(t) + u_{b0}(t) + u_{c0}(t)), \quad (4)
 \end{aligned}$$

что дает возможность определить фазные и линейные напряжения инвертора

$$\begin{aligned}
 u_a(t) &= u_{a0}(t) - u_0(t); \quad u_b(t) = u_{b0}(t) - u_0(t); \\
 u_c(t) &= u_{c0}(t) - u_0(t), \\
 u_{AB}(t) &= u_a(t) - u_b(t); \quad u_{BC}(t) = u_b(t) - u_c(t); \\
 u_{CA}(t) &= u_c(t) - u_a(t). \quad (5)
 \end{aligned}$$

Для определения степени влияния высших гармоник на выходное напряжение инвертора использовался амплитудный спектр, полученный в результате разложения полученных линейных напряжений $u_{AB}(t)$, $u_{BC}(t)$, $u_{CA}(t)$ в ряд Фурье. На рис. 2 представлен амплитудный спектр линейного напряжения $u_{AB}(t)$, где C_k – амплитудное значение k -й гармоники в относительных единицах; k – порядковый номер гармоники. Как показали исследования, в низкочастотной части спектра присутствует только основная гармоника с частотой $f=1000$ Гц (при $k=1$), а в области высоких частот можно выделить группы гармоник, расположенных вблизи частот, кратных основной частоте: $48f$, $96f$ и $144f$ при $k=48$, 96 и 144 , соответственно (рис. 2).

Совокупность высших гармоник с порядковыми номерами, расположенными вблизи $k=48$ и

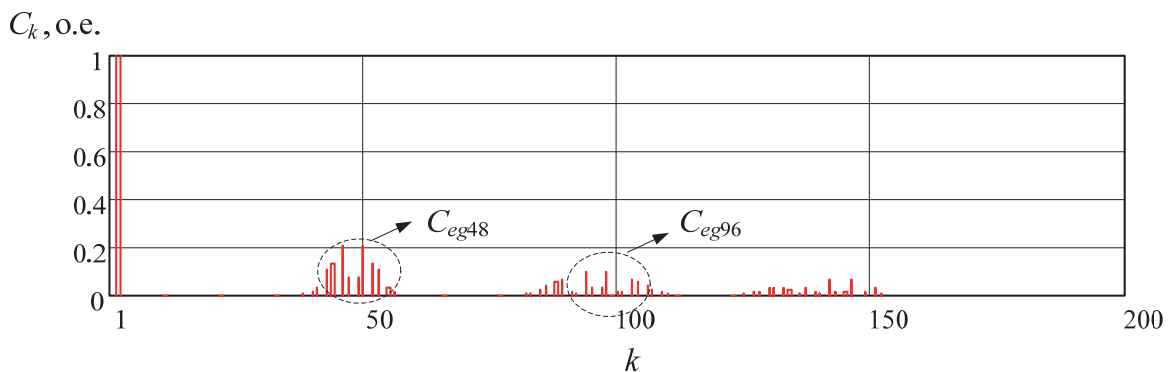


Рис. 2. Амплитудный спектр линейных напряжений при $k_m=1$

Fig. 2. Amplitude spectrum of linear voltage at $k_m=1$

$k=96$, предлагается заменить эквивалентными гармониками с частотами $48f$ и $96f$, амплитуды C_{ed48} и C_{ed96} которых вычисляются по формулам [17]:

$$C_{eq48} = \sqrt{\sum_{k=48-w}^{48+w} C_k^2}, \quad C_{eq96} = \sqrt{\sum_{k=96-w}^{96+w} \left(\frac{C_k}{2}\right)^2},$$

где $w=9$ – постоянное число, ограничивающее область спектра напряжения вблизи выбранных частот (рис. 2).

Тогда линейные напряжения инвертора можно представить в виде

$$\begin{aligned} u_{AB}(t) &= \frac{\sqrt{3}k_m u_{Cs}(t)}{20,86} \sin(\omega t) + \\ &+ 0,39u_{Cs}(t) \sin(48\omega t) + 0,097u_{Cs}(t) \sin(96\omega t); \\ u_{BC}(t) &= \frac{\sqrt{3}k_m u_{Cs}(t)}{20,86} \sin(\omega t - 120) + \\ &+ 0,39u_{Cs}(t) \sin(48(\omega t - 120)) + \\ &+ 0,097u_{Cs}(t) \sin(96(\omega t - 120)); \\ u_{CA}(t) &= \frac{\sqrt{3}k_m u_{Cs}(t)}{20,86} \sin(\omega t + 120) + \\ &+ 0,39u_{Cs}(t) \sin(48(\omega t + 120)) + \\ &+ 0,097u_{Cs}(t) \sin(96(\omega t + 120)), \end{aligned} \quad (6)$$

где $u_{Cs}(t)$ – входное напряжение инвертора.

При записи системы (6), кроме того, что амплитуда основной гармоники выходного напряжения инвертора больше напряжения источника питания в $\sqrt{3}/2$, введением коэффициента 0,86 учитывалось, что при равном коэффициенте модуляции k_m в ШИМ с предмодуляцией амплитуда основной гармоники на 15,47 % выше, чем в инверторе с классической трехфазной ШИМ [17].

Интенсивность высших гармонических составляющих в области частот, лежащих в пределах $48f_{\pm w}$, в спектре ШИМ-последовательности характеризует коэффициент гармоник

$$k_g = \frac{C_{eq48}}{C_1} = \frac{\sqrt{\sum_{k=48-w}^{48+w} C_k^2}}{C_1},$$

где C_1 – амплитуда основной гармоники выходного напряжения.

Влияние высших гармоник с частотами $96f_{\pm w}$ на ток нагрузки можно учесть введением дополнительного коэффициента гармоник [17]

$$k_{g2} = \frac{\sqrt{\sum_{k=48-w}^{48+w} C_k^2 + \sum_{k=96-w}^{96+w} \left(\frac{C_k}{2}\right)^2}}{C_1}.$$

Проведенные расчеты показали, что связь между коэффициентами гармоник и коэффициентом модуляции является практически линейной функцией (рис. 3) и может записываться в виде $k_g=0,5k_m$, $k_{g2}=1,7k_m$.

Полученные зависимости позволяют уточнить запись линейных напряжений инвертора

$$\begin{aligned} u_{AB}(t) &= \frac{\sqrt{3}k_m u_{Cs}(t)}{20,86} \sin(\omega t) + \\ &+ 0,195k_m u_{Cs}(t) \sin(48\omega t) + \\ &+ 0,11k_m u_{Cs}(t) \sin(96\omega t); \\ u_{BC}(t) &= \frac{\sqrt{3}k_m u_{Cs}(t)}{20,86} \sin(\omega t - 120) + \\ &+ 0,195k_m u_{Cs}(t) \sin(48(\omega t - 120)) + \\ &+ 0,11k_m u_{Cs}(t) \sin(96(\omega t - 120)); \\ u_{CA}(t) &= \frac{\sqrt{3}k_m u_{Cs}(t)}{20,86} \sin(\omega t + 120) + \\ &+ 0,195k_m u_{Cs}(t) \sin(48(\omega t + 120)) + \\ &+ 0,11k_m u_{Cs}(t) \sin(96(\omega t + 120)). \end{aligned} \quad (7)$$

В результате проведенных исследований математическую модель автономного инвертора напря-

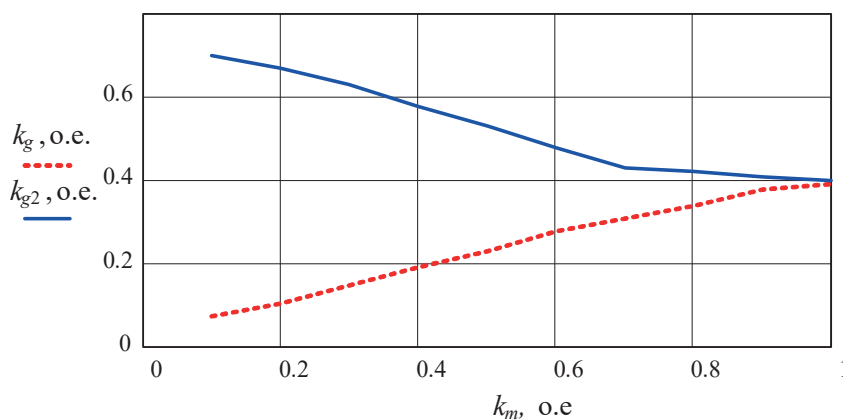


Рис. 3. Зависимость коэффициентов гармоник от коэффициента модуляции

Fig. 3. Dependence of harmonic factors on modulation index

жения с ШИМ, представленную системой уравнений с коммутационно-разрывными функциями (1)–(5), предложено заменить системой линейных напряжений (7), позволяющей учесть основные процессы, протекающие в инверторе.

Одним из вариантов моделирования трехфазного мостового выпрямителя является представление его в виде функции, где выпрямленное напряжение $u_v(t)$ на интервалах, равных одной шестой части периода, определяется разностью фазных напряжений трансформатора (здесь и далее символ « t » при переменных не приводится с целью сокращения формул):

$$u_v(t) = \left\{ \begin{array}{l} u_{2az} - u_{2bz} \text{ if } u_{2az} > u_{2bz} \wedge u_{2az} \geq \\ \geq u_{2cz} \wedge u_{2bz} < u_{2az} \wedge u_{2bz} \leq u_{2cz} \\ u_{2az} - u_{2cz} \text{ if } u_{2az} \geq u_{2bz} \wedge u_{2az} > \\ > u_{2cz} \wedge u_{2cz} < u_{2az} \wedge u_{2cz} \leq u_{2bz} \\ u_{2bz} - u_{2cz} \text{ if } u_{2bz} \geq u_{2az} \wedge u_{2bz} > \\ > u_{2cz} \wedge u_{2cz} < u_{2bz} \wedge u_{2cz} \leq u_{2az} \\ u_{2bz} - u_{2az} \text{ if } u_{2bz} \geq u_{2cz} \wedge u_{2bz} > \\ > u_{2az} \wedge u_{2az} < u_{2bz} \wedge u_{2az} \leq u_{2cz} \\ u_{2cz} - u_{2bz} \text{ if } u_{2cz} \geq u_{2bz} \wedge u_{2cz} > \\ > u_{2az} \wedge u_{2az} < u_{2cz} \wedge u_{2bz} \leq u_{2cz} \\ u_{2cz} - u_{2az} \text{ if } u_{2cz} \geq u_{2az} \wedge u_{2cz} > \\ > u_{2bz} \wedge u_{2az} < u_{2cz} \wedge u_{2az} \leq u_{2bz} \end{array} \right. \quad (8)$$

где u_{2az} , u_{2bz} , u_{2cz} – напряжение на выходе второго трансформатора (рис. 1), при соединении его обмоток в «звезду». Для упрощения системы дифференциальных уравнений сложную коммутационную функцию (8) предлагается заменить комбинацией выходных напряжений трансформатора:

$$u_v(t) = 0,86(|u_{2az}| + |u_{2bz}| + |u_{2cz}|). \quad (9)$$

В литературе описаны различные подходы к представлению динамики процесса в пространстве состояний [18–24]. В настоящей работе для понижения порядка системы дифференциальных уравнений трансформаторы и кабельную линию предложено заменить эквивалентной схемой замещения, в виде RLC -цепочки второго порядка (блок «equivalent circuit» на рис. 4), и идеальным трансформатором с коэффициентом усиления k_u . Такая замена позволит снизить число дифференциальных уравнений с одиннадцати [25] до восьми на одну фазу.

Для определения параметров упрощенной схемы замещения L_{eq} , R_{eq} , C_{eq} (рис. 4) в среде Matlab Simulink создана имитационная модель, позволяющая исследовать работу СЭП, представленной на рис. 1, при изменении нагрузки и коэффициента модуляции АИН. При работе данной модели в режиме номинальной нагрузки сняты логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ) $L(\omega) = 20 \log(|A(\omega)|)$ и амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)

$$|A(\omega)| = \frac{U_{2a}(\omega)}{U_{Ca1}(\omega)},$$

где $U_{2a}(\omega)$, $U_{Ca1}(\omega)$ – действующие значения соответствующих линейных напряжений $u_{2a}(t)$ и $u_{Ca1}(t)$, представленных на рис. 1.

Полученные в результате модельного эксперимента ЛАЧХ (рис. 5) и АЧХ (рис. 6) позволяют определить параметры k_u , T , ξ передаточной функции

$$W(p) = \frac{k_u}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1},$$

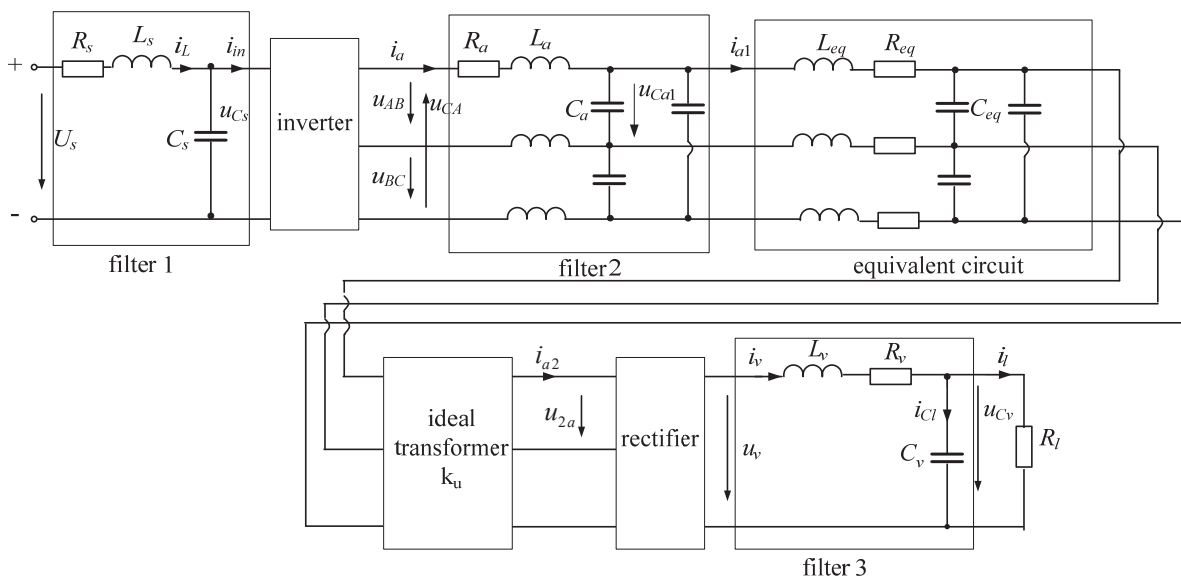


Рис. 4. Упрощенная схема замещения

Fig. 4. Simplified equivalent circuit

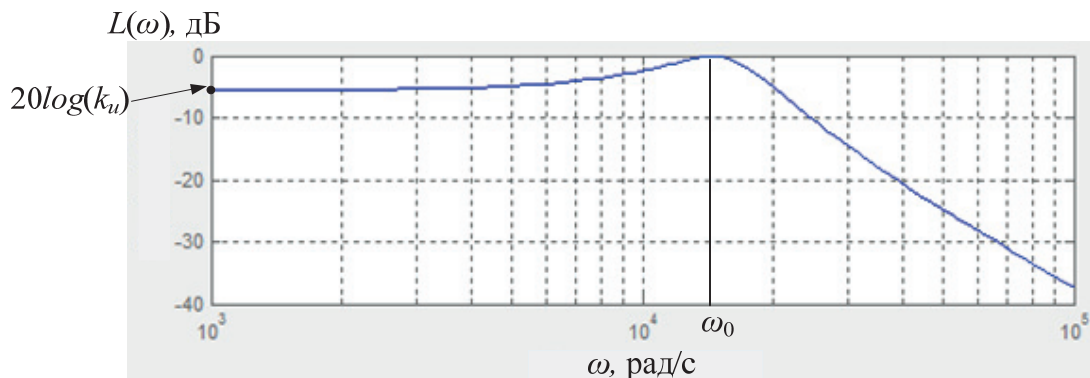


Рис. 5. ЛАЧХ модели СЭП

Fig. 5. Logarithmic frequency response of PSS model

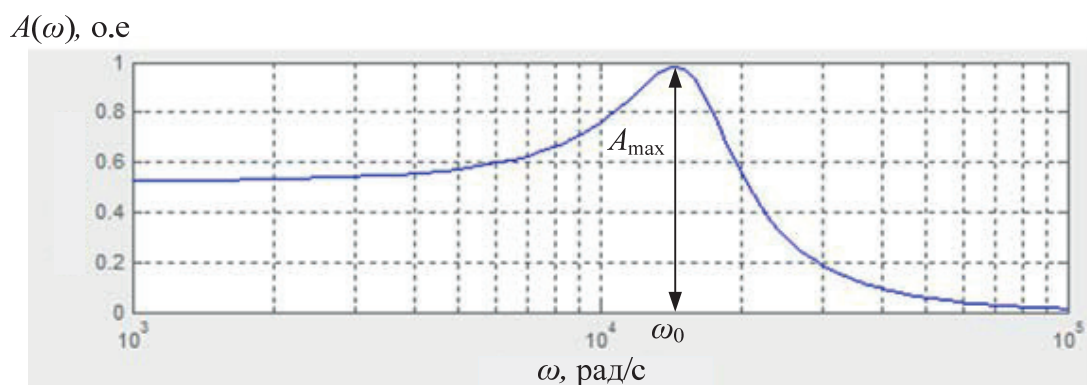


Рис. 6. АЧХ модели СЭП

Fig. 6. Frequency response of PSS model

характеризующей колебательный переходный процесс звена второго порядка.

По экспериментальной ЛАЧХ (рис. 5) из условия $20\log(k_u) = L(\omega = 10^3)$ определен передаточный коэффициент $k_u = 0,526$ и постоянная времени

$$T = \frac{1}{\omega_0} = 6,667 \cdot 10^{-5},$$

где $\omega_0 = 1,5 \cdot 10^4$, рад/с – собственная частота незатухающих колебаний.

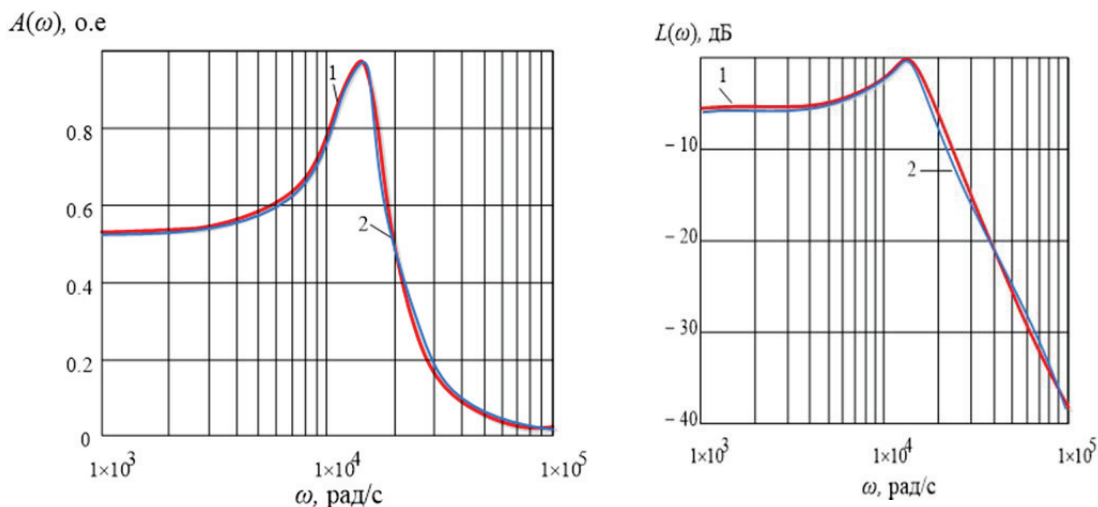


Рис. 7. Расчетные зависимости ЛАЧХ и АЧХ

Fig. 7. Design dependence of logarithmic frequency response and frequency response

Соотношение $2\xi\sqrt{1-\xi^2} = k_u/A_{\max}$ позволяет определить коэффициент демпфирования ξ . Для АЧХ, представленной на рис. 6, значение $A_{\max}=0,979$ о.е., следовательно, коэффициент демпфирования $\xi=0,279$. На рис. 7 представлены ЛАЧХ и АЧХ, рассчитанные по найденным параметрам (кривые 1), а также полученные в результате модельного эксперимента в среде Matlab (кривые 2).

Параметры эквивалентной схемы находились из условия соответствия передаточных функций вто-

рого порядка по напряжению $W_u(p) = \frac{k_u}{LCp + CRp + 1}$

и исходной модели $W(p) = \frac{k_u}{T^2p^2 + 2\xi Tp + 1}$. Из усло-

вий равенства $T^2=CL$; $2\xi T=RC$ и $L/C=200$ определены параметры $R=7,9$ Ом, $L=9,4\cdot 10^{-4}$ Гн, $C=4,7\cdot 10^{-6}$ Ф, по которым легко получить параметры эквивалентной схемы замещения:

$$R_{eq} = \frac{R}{2} = 3,95 \text{ Ом}, \quad L_{eq} = \frac{L}{2} = 4,7\cdot 10^{-4} \text{ Гн},$$

$$C_{eq} = C = 4,7\cdot 10^{-6} \text{ Ф}.$$

Таким образом, нахождение параметров передаточной функции по экспериментально снятой ЛАЧХ позволяет определить параметры эквивалентной схемы замещения выбранной части цепи. Замена двух трансформаторов и кабельной линии цепью второго порядка с параметрами R_{eq} , L_{eq} , C_{eq} позволяет понизить порядок всей системы с 28 уравнений в исходной схеме (рис. 1) до 16 в упрощенной (рис. 4).

Для дальнейших расчетов магнитная связь в идеальном трансформаторе заменена электрической (рис. 8), при этом через коэффициент трансформации пересчитаны значения параметров всех устройств, расположенных после идеального трансформатора (рис. 8):

$$R'_v = R_v k^2, \quad L'_v = L_v k^2, \quad R'_l = R_l k^2, \quad C'_v = \frac{C_v}{k^2},$$

где $k = \frac{1}{k_u}$.

Математическая модель СЭП для полученной упрощенной схемы замещения с приведенными параметрами (рис. 8) записывалась для одной фазы (выбрана фаза А) с целью уменьшения порядка системы дифференциальных уравнений и с учетом симметрии фазных цепей. При этом все соединения параметров по схеме «треугольник» были преобразованы в «звезду» (в уравнениях это преобразование учтено индексом «z»). Для построения системы дифференциальных уравнений в форме Коши составлены уравнения в интегро-дифференциальной форме по законам Кирхгофа для схемы, представленной на рис. 8, из которых выражены переменные состояния.

В результате математическая модель СЭП в пространстве переменных состояния представлена следующими уравнениями:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L_s}(U_s - i_L R_s - u_{Cs});$$

$$\frac{du_{Cs}}{dt} = \frac{1}{C_s} i_L - \frac{1}{C_s} i_m;$$

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{L_a} \left(\frac{u_{AB}}{\sqrt{3}} - i_a R_a - u_{Ca1z} \right);$$

$$\frac{di_{a1}}{dt} = \frac{1}{L_{eq}} (u_{Ca1z} - i_{a1} R_{eq} - u'_{2az});$$

$$\frac{du_{Ca1z}}{dt} = \frac{1}{C_{az}} i_a - \frac{1}{C_{az}} i_{a1};$$

$$\frac{du'_{2az}}{dt} = \frac{1}{C_{eqz}} i_{a1} - \frac{1}{C_{eqz}} i'_{a2};$$

$$i'_{a2} = i'_v \cdot K_{fa}(t); \quad i_{in} = i_a + i_b + i_c, \quad (10)$$

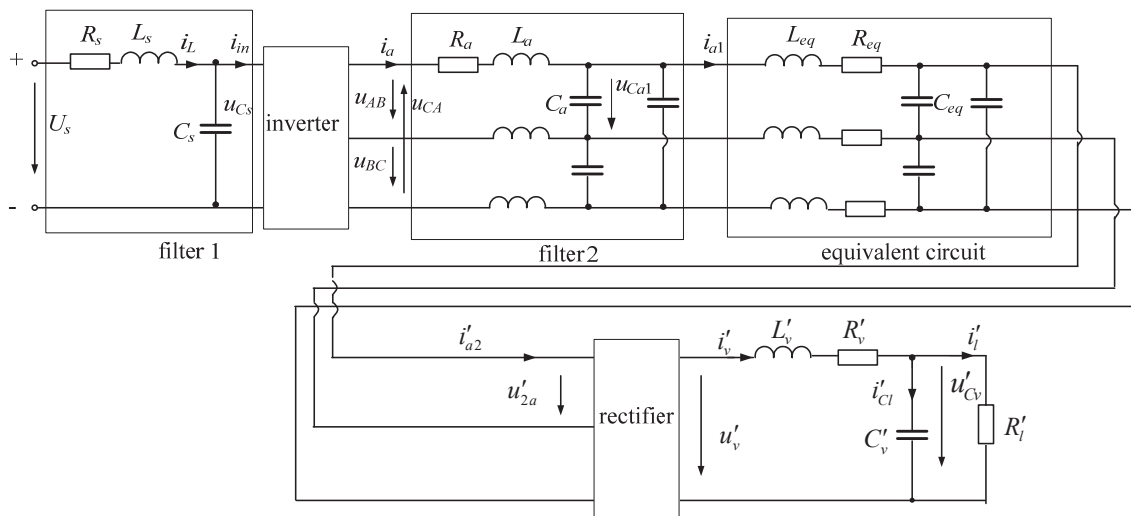


Рис. 8. Упрощенная схема замещения с приведенными параметрами

Fig. 8. Simplified equivalent circuit with corrected parameters

где R_s, L_s, C_s – параметры фильтра на входе АИН («filter 1» на рис. 8); R_a, L_a, C_a (при соединении емкостей в «звезду») – параметры выходного фильтра («filter 2» на рис. 8); u_{AB} – линейное напряжение на выходе инвертора; $u_{C_{a1z}}$ – напряжение на емкости, при соединении «звезда»; i_{in} – входной ток инвертора; $K_{fa}(t)$ – коммутационная функция тока фазы А выпрямителя

$$K_{fa}(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } u'_{2az} > u'_{2bz} \wedge u'_{2az} \geq u'_{2cz} \wedge u'_{2bz} \leq u'_{2cz} \\ 1 & \text{if } u'_{2az} \geq u'_{2bz} \wedge u'_{2az} > u'_{2cz} \wedge u'_{2bz} \leq u'_{2cz} \\ 0 & \text{if } u'_{2bz} \geq u'_{2az} \wedge u'_{2bz} > u'_{2cz} \wedge u'_{2az} \leq u'_{2cz} \\ -1 & \text{if } u'_{2bz} \geq u'_{2cz} \wedge u'_{2bz} > u'_{2az} \wedge u'_{2az} \leq u'_{2cz} \\ 0 & \text{if } u'_{2cz} \geq u'_{2bz} \wedge u'_{2cz} > u'_{2az} \wedge u'_{2bz} \leq u'_{2cz} \\ -1 & \text{if } u'_{2cz} \geq u'_{2az} \wedge u'_{2cz} > u'_{2bz} \wedge u'_{2az} \leq u'_{2bz} \end{cases} \quad (11)$$

где $u'_{2az}, u'_{2bz}, u'_{2cz}$ приведенные значения фазного напряжения вторичной обмотки второго трансформатора.

Коммутационные функции, соответственно фаз В и С, записываются в виде

$$K_{fb}(t) = \begin{cases} -1 & \text{if } u'_{2az} > u'_{2bz} \wedge u'_{2az} \geq u'_{2cz} \wedge u'_{2bz} \leq u'_{2cz} \\ 0 & \text{if } u'_{2az} \geq u'_{2bz} \wedge u'_{2az} > u'_{2cz} \wedge u'_{2bz} \leq u'_{2cz} \\ 1 & \text{if } u'_{2bz} \geq u'_{2az} \wedge u'_{2bz} > u'_{2cz} \wedge u'_{2az} \leq u'_{2cz} \\ 1 & \text{if } u'_{2bz} \geq u'_{2cz} \wedge u'_{2bz} > u'_{2az} \wedge u'_{2az} \leq u'_{2cz} \\ -1 & \text{if } u'_{2cz} \geq u'_{2bz} \wedge u'_{2cz} > u'_{2az} \wedge u'_{2bz} \leq u'_{2cz} \\ 0 & \text{if } u'_{2cz} \geq u'_{2az} \wedge u'_{2cz} > u'_{2bz} \wedge u'_{2az} \leq u'_{2bz} \end{cases} \quad (12)$$

$$K_{fc}(t) = \begin{cases} 0 & \text{if } u'_{2az} > u'_{2bz} \wedge u'_{2az} \geq u'_{2cz} \wedge u'_{2bz} \leq u'_{2cz} \\ -1 & \text{if } u'_{2az} \geq u'_{2bz} \wedge u'_{2az} > u'_{2cz} \wedge u'_{2bz} \leq u'_{2cz} \\ -1 & \text{if } u'_{2bz} \geq u'_{2az} \wedge u'_{2bz} > u'_{2cz} \wedge u'_{2az} \leq u'_{2cz} \\ 0 & \text{if } u'_{2bz} \geq u'_{2cz} \wedge u'_{2bz} > u'_{2az} \wedge u'_{2az} \leq u'_{2cz} \\ 1 & \text{if } u'_{2cz} \geq u'_{2bz} \wedge u'_{2cz} > u'_{2az} \wedge u'_{2bz} \leq u'_{2cz} \\ 1 & \text{if } u'_{2cz} \geq u'_{2az} \wedge u'_{2cz} > u'_{2bz} \wedge u'_{2az} \leq u'_{2bz} \end{cases} \quad (13)$$

Приведенные напряжение нагрузки u'_{Cv} и ток, текущий через индуктивность L'_v фильтра, определяются уравнениями:

$$\frac{du'_{Cv}}{dt} = \frac{1}{C'_v} i'_{Cl}; \quad \frac{di'_v}{dt} = -\frac{R'_v}{L'_v} i'_v + \frac{1}{L'_v} u'_v(t) - \frac{1}{L'_v} u'_{Cv}; \quad (14)$$

где $i'_{Cl} = i'_v - \frac{1}{R'_l} u'_{Cv}$, $i'_v = \frac{1}{R'_l} u'_{Cv}$, а напряжение на выходе выпрямителя представлено комбинацией его входных напряжений:

$$u'_v(t) = 0,86(|u'_{2az}| + |u'_{2bz}| + |u'_{2cz}|). \quad (15)$$

Переход от приведенных значений к реальным токам и напряжениям СЭП осуществляется по формулам:

$$u_{Cv} = u'_{Cv} k_u, \quad u_v = u'_v k_u, \quad u_{2a} = u'_{2a} k_u, \quad i_{a2} = i'_{a2} / k_u, \\ i_v = i'_v / k_u, \quad i_l = i'_l / k_u, \quad i_{Cl} = i'_{Cl} / k_u. \quad (16)$$

Для проверки адекватности выведенной математической модели кривые токов и напряжений системы, рассчитанные методом Эйлера по уравнениям (10)–(16), сравнивались с кривыми токов и напряжений, полученных при моделировании исходной системы (рис. 1) в программной среде Matlab (рис. 9–11). Сравнение проводилось для разных коэффициентов модуляции инвертора.

При моделировании системы электропитания технологического оборудования с передачей энергии по кабель-тросу использовались следующие параметры схемы замещения [25]:

- 1) входное напряжение питания $U_s=540$ В;
- 2) параметры входного фильтра АИН: $R_s=0,5$ Ом, $L_s=1,46$ мГн, $C_s=5$ мФ;
- 3) параметры выходного фильтра АИН: $R_a=1$ Ом, $L_a=0,4$ мГн, $C_a=6$ мкФ;
- 4) параметры повышающего трансформатора 1: $S_{n1}=30$ кВА, $U_{n1}=660$ В, $U_{n2}=1830$ В, $f=1000$ Гц, $R_{a1z}=0,295$ Ом, $L_{a1z}=0,0223$ мГн, $R_{a2z}=2,28$ Ом, $L_{a2z}=0,17$ мГн, $R_{m1}=494$ Ом, $L_{m1}=0,255$ Гн;
- 5) параметры понижающего трансформатора 2: $S_{n2}=60$ кВА, $U_{n1}=1830$ В, $U_{n2}=400$ В, $f=1000$ Гц, $R_{a1z2}=0,071$ Ом, $L_{a1z2}=0,049$ мГн, $R_{a1z2}=0,0035$ Ом, $L_{a2z2}=2,44$ мГн, $R_{m2}=95$ Ом, $L_{m2}=0,226$ Гн;
- 6) параметры кабельной линии: $R_{ak}=19,2$ Ом, $L_{ak}=2,4$ мГн, $C_{ak}=0,496$ мкФ;
- 7) параметры фильтра на выходе выпрямителя: $R_v=0,001$ Ом, $L_v=10$ мГн, $C_v=2480$ мкФ.

Удаленный электромеханический объект имитировался активной нагрузкой $R_l=4$ Ом.

Как следует из графиков, расчетные и экспериментальные кривые практически полностью совпадают, переходный процесс заканчивается за 0,02 секунды. Погрешность расчета установившегося значения напряжения на нагрузке

$$\delta = \frac{|u''_{Cv} - u_{Cv}|}{u''_{Cv}} \cdot 100 \%$$

составила 3 %, по току нагрузки – 4 %. При этом погрешность действующего значения напряжения на выходе фильтра в установившемся режиме не превышает 3,8 %.

Погрешность между расчетными и снятыми в результате имитационного моделирования кривыми токов и напряжений системы электропитания не превышает 4 %, что свидетельствует об адекватности предлагаемой в работе методики по составлению упрощенных схем замещения сложных объектов, параметры которых можно рассчитать из найденных в результате эксперимента передаточных функций. Алгоритм составления упрощенных схем замещения можно представить в виде:

1. Выделение части схемы, которая будет заменена упрощенной эквивалентной схемой замещения.

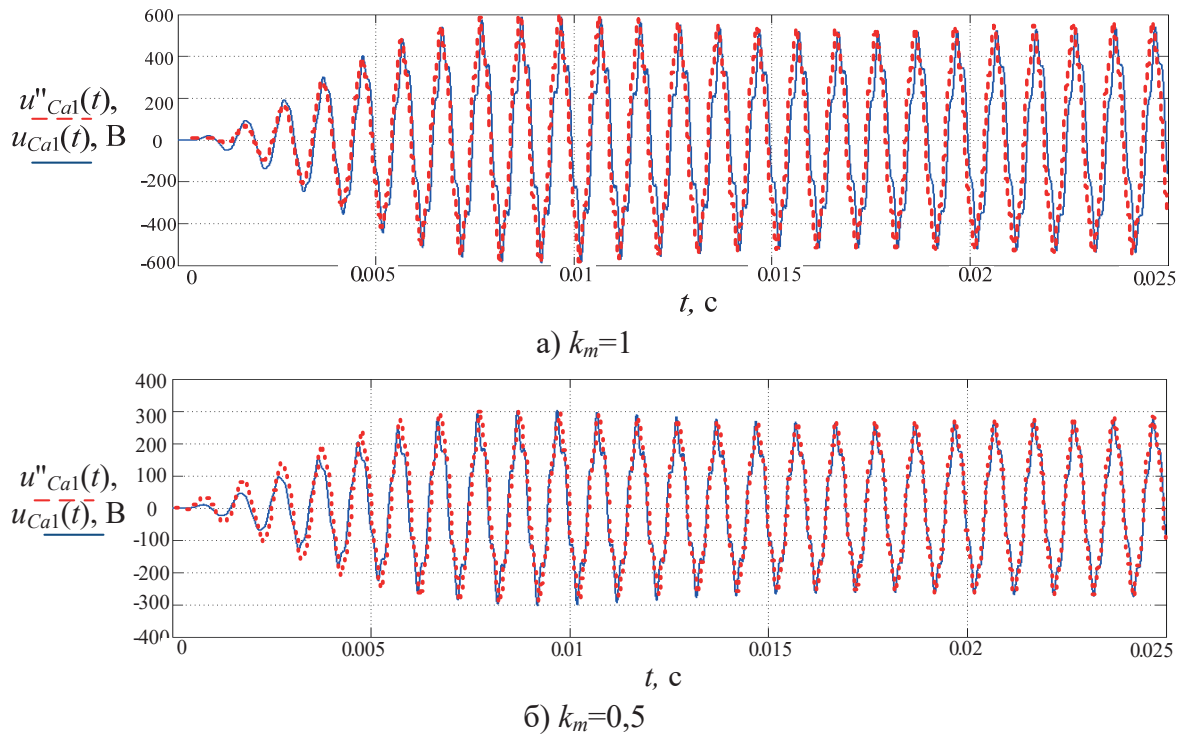


Рис. 9. Напряжение на выходе второго фильтра («filter 2») ($u_{Ca1}''(t)$ – моделирование в Matlab; $u_{Ca1}(t)$ – расчет по математической модели)

Fig. 9. Output voltage of filter 2 ($u_{Ca1}''(t)$ – Matlab simulation; $u_{Ca1}(t)$ – mathematical model calculation)

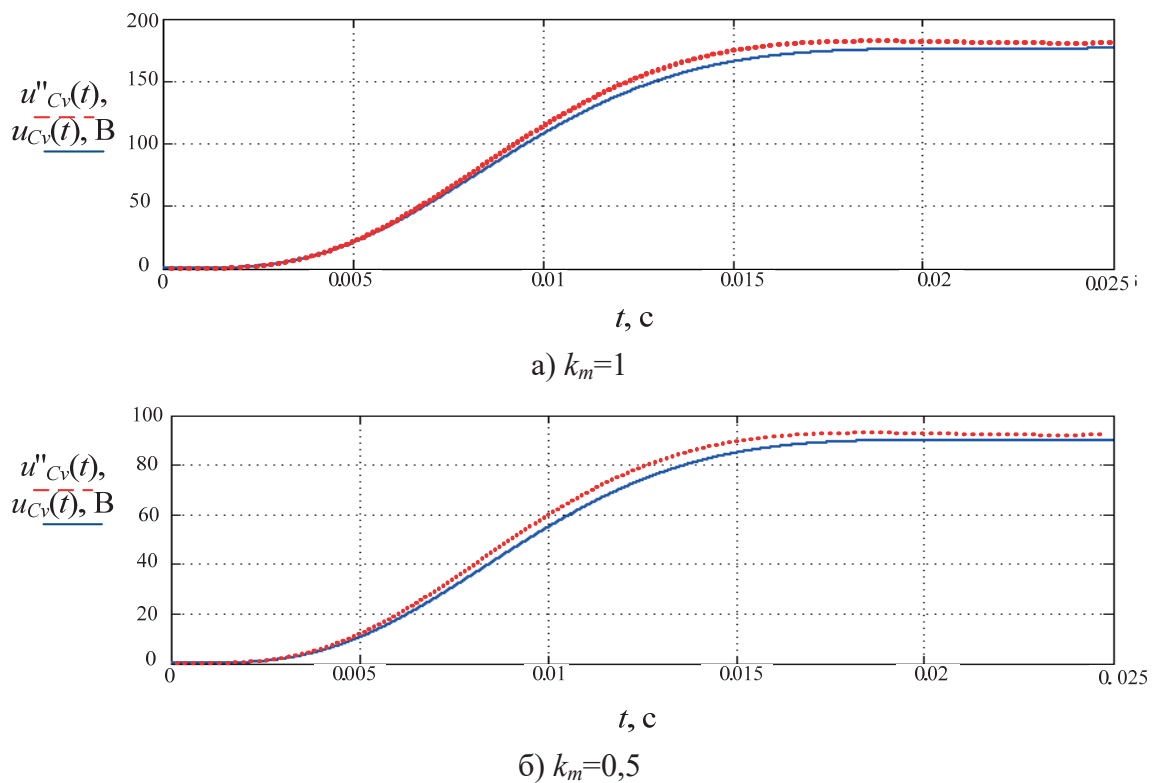


Рис. 10. Напряжение на нагрузке ($u_{Cv}''(t)$ – моделирование в Matlab; $u_{Cv}(t)$ – расчет по математической модели)

Fig. 10. Load voltage ($u_{Cv}''(t)$ – Matlab simulation; $u_{Cv}(t)$ – mathematical model calculation)

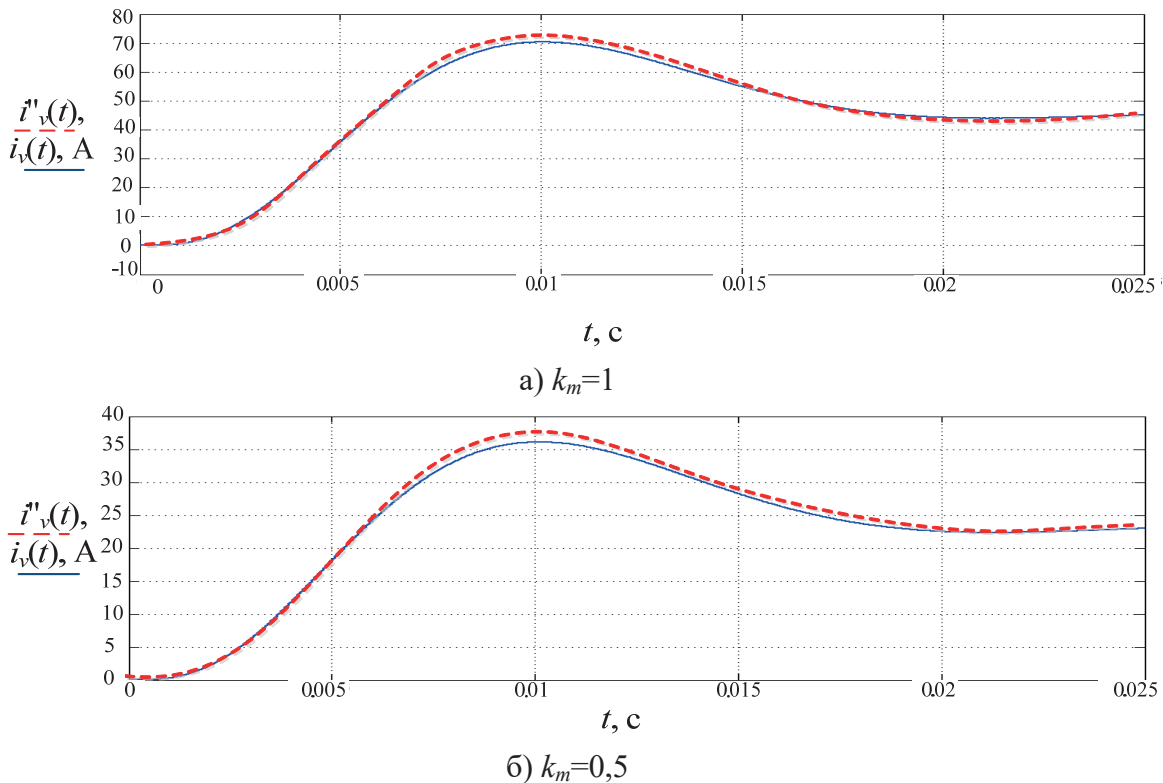


Рис. 11. Ток на выходе выпрямителя ($i_v''(t)$ – моделирование в программной среде Matlab; $i_v(t)$ – расчет по математической модели)

Fig. 11. Rectifier output current ($i_v''(t)$ – Matlab simulation; $i_v(t)$ – mathematical model calculation)

2. Построение для этой части схемы ЛАЧХ и АЧХ и нахождение по ним параметров передаточной функции.
3. Определение параметров эквивалентной схемы замещения по найденным параметрам передаточной функции.
4. Если в схеме присутствуют инверторы и выпрямители, то замена коммутационно-разрывных функций, описывающих их работу, непрерывными (7), (9), что позволит значительно упростить математическую модель системы.

В результате соответствующих преобразований систему уравнений (10)–(16) с учетом симметрии фаз можно представить в векторно-матричной форме:

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B \begin{bmatrix} u_{AB}(k_m, u_{Cs}) \\ u_{BC}(k_m, u_{Cs}) \\ u_{CA}(k_m, u_{Cs}) \end{bmatrix} + CU_s(t), \quad (17)$$

где $x(t)$ – 16-ти мерный вектор переменных состояний; $A(t)$, B – матрицы размерностью 16×16 , в состав которых входят коммутационные функции выпрямителя; C – 16-ти мерный вектор коэффициентов.

Полученное уравнение (17) может служить основой для синтеза оптимальных и робастных регуляторов выходного напряжения СЭП с изменяемыми режимами работы и параметрами полезной нагрузки.

Заключение

В работе показана актуальность и целесообразность аппроксимации многомерной нелинейной математической модели СЭП погружного технологического оборудования линейаризованной моделью более низкого порядка, предназначенной для построения регулятора напряжения требуемого качества методами линейной теории управления.

Рассматривается алгоритм понижения порядка исходного математического описания разомкнутой системы электропитания с определением параметров по ЛАЧХ и АЧХ упрощенной модели на основе численного эксперимента. В результате предложенного алгоритма получена достаточно адекватная схема замещения СЭП с передачей энергии по кабель-тросу, позволяющая записать математическую модель значительно меньшего порядка.

Для проверки адекватности упрощенной математической модели зависимости токов и напряжений системы, рассчитанные методом Эйлера, сравниваются с соответствующими зависимостями, полученными при моделировании исходной системы в программной среде Matlab. Установлено, что расчетные и экспериментальные данные совпадают в установленном режиме с точностью до 96 %.

Полученные результаты позволяют рекомендовать предложенную методику понижения порядка многомерной модели СЭП технологического оборудования для последующего синтеза оптимального регулятора напряжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Glover A.G., Smith C.R. The deep-sea floor ecosystem: Current status and prospects of anthropogenic change by the year 2025 // *Environmental Conservation*. – 2003. – V. 30. – № 3. – P. 219–241.
2. Command Governor Adaptive Control for Unmanned Underwater Vehicles with measurement noise and actuator dead-zone / C.D. Makavita, H.D. Nguyen, S.G. Jayasinghe, D. Ranmuthugala // *2nd International Moratuwa Engineering Research Conference*. – Sri Lanka, 2016. – P. 379–384.
3. Inspection-class remotely operated vehicles – a review / R. Capocci, G. Dooly, E. Omerdić, J. Coleman, T. Newe, D. Toal // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2017. – V. 5 (1). – № 13. – P. 1–32.
4. Румянцев М.Ю., Бериллов А.В. Разработка системы электропитания подводных аппаратов // *Практическая силовая электроника*. – 2012. – № 1. – С. 33–37.
5. Новые технологии и современное оборудование в электроэнергетике нефтегазовой промышленности / И.В. Белоусенко, Г.Р. Шварц, С.Н. Великий, М.С. Ершов, А.Д. Яризов. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2007. – 478 с.
6. AC subsea power transmission architectures, design and challenges, the martin linge case / T. Skaanoey, U. Kerin, N. Van Luijk, E. Thibaut // *Proc. of the Annual Offshore Technology Conference*. – 2017. – № 4. – P. 2920–2928.
7. Hussain H.A., Anvari B., Toliyat H.A. A control method for linear permanent magnet electric submersible pumps in a modified integrated drive-motor system // *IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC*. – Miami, FL, USA, 2017. – Conference Paper № 8002315. – P. 1–7.
8. Gerashchenko A.N., Kulikov N.I., Makarenko A.V. Method of energy efficiency assessment for power supply of autonomous drive systems for perspective mobile objects // *Russian Aeronautics*. – 2015. – V. 58. – № 4. – P. 461–465.
9. Ковалев А.Ю., Кузнецов Е.М., Аникин В.В. Станции управления электропогружными установками насосной эксплуатации скважин. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. – 128 с.
10. Усов В.П. Передаточные функции индукторного электропривода для питания космических аппаратов // *Решетневские чтения*. – 2011. – Т. 2. – № 15. – С. 514–516.
11. Рулевский В.М., Дементьев Ю.Н., Бубнов О.В. Массогабаритные характеристики системы электропитания в функции от рабочей глубины телеуправляемого подводного аппарата // *Известия ТПУ*. – 2006. – Т. 209. – № 1. – С. 163–167.
12. Mathematical model for the power supply system of an autonomous object with an AC power transmission over a cable rope / V.M. Rulevskiy, V.G. Bukreev, E.B. Shandarova, E.O. Kuleshova, S.M. Shandarov, Y.Z. Vasilyeva // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2017. – V. 177 (1). – Conference Paper № 012073. – P. 1–7.
13. Ryvkin S.E., Izosimov D.B. Pulse-width modulation of the three-phase autonomous invertors voltage // *Elektrichestvo*. – 1997. – № 6. – P. 33–39.
14. Чаплыгин Е.Е., Хухтиков С.В. Широтно-импульсная модуляция с пассивной фазой в трехфазных инверторах напряжения // *Электричество*. – 2011. – № 5. – С. 53–61.
15. Обухов С.Г., Чаплыгин Е.Е., Кондратьев Д.Е. Широтно-импульсная модуляция в трехфазных инверторах напряжения // *Электричество*. – 2008. – № 8. – С. 23–31.
16. Зиновьев Г.С. Силовая электроника. – М.: Изд-во «Юрайт», 2015. – 667 с.
17. Чаплыгин Е.Е. Двухфазная широтно-импульсная модуляция в трехфазных инверторах напряжения // *Электричество*. – 2009. – № 8. – С. 56–61.
18. Хорошавин В.С., Зотов А.В., Мокрушин С.А. Общий подход к представлению динамики процесса в пространстве состояний // *Advanced Science*. – 2017. – № 2. – С. 38–46.
19. Долинина А.А., Ланцов В.Н. Алгоритм моделирования нелинейных устройств на основе методов понижения порядка моделей и кусочно-линейной аппроксимации // *Радиотехнические и телекоммуникационные системы*. – 2014. – № 4 (16). – С. 28–33.
20. Bond B., Daniel L. Stable Reduced Models for Nonlinear Descriptor Systems through Piecewise Linear Approximation and Projection // *IEEE Trans. on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*. – 2009. – V. 26. – № 12. – P. 2116–2129.
21. Storace M., De Feo O. Piecewise-linear approximation of nonlinear dynamical systems // *IEEE Transactions on Circuits and Systems*. – 2004. – V. 55 (4). – P. 830–842.
22. Rewienski M., White J. A trajectory piecewiselinear approach to model order reduction and fast simulation of nonlinear circuits and micromachined devices // *IEEE Trans. Comput.-Aided Design Integr. Circuits Syst.* – 2003. – V. 22. – № 2. – P. 155–170.
23. Разработка наблюдателя полного порядка с оперативным мониторингом момента сопротивления для погружных асинхронных электродвигателей / А.С. Глазырин, С.Н. Кладиев, К.С. Афанасьев, В.В. Тимошкин, И.Г. Слепнёв, В.И. Полищук, S. Halasz // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 2. – С. 118–126.
24. Torokhti A., Howlett P., Pearce C. Optimal mathematical models for nonlinear dynamical systems // *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*. – 2003. – V. 9 (3). – P. 327–343.
25. The power supply system model of the process submersible device with AC power transmission over the cable-rope / V.M. Rulevskiy, V.G. Bukreev, E.O. Kuleshova, E.B. Shandarova, S.M. Shandarov, Y.Z. Vasilyeva // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2017. – V. 177 (1). – Conference Paper № 012098. – P. 1–6.

Поступила 28.03.2018 г.

Информация об авторах

Букреев В.Г., доктор технических наук, профессор Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Шандарова Е.Б., кандидат технических наук, доцент Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Рулевский В.М., кандидат технических наук, директор Научно-исследовательского института автоматизации и электромеханики Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

UDC 621.314.58:681.5.015

POWER SUPPLY SYSTEM MODEL OF REMOTE PROCESSING EQUIPMENT

Viktor G. Bukreev¹,
bukreev@tpu.ru

Elena B. Shandarova¹,
shandarovaelena@mail.ru

Victor M. Rulevskiy²,
rulevsky@niiam.tomsk.ru

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

² Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
40, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Nowadays, the relevant and challenging research areas are survey of crustal structure, natural environment of the world ocean, and oil and gas resource potential. To perform such studies, various submersible equipment with remote energy source is often applied. This equipment includes electrotechnical equipment of tethered submersibles and electric motors of submersible centrifugal pumps. Long-term operation of such processing equipment requires continuous electric power supply over a cable-rope. This problem can be solved using specialized power supply systems that provide the necessary voltage conversion of the primary energy source, most often of limited power.

The main aim of the research is to solve the problem of approximating a nonlinear mathematical model of the power supply system of processing equipment by a simpler model in the state space. This problem is rather important when designing voltage regulators of the power supply systems for submersible centrifugal pumps of oil-production equipment and tethered submersibles.

The methods: state variable method, methods of mathematical modeling.

The results. The authors have developed the algorithm for approximating a nonlinear mathematical model of the power supply system of process equipment over a cable-rope. The resulting simplified model was represented in the state space and allows us to use well-proven methods of the linear control theory to synthesize a voltage regulator.

Conclusion. The paper describes the simpler model in the state space of the power supply system of processing equipment with an AC power transmission over a cable-rope. A comparative assessment of the simulation results introduced in the paper shows the validity of the model of a reduced order in relation to the initial, more complex mathematical model.

Key words:

Power supply system, mathematical model, approximation, transfer function, state variable method.

REFERENCES

- Glover A.G., Smith C.R. The deep-sea floor ecosystem: Current status and prospects of anthropogenic change by the year 2025. *Environmental Conservation*, 2003, vol. 30, no. 3, pp. 219–241.
- Makavita C.D., Nguyen H.D., Jayasinghe S.G., Ranmuthugala D. Command Governor Adaptive Control for Unmanned Underwater Vehicles with measurement noise and actuator dead-zone. *2nd International Moratuwa Engineering Research Conference*. Sri Lanka, 2016. pp. 379–384.
- Capocci R., Dooly G., Omerdić E., Coleman J., Newe T., Toal D. Inspection-class remotely operated vehicles-a review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2017, vol. 5, no. 1, pp. 1–32.
- Rumyantsev M.Yu., Berilov A.V. Development of a powersupply system for underwater vehicles. *Practical Power Electroincs*, 2012, no. 1, pp. 33–37. In Rus.
- Belousenko I.V., Shvarts G.R., Velikiy S.N., Ershov M.S., Yarizov A.D. *Novye tekhnologii i sovremennoe oborudovanie v elektroenergetike neftegazovoy promyshlennosti* [New technologies and modern equipment in power engineering of oil and gas industry]. Moscow, Nedra-Biznestsentr Publ., 2007. 478 p.
- Skaanoey T., Kerin U., Van Luijk N., Thibaut E. AC subsea power transmission architectures, design and challenges, the martin linge case. *Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference*, 2017, no. 4, pp. 2920–2928.
- Hussain H.A., Anvari B., Toliyat H.A. A control method for linear permanent magnet electric submersible pumps in a modified integrated drive-motor system. *IEEE International Electric Machines and Drives Conference*. Miami, FL, USA, 2017. Conference Paper no. 8002315, pp. 1–7.
- Gerashchenko A.N., Kulikov N.I., Makarenko A.V. Method of energy efficiency assessment for power supply of autonomous drive systems for perspective mobile objects. *Russian Aeronautics*, 2015, vol. 58, no. 4, pp. 461–465.
- Kovalev A.Yu., Kuznetsov E.M., Anikin V.V. *Stantsii upravleniya elektropogruzhnyimi ustanovkami nasosnoy ekspluatatsii skvazhin promyshlennosti* [Control stations for submersible pumping wells]. Omsk, OmGTU Publ., 2013. 128 p.
- Usov V.P. Transfer functions of inductive double way fed power electric drive for spacecraft. *Reshetnev Readings*, 2011, vol. 2, no. 15, pp. 514–516. In Rus.
- Rulevskiy V.M., Dementiyev Yu.N., Bubnov O.V. Mass characteristics of power-supply system in the function from operating depth of remotely controlled submersible craft. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2006, vol. 309, no. 1, pp. 163–167. In Rus.
- Rulevskiy V.M., Bukreev V.G., Shandarova E.B., Kuleshova E.O., Shandarov S.M., Vasilyeva Y.Z. Mathematical model for the power supply system of an autonomous object with an AC power transmission over a cable rope. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 177 (1), Conference Paper no. 012073, pp. 1–7.
- Ryvkin S.E., Izosimov D.B. [Pulse-width modulation of the three-phase autonomous invertors voltage]. *Elektrichestvo*, 1997, no. 6, pp. 33–39.

14. Chaplygin E.E., Khukhtikov S.V. Pulse width modulation with passive phase in three-phase voltage inverters. *Elektrichestvo*, 2011, no 5, pp. 53–61. In Rus.
15. Obukhov S.G., Chaplygin E.E., Kondratev D.E. Pulse width modulation in three-phase voltage inverters. *Elektrichestvo*, 2008, no. 8, pp. 23–31. In Rus.
16. Zinovev G.S. *Silovaya elektronika* [Power Electronics]. Moscow, Yurayt Publ., 2015. 667 p.
17. Chaplygin E.E. Two phase pulse width modulation in three-phase voltage inverters. *Elektrichestvo*, 2009, no. 8, pp. 56–61. In Rus.
18. Khoroshavin V.S., Zotov A.V., Mokrushin S.A. General approach to representation of a process dynamics in the state space. *Advanced Science*, 2017, no. 2, pp. 38–46. In Rus.
19. Dolinina A.A., Lantsov V.N. Algorithm of simulation of nonlinear devices on the basis of reduced order model methods and piecewise linear approximation. *Radio and telecommunication systems*, 2014, no. 4 (16), pp. 28–33. In Rus.
20. Bond B., Daniel L. Stable Reduced Models for Nonlinear Descriptor Systems through PiecewiseLinear Approximation and Projection. *IEEE Trans. on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2009, vol. 26, no. 12, pp. 2116–2129.
21. Storace M., De Feo O. Piecewise-linear approximation of nonlinear dynamical systems. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 2004, vol. 55 (4), pp. 830–842.
22. Rewienski M., White J. A trajectory piecewiselinear approach to model order reduction and fast simulation of nonlinear circuits and micromachined devices. *IEEE Trans. Comput.-Aided Design Integr. Circuits Syst*, 2003, vol. 22, no. 2, pp. 155–170.
23. Glazyrin A.S., Kladiev S.N., Afanasiev K.S., Timoshkin V.V., Slepnev I.G., Polishchuk V.I., Halász S. Design of full order observer with real time monitoring of load torque for submersible induction motors. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 2, pp. 118–126.
24. Torokhti A., Howlett P., Pearce C. Optimal mathematical models for nonlinear dynamical systems (2003). *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, 2003, vol. 9 (3), pp. 327–343.
25. Rulevskiy V.M., Bukreev V.G., Kuleshova E.O., Shandarova E.B., Shandarov S.M., Vasilyeva Y.Z. The power supply system model of the process submersible device with AC power transmission over the cable-rope. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 177 (1), Conference Paper no. 012098, pp. 1–6.

Received: 28 March 2018.

Information about the authors

Viktor G. Bukreev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Elena B. Shandarova, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Victor M. Rulevskiy, Cand. Sc., director, Research Institute of Automation and Electromechanics, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.

УДК 552.578.2.061.4.08:550.4+553.98.041(571)

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ВЫЯВЛЕНИЯ КОЛЛЕКТОРОВ И ПРОГНОЗА ИХ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ В ТЕРРИГЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ПУР-ТАЗОВСКОЙ НЕФТЕГАЗОНОСНОЙ ОБЛАСТИ

Исаева Елена Ринатовна¹,
isaevaer@tpu.ru

Ворошилов Валерий Гаврилович¹,
v_g_v@tpu.ru

Тимкин Тимофей Васильевич¹,
timkin@tpu.ru

Mansour Ziiai²,
m.ziiai47@gmail.com

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

² Шахрудский технологический университет,
Иран, Шахруд.

Актуальность исследований обусловлена необходимостью разработки новых подходов к оценке нефтегазоносности терригенных отложений, основанных на изучении геохимии металлов в процессах наложенного эпигенеза.

Цель работы: установить закономерности перераспределения химических элементов в результате процессов, происходящих в системе «нефть–вода–порода»; на основе литогеохимических данных разработать методику оценки коллекторских свойств пород и характера насыщенности коллекторов.

Материал и методы исследования. В основу работы положены данные по распределению U, K, Ca, Ti, Cr, Fe, Mn, Rb, Sr, Ba, Zr в выделенных авторами зонах наложенного эпигенеза юрско-меловых нефтегазоносных отложений. Закономерности распределения данных элементов изучались в комплексе с литологическими и минералого-петрографическими исследованиями по керну и шламу поисковых и разведочных скважин, пробуренных в районе Ванкорского месторождения. Содержания U в породах определялись методом запаздывающих нейтронов (2330 проб керна и шлама), содержания ряда элементов (K, Ca, Ti, Cr, Fe, Mn, Rb, Sr, Ba, Zr) – на экспрессном рентгенфлуоресцентном энергодисперсионном анализаторе INNOV-X50 (396 проб керна) с внешним контролем анализов методом ICP MS. Особенности состава новообразованных минералов изучались с использованием сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA 3 SBU.

Результаты. Установлено, что в изучаемых отложениях уран является индикаторным элементом зон высокопористых пород-коллекторов, характеризующихся аномально низкими его концентрациями. Выявлено закономерное перераспределение ряда химических элементов, связанное с формированием залежей углеводородов, что позволяет осуществлять прогноз нефтегазоносности разреза терригенных отложений на основе литолого-геохимических данных. В пределах изученной территории выделены интервалы продуктивных отложений, рекомендуемые к испытаниям.

Ключевые слова:

Наложённый эпигенез, геохимия, водонефтяной контакт, прогноз нефтегазоносности, Пур-Тазовская нефтегазоносная область.

Перераспределение вещества в процессе миграции углеводородных и неуглеводородных флюидов приводит к изменению внутреннего строения пород-коллекторов [1, 2]. Причина этих масштабных геохимических миграций не только формирование тектонически ослабленных зон [1, 3, 4], но и процессы становления залежей углеводородов [5]. Помимо повсеместно проявленных диагенетических и катагенетических преобразований, породы терригенного разреза нередко несут следы внестадиальных (наложенно-эпигенетических) [1, 2] изменений. Так, согласно [2, 6–12], при заполнении коллекторов углеводородами в зонах стабилизации водонефтяного контакта (ВНК) происходит интенсивное растворение минералов (полевых шпатов, карбонатов, кварца и др.), что приводит к формированию зоны разуплотнения (выщелачивания) пород [13–15]. Частичное переотложение вы-

щелоченных петрогенных компонентов происходит в зоне цементации [16].

Для поисков и разведки нефтегазоносных отложений используется шесть основных разновидностей геохимических методов исследования: газогеохимический (атмогеохимический), битуминологический, изотопно-геохимический, биогеохимический, гидрогеохимический и литогеохимический [17–19]. Методы подразделяются на прямые, основанные на исследовании геохимии углеводородов, и косвенные, изучающие поведение неорганических элементов и соединений, миграция которых связана с формированием и преобразованием нефтегазовых залежей. Литогеохимический метод для поисков и оценки ресурсного потенциала нефтегазоносных отложений используется относительно редко и обычно в комплексе с газогеохимическими исследованиями [20]. Несмотря на то, что

минералогическая зональность в зонах ВНК была описана еще в 70-х гг. XX в. [21], примеры исследования взаимосвязей литогеохимических аномалий с процессами стабилизации ВНК и нефтегазоносностью отложений до сих пор немногочисленны. Например, на Вознесенском месторождении (Бижбулякский район Республики Башкортостан) были выявлены повышенные концентрации урана (до 1,27 %) в битуминозных сульфидизированных песчаниках, а также установлена пространственная связь сульфидной минерализации (пирита, халькопирита, галенита, молибденита, арсенидов) и нефти. Кроме этого, были обнаружены аномалии полиметаллов, урана, ртути, кадмия, молибдена, никеля, связанные с нефтегазоносностью в других районах Башкортостана [22].

Эти примеры показывают, что закономерности распределения в нефтеносных отложениях ряда химических элементов, прежде всего металлов, могут и должны быть использованы в качестве независимых критериев геометризации зон продуктивных отложений.

Объектом исследования являются юрско-меловые отложения, вскрытые девятью глубокими скважинами, пробуренными на территории Пур-Тазовской нефтегазоносной области (северо-восток Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна) (рис. 1).

Выявлено, что в процессе становления юрско-меловая толща претерпела следующие изменения: диагенетические, катагенетические при эволюции в процессе погружения осадочного бассейна (стадиальный эпигенез), а также наложенные эпигенетические преобразования, сопровождающие процессы флюидомиграции и формирования нефтегазоносных объектов в период инверсионного развития территории [1]. Разделять минеральные ассоциации стадиального и наложенного эпигенеза достаточно сложно из-за конвергентности их признаков. Поэтому в данной работе используется слово «эпигенез», применяемое как термин, обозначающий «вторичные процессы, ведущие к любым последующим изменениям и новообразованиям, связанным с постседиментационной историей осадка, а затем и осадочной породы» [1].

Диагенетические преобразования изучаемых терригенных отложений проявились в трансформации обломочных и аутигенных минералов, их растворении и замещении новыми минеральными ассоциациями. К диагенетическим минералам в изучаемых отложениях можно отнести глауконит, пирит, каолинит и карбонаты.

В результате диагенеза породы подверглись уплотнению, неустойчивые обломки полевых шпатов разрушались, глинизировались.

Диагенетический каолинит представлен в виде неравномерно раскристаллизованных агрегатов размером около 0,02 мм. Хлорит часто замещает биотит, гидрослюда, глауконит, а также вулканические обломки.

Кальцит (реже микрозернистый ромбоэдрический доломит) обычно встречается в цементной массе.

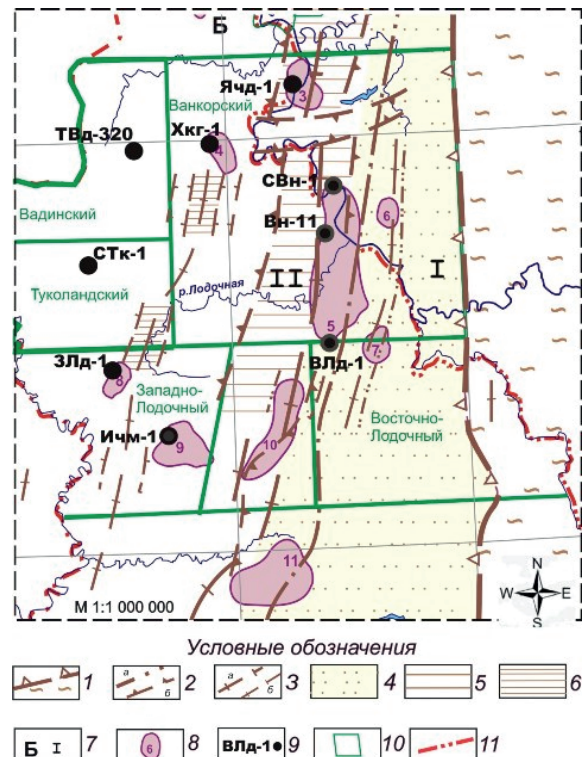


Рис. 1. Схема района исследования (за основу взята выкипировка из тектонической схемы фундамента (фрагмент карты (Кринин, 2006ф)). Условные обозначения: 1 – граница Сибирской платформы и ЗСП; 2 – а) грабены; б) горсты; 3 – оси антиклинорий а) первого порядка; б) второго порядка. Площади развития 4 – Приенисейского грабена; 5 – Большехетско-Тагульского горста; 6 – Хикиглино-Верхнеподочного горстоподобного блока; 7 – геоструктуры: Б – Худосейский грабен-рифт, I – Приенисейский грабен, II – Большехетско-Тагульский горст; 8 – локальные положительные структуры: 3 – Ячиндинская; 4 – Хикиглинская; 5 – Ванкорская; 6 – Ниричарская; 7 – Талая; 8 – Западно-Лодочная; 9 – Ичемминская; 10 – Лодочная; 11 – Тагульская; 9 – исследуемые скважины глубокого бурения: СВн-1 – Северо-Ванкорская-1; Вн-11 – Ванкорская-11; ВЛд-1 – Восточно-Лодочная-1; Ячд-1 – Ячиндинская-1; Хкг-1 – Хикиглинская-1; Ичм-1 – Ичемминская-1; Злд-1 – Западно-Лодочная-1; СТк-1 – Северо-Туколандская-1; ТВд-320 – Туколандо-Вадинская-320; 10 – границы ЛУ; 11 – административные границы

Fig. 1. Scheme of the study area (the basement tectonic scheme (map (Krinin, 2006f)) was taken as a basis). Legend: 1 is the boundary of the Siberian platform and the West Siberian plate; 2 are the: a) grabens; b) horsts; 3 are the axes of anticlinoria of the a) first order; b) second order. Development area: 4 – the Yenisei Graben; 5 – Bolshekhetsk-Tagulsky Horst; 6 – Khikigilino-Verkhnelodochny similar to highland unit; 7 are the geostructures: B – Khudoseisky Graben-rift, I – Yenisei Graben, II – Bolshekhetsk-Tagulsky Gorst; 8 are the local positive structures: 3 – Yachindinskaya; 4 – Khikigilinskaya; 5 – Vankorskaya; 6 – Niricharskaya; 7 – Talaya; 8 – Zapadno-Lodochnaya; 9 – Ichemminskaya; 10 – Lodochnaya; 11 – Tagulskaya; 9 are the surface drillings: СВн-1 – Severo-Vankorskaya-1; Вн-11 – Vankorskaya-11; ВЛд-1 – Vostochno-Lodochnaya-1; Ячд-1 – Yachindinskaya-1; Хкг-1 – Khikigilinskaya-1; Ичм-1 – Ichemminskaya-1; Злд-1 – Zapadno-Lodochnaya-1; СТк-1 – Severo-Tukalandskaya-1; ТВд-320 – Tukalando-Vadinskaya-320; 10 are the borders of license areas; 11 are the administrative boundaries

Пирит наблюдается в отложениях довольно часто, представлен в основном в виде агрегатов кубических и глобулярных зерен. Распределение сульфида неравномерно рассеянное. Он может заполнять межобломочное пространство, образовывать линзы, ориентированные вдоль слоистости.

Сидерит встречается довольно часто как в обломочных, так и в глинистых породах в виде цементной массы, псевдоморфоз по органике, неправильных стяжений, пятен, ориентированных вдоль слоистости. Его содержание может достигать 25 %. В соответствии с представлениями Н.М. Страхова [23], образование сидеритовых стяжений происходит в восстановительных условиях, при слабощелочной обстановке среды (рН 7,2–7,6).

Катагенетические процессы обуславливают дальнейшие структурно-текстурные и минеральные изменения пород. На фоне механического уплотнения и прогрессирующей гравитационной коррозии терригенных обломков образуются конформные и инкорпорационные сочленения зерен, формируются новые аутигенные минералы (регенерационный кварц, доломит, кальцит, каолинит), заполняющие поровое пространство и замещающие исходные зерна.

Для катагенетически преобразованных пород характерен процесс слюдизации – укрупнение

первичных гидрослюдистых агрегатов. Повышенное содержание слюдяных минералов характерно для терригенных пород с гидрослюдистым цементом, а также для глинистых аргиллитов. Слюды имеют форму удлиненных, таблитчатых чешуек, часто изогнутых, с зазубренными краями. Биотит часто хлоритизирован и гидратизирован.

Распределение слюд послойное, параллельное напластованию. Иногда формируются пленочные гидрослюдистые цементы.

Наложено-эпигенетические процессы в изучаемых отложениях в основном проявлены вблизи нефтяных залежей. Поступление нефти в коллектор приводит к зональному преобразованию пород (сверху вниз): 1) зона слабоизмененных пород; 2) зона выщелачивания (разуплотнения) с а) битумсодержащей подзоной и б) безбитумной подзоной; 3) зона цементации (рис. 2).

В зоне слабоизмененных пород (нефтенасыщения) при полном заполнении нефтью коллектора происходит консервация породы от дальнейшего преобразования. Данная зона характеризуется наличием первичного каолинит-гидрослюдистого цемента смешанного состава и слабым проявлением процессов вторичного преобразования.

Ниже, в результате процессов, происходящих при взаимодействии в системе «нефть–вода–поро-

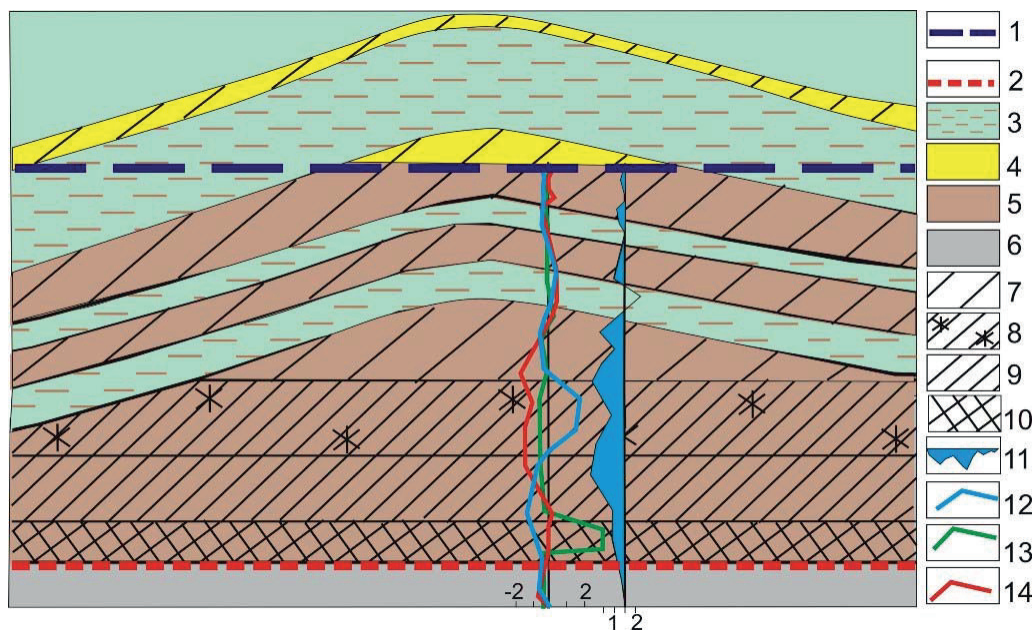


Рис. 2. Схема геохимической и минералогической зональности при заполнении ловушки нефтью (на примере меловых отложений яковлевской свиты, Ванкорское месторождение). Условные обозначения: 1 – газонефтяной контакт; 2 – водонефтяной контакт; 3 – непроницаемые отложения; 4 – газонасыщение пласта; 5 – нефтенасыщение пласта; 6 – водонасыщение пласта; 7 – зона слабого изменения; 8 – битумсодержащая подзона выщелачивания; 9 – безбитумная подзона выщелачивания; 10 – зона цементации; 11 – отрицательные аномалии урана; 12–14 – графики геохимических ассоциаций (в значениях факторов): 12 – Fe, Ti, Cr; 13 – Ca, Mn, Sr; 14 – U, K, Rb

Fig. 2. Scheme of geochemical and mineralogical zoning when filling the trap with oil (on the example of the Cretaceous deposits of the Yakovlevskaya Suite, Vankor field). Legend: 1 is the gas-oil contact; 2 is the oil-water contact; 3 are the impermeable rocks; 4 is the layer gas saturation; 5 is the layer oil saturation; 6 is the layer water saturation; 7 is the zone of low conversion rocks; 8 is the bitumen containing leaching sub-zone; 9 is the bitumen-free leaching sub-zone; 10 is the cementation zone; 11 are the negative anomalies of uranium; 12–14 are the graphs of geochemical associations (values of factors): 12 – Fe, Ti, Cr; 13 – Ca, Mn, Sr; 14 – U, K, Rb

да» в пределах ВНК, формируется зона разуплотнения (растворения, выщелачивания) пород, которая подразделяется на две подзоны: битумсодержащую и безбитумную.

Битумсодержащая подзона отражает область непосредственного окисления углеводородов в поровых растворах и приурочена к переходной части ВНК [2]. Окисление нефти сопровождается растворением обломков и цемента, образованием твердого битума, пирита и продуктов окисления – различных агрессивных растворителей, прежде всего жирных кислот, формирующих кислую среду [2, 6]. Обнаруженная битумсодержащая подзона, предположительно, является проявлением в разрезе следов древнего ВНК прогрессивного типа (по Р.С. Сахибгарееву) [2].

Расположенная ниже безбитумная подзона – область диффузии агрессивных продуктов окисления нефтей, поступающих из битумсодержащей подзоны [2]. Геохимические процессы здесь связаны с растворением пород, приобретением мозаичного строения цементной матрицы, формированием мономинерального каолинового цемента. По мере растворения скелетной и цементной частей обломочных пород в направлении подошвы пласта осуществляется снижение кислотности и обогащение растворов щелочными и щелочноземельными элементами. В этих условиях алюминий теряет подвижность, формируется каолинит, который является индикаторным элементом этой подзоны.

В зоне цементации происходит формирование мономинерального карбонатного (либо кварцевого) цемента, что приводит к резкому снижению объема пустотно-порового пространства (рис. 2).

В изученном районе наложенный эпигенез наиболее проявлен в отложениях яковлевской K_{1jak} и нижнехетской K_{1nch} свит, в меньшей степени, в породах малышевской J_2ml , леонтьевской J_2ln и вымской J_2vm свит [24].

Процессы, происходящие в системе «нефть–вода–порода», приводят к существенному перераспределению химических элементов. Наиболее информативным из них является уран, что связано с его высокой чувствительностью к смене рН и Eh среды, а также зависимостью его концентраций от гранулометрического состава пород [25–28]. Эти свойства урана позволяют использовать его в качестве индикаторного элемента зон преобразованных пород [29].

Зависимость содержания урана от гранулометрического состава пород выражается в постепенном снижении его концентраций в ряду: аргиллиты–алевролиты–песчаники. В результате статистической обработки данных нами установлена отрицательная корреляционная связь коэффициентов открытой пористости ($K_{по}$) и проницаемости ($K_{пр}$) с содержаниями урана, что свидетельствует о снижении концентраций этого элемента в зонах разуплотненных пород (рис. 1). Коэффициент ранговой корреляции Спирмена равен $-0,52$ (уран и

$K_{по}$) и $-0,54$ (уран и $K_{пр}$) при $r_{крит} = 0,08$ (для доверительной вероятности 95 %) (рис. 3).

Распределение урана в терригенных породах изученного разреза подчиняется логнормальному закону, поэтому граница между фоновыми и аномальными содержаниями для каждой разновидности пород (аргиллитов, алевролитов и песчаников) рассчитана по формуле [30, 31]:

$$\tilde{X} / \varepsilon^3 > X_{аном} > \tilde{X} \cdot \varepsilon^3, \quad (1)$$

где \tilde{X} – среднее геометрическое значение фона; ε – стандартный множитель.

Правая часть уравнения определяет уровень положительных аномалий (зоны накопления урана), левая часть – уровень отрицательных аномалий (зоны высокопористых пород).

За фон нами приняты концентрации химических элементов в стадильно преобразованных терригенных породах, слагающих изученный разрез (табл. 1). В результате статистической обработки установлено, что фоновые содержания U в песчаниках находятся в пределах от 1,46 до 2,47 г/т, в алевролитах – от 1,73 до 3,05 г/т, в аргиллитах – от 1,8 до 3,36 г/т.

Повышенные содержания урана (более 3,3 г/т) характерны для обогащенных органическим веществом ($C_{орг}$) аргиллитов нефтегазоматеринской яновстанской свиты.

Значительно реже повышенные концентрации урана встречаются в нижнемеловых отложениях нижнехетской и суходудинской свит, а также в юрских – сивовской, точинской, малышевской, леонтьевской и вымской свитах. Такие породы характеризуются пониженным содержанием Ва.

Таблица 1. Статистическая значимость различий содержаний элементов в исходных и эпигенетически преобразованных породах

Table 1. Statistical significance of element contents differences in the source and converted epigeneticist rocks

Элементы Elements	Среднее содержание элементов в породах, г/т Average content of elements in rocks, g/t								
	1	2	p	1	3	p	2	3	p
U	3,4	2,4	0,99	3,4	1,1	0,99	2,4	1,1	0,99
K	27569	25735	0,81	27569	22280	0,99	25735	22280	0,93
Ca	9978	12049	0,87	9978	7846	0,88	12049	7846	0,99
Ti	9082	6876	0,83	9082	2932	0,99	6876	2932	0,99
Cr	103	86	0,66	103	42	0,99	86	42	0,99
Mn	509	425	0,63	509	254	0,99	425	254	0,99
Fe	47902	44382	0,37	47902	22328	0,99	44382	22328	0,99
Rb	64	63	0,23	64	56	0,49	63	56	0,33
Sr	232	249	0,86	232	239	0,66	249	239	0,36
Zr	139	111	0,59	139	72	0,99	111	72	0,99
Ba	675	770	0,97	675	973	0,99	770	973	0,99

Примечание: 1 – породы с повышенным содержанием $C_{орг}$ (формула 1); 2 – стадильно преобразованные породы (фон); 3 – породы, подвергшиеся наложенному эпигенезу; p – доверительная вероятность отличий в содержаниях элементов сравниваемых выборок.

Note: 1 are the rocks with high content of $C_{орг}$ (formula 1); 2 are the stadially converted rocks (background); 3 are the rocks subjected to superimposed epigenesis; p is the confidence probability of differences in element contents of the compared sampling.

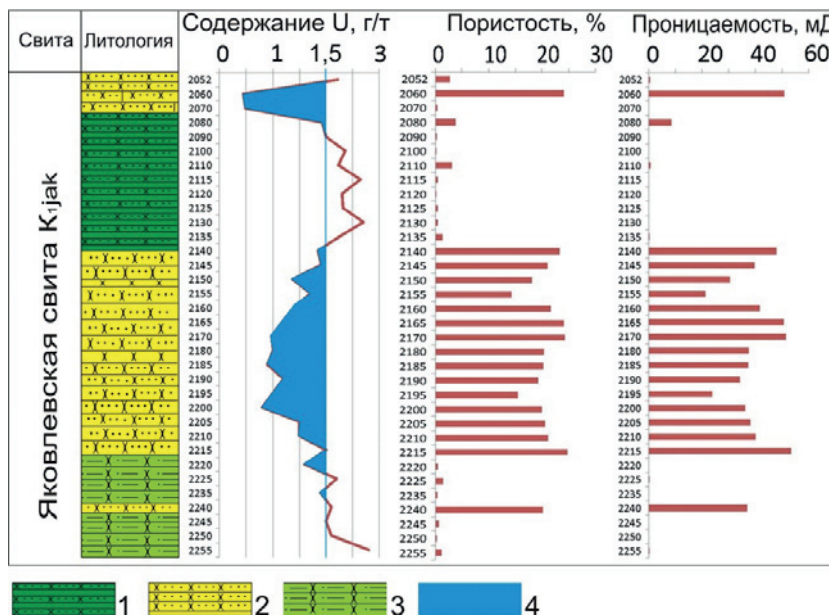


Рис. 3. Фрагмент разреза по скважине Западно-Лодочная-1. Условные обозначения: 1 – переслаивание песчаников и аргиллитов; 2 – песчаники; 3 – глинистые песчаники; 4 – отрицательные аномалии урана

Fig. 3. Fragment of a section along the well Zapadno-Lodochnaya-1. Legend: 1 is the layering of sandstones and mudstones; 2 are the sandstones; 3 are the clayey sandstones; 4 are the negative anomalies of uranium

Статистическая обработка данных показала, что для высокопористых пород характерны пониженные содержания урана – от 0,38 до 1,5 г/т. Установлено также снижение относительно фона концентраций Ti, Cr, Fe, Mn, Ca и Zr. Отмечаются повышенные содержания Ba, который концентрируется в виде барита ($BaSO_4$) (табл. 1).

Факторным анализом установлено наличие в зоне ВНК трех устойчивых ассоциаций химических элементов. Первый фактор характеризуется повышенной корреляционной связью Ti, Cr и Fe. Вторая ассоциация представлена Ca, Mn и Sr. Третий фактор объединяет U, K и Rb (табл. 2).

В характере перераспределения указанных ассоциаций элементов в зонах наложенного эпигенеза устанавливается отчетливо проявленная зональность.

В зоне слабого изменения пород в результате быстрого вытеснения поровых растворов нефтью вторичное минералообразование и разуплотнение пород имеют ограниченный характер. Несмотря на это, данная зона в разрезе скважин фиксируется более низкими концентрациями исследуемого ряда элементов (все три фактора отрицательны) в отличие от стадияльно преобразованных исходных пород (рис. 2).

В зоне выщелачивания происходит наиболее активное перераспределение химических элементов.

Битумсодержащая подзона выщелачивания, относительно других зон ВНК, характеризуется более высоким содержанием Fe, Ti, Cr (фактор 1) (табл. 2, рис. 2). Здесь протекают реакции растворения алюмосиликатов, кальцита и, в меньшей степени, кварца. В зоне выщелачивания кальцит практически не встречается.

Безбитумная подзона выщелачивания характеризуется более интенсивным растворением пород агрессивными растворами, поступающих из битумсодержащей подзоны. Данная подзона в разрезах скважин выделяется по наличию наиболее интенсивных отрицательных аномалий урана, а также характеризуется значительным снижением концентраций K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Rb, Sr, Ba (все три фактора имеют отрицательные значения) (рис. 2).

Таблица 2. Матрица факторных нагрузок для пород из зон наложенного эпигенеза

Table 2. Matrix of factor loadings for the rocks of the superimposed epigenesis zones

Элемент Element	Фактор/Factor		
	1	2	3
U	0,01	0,08	0,79
K	-0,20	-0,16	0,80
Ca	-0,17	0,93	0,06
Ti	0,93	0,01	0,00
Cr	0,94	0,01	-0,12
Mn	0,39	0,79	-0,05
Fe	0,82	0,03	-0,04
Rb	-0,23	-0,56	0,47
Sr	0,12	0,64	-0,12
Zr	0,40	0,04	0,68
Ba	-0,72	-0,37	-0,39

Ниже зоны выщелачивания, в слабощелочной среде, происходит разгрузка растворов, обогащенных химическими элементами, и формируется зона цементации, представленная преимущественно карбонатизированными породами. Содержание урана в зоне цементации падает и в среднем составляет 0,94 г/т. Связано это с относительным сни-

жением здесь содержаний алюмосиликатных минералов, основных концентраторов урана. Наблюдается также снижение концентраций К, Rb и повышение концентраций Ca, Mn, Sr.

Данные статистического анализа указывают на наличие устойчивых связей между содержанием химических элементов и количеством новообразованных минералов. Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена равны: $-0,40$ (между содержанием каолинита и концентрацией урана); $-0,14$ (между содержанием кальцита и концентрацией урана); $+0,19$ (между содержанием хлорита и концентрацией урана); $+0,34$ (между содержанием слюды и концентрацией урана) (при $r_{\text{крит.}}=0,13$).

Таким образом, в результате исследования выявлено, что разуплотненные породы (рис. 4, А) в разрезах скважин выделяются по наличию отрицательных аномалий урана с содержанием в пределах $0,4-1,5$ г/т. В зонах стабилизации ВНК происходит перераспределение К, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Rb, Sr, Zr, Ba и формируется геохимическая зональность, тесно связанная со структурной и веще-

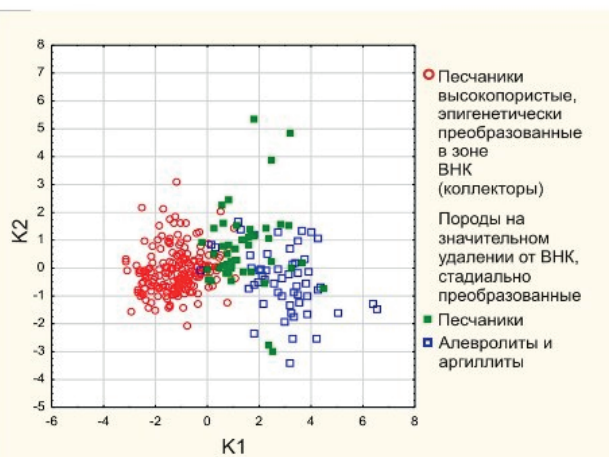
ственной неоднородностью пород, обусловленной процессами, происходящими в системе «вода–нефть–порода».

Химический состав пород в значительной степени отражает характер насыщения коллекторов. По содержанию отдельных элементов отличия не всегда являются статистически значимыми, но контрастность различий в значительной степени может быть усилена с помощью использования методов многомерной корреляции, в частности дискриминантного анализа [32]. Данный метод статистического анализа предназначен для распознавания принадлежности изучаемых объектов к заранее заданным эталонам на основе их сходства по многомерным параметрам. В качестве эталонов выбраны интервалы отложений с низкими концентрациями урана и заведомо известным характером насыщения (углеводороды, вода, кальцитизация).

Линейные дискриминантные функции, в координатах которых породы с разным характером насыщения группируются в отчетливо обособленные кластеры (рис. 4, Б):

А. Выявление пород-коллекторов по данным дискриминантного анализа

Элемент	Коэффициенты переменной K1	Коэффициенты переменной K2
U	0,869	-0,025
K	0,308	0,693
Ca	0,081	0,321
Ti	-0,110	0,036
Cr	0,071	-0,540
Mn	-0,462	-0,415
Fe	0,422	0,682
Rb	0,043	-1,085
Sr	0,030	0,044
Zr	-0,053	0,745
Ba	-0,389	0,342



Б. Характер насыщения коллекторов по данным дискриминантного анализа

Элемент	Коэффициенты переменной K1	Коэффициенты переменной K2
U	0,290	-0,578
K	-0,996	1,006
Ca	-0,518	-0,433
Ti	-0,252	-0,408
Cr	0,610	-0,420
Mn	-0,329	-0,249
Fe	-0,289	0,718
Rb	0,954	-0,307
Sr	-0,523	0,229
Zr	0,026	-0,116
Ba	-0,140	-0,263

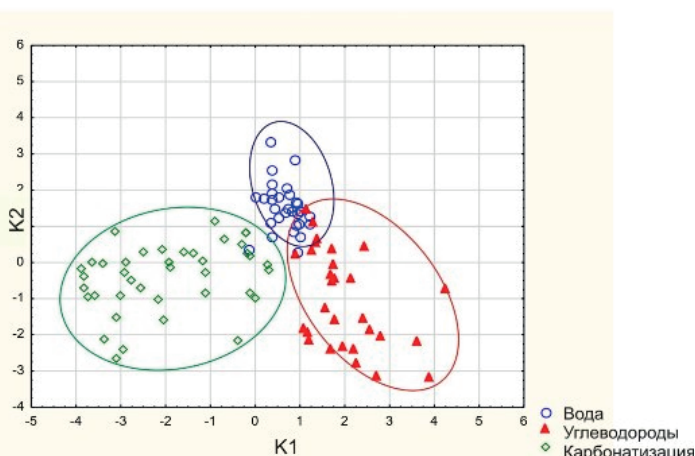


Рис. 4. Результаты дискриминантного анализа

Fig. 4. Results of the discriminant analysis

$$K_1 = -0,06U - 0,21K + 0,69Ca - 0,09Ti - 0,06Cr + 0,49Mn + 0,02Fe - 0,4Rb + 0,25Sr - 0,1Zr + 0,06Ba;$$

$$K_2 = -0,48U + 0,43K - 0,05Ca - 0,34Ti - 0,37Cr - 0,06Mn - 0,19Fe + 0,29Rb - 0,19Zr + 0,01Ba.$$

Таблица 3. Статистическая значимость различий содержаний элементов в породах-коллекторах с различным характером насыщенности

Table 3. Statistical significance of differences of element contents in reservoir rocks with different character of saturation

Элементы Elements	Среднее содержание элементов в породах, г/т Average content of elements in rocks, g/t								
	1	2	p	2	3	p	3	1	p
U	0,91	1,46	0,99	1,46	0,94	0,99	0,94	0,91	0,73
K	22870	14727	0,99	14727	16021	0,94	16021	22870	0,99
Ca	5242	7658	0,99	7658	114541	0,99	114541	5242	0,99
Ti	1915	7116	0,99	7116	2591	0,99	2591	1915	0,76
Cr	31,98	97,24	0,99	97,24	37,72	0,99	37,72	31,98	0,56
Mn	152	303	0,99	303	1276	0,99	1276	152	0,99
Fe	15987	27946	0,99	27946	20493	0,99	20493	15987	0,38
Rb	53,45	40,29	0,99	40,29	33,05	0,98	33,05	53,45	0,99
Sr	227	234	0,09	234	390	0,99	390	227	0,99
Zr	56,15	101,07	0,99	101,07	60,45	0,99	60,45	56,15	0,40
Ba	955	694	0,99	694	656	0,81	656	955	0,99

Примечание: породы-коллекторы: 1 – насыщенные водой; 2 – насыщенные углеводородами; 3 – карбонатизированные; p – доверительная вероятность отличий в содержаниях элементов сравниваемых выборок.

Note: reservoir rocks: 1 – water saturated; 2 – hydrocarbon saturated; 3 – carbonized; p – confidence probability of differences in element contents of the compared samples.

Статистическая значимость отличия эталонных выборок превышает 99 %. Испытание модели на контрольных пробах, не включенных в обучающие выборки, показало ее высокую работоспособность.

Сравнение средних содержаний элементов (табл. 3) в эталонных выборках показывает, что для насыщенных углеводородами пород коллекторов (в отличие от карбонатизированных и водона-

сыщенных) характерно существенное снижение содержаний Ca, Sr и Mn, незначительное относительное повышение содержаний U, элементов группы железа (Fe, Ti, Cr), а также незначительное снижение концентраций K и Rb. Повышенные содержания Ti, Fe, Cr в породах, насыщенных углеводородами, обусловлены изначальным относительным обогащением песчаников ильменитом, рутилом, лейкоксеном, цирконом, что является обычным для этого типа пород. К примеру, нефтеносные песчаники Ярегского месторождения в Республике Коми содержат огромные запасы титана (около 50 % всех разведанных запасов России), являясь погребенными россыпями.

Снижение содержания K и Rb связано с процессами замещения алюмосиликатов (полевых шпатов, слюд и гидрослюд) каолинитом, фиксируемым в основном в безбитумной подзоне выщелачивания. Снижение содержаний Ca, Sr, Mn объясняется растворением кальцита, что весьма характерно для этой зоны.

Для зоны цементации свойственно значительное повышение содержаний Ca, Mn, Sr (отложение карбонатов).

Для водонасыщенных пород, на фоне низких концентраций U, Ca, Sr, Mn, Ti, Cr, Fe и Zr, отмечается повышение содержаний K, Rb и Ba, что связано с преобладанием в этой зоне гидрослюдистого цемента и вкрапленностью барита.

Таким образом, породы с разным характером насыщения существенно отличаются друг от друга по своим геохимическим особенностям. Полученные литогеохимические данные не противоречат традиционным геофизическим и газогеохимическим наблюдениям, а дополняют их и уточняют. Выявленная связь между минеральным составом преобразованных пород и содержаниями химических элементов позволяет прогнозировать характер насыщения пород в пределах потенциальных коллекторов, выделенных по отрицательным аномалиям урана, и наметить продуктивные интервалы.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18–35–00499.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лебедев Б.А. Геохимия эпигенетических процессов в осадочных бассейнах. – Л.: Недра, 1992. – 239 с.
2. Сахибгареев Р.С. Вторичные изменения коллекторов в процессе формирования и разрушения нефтяных залежей. – Л.: Недра, 1989. – 260 с.
3. Лифшиц С.Х. Роль глубинных флюидов в формировании и генезисе газонефтяных залежей // Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезы: Материалы Всероссийской конференции. – М., 2008. – М.: Геос, 2008. – С. 278–281.
4. Мельник И.А. Интенсивность пиритизации как индикатор характера насыщения юрских пластов Томской области // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2016. – № 3. – С. 41–49.
5. Петров Н.А. Влияние макромира на процессы в нефтегазовых месторождениях // Нефтегазовое дело. – 2015. – № 3. – С. 208–236.
6. Павловец Т.А., Недоливко Н.М. Особенности порового пространства в песчаниках пласта Ю³⁻⁴ Ключевской площади // Проблемы геологии и освоения недр: труды XX Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня основания Томского политехнического университета. – Томск, 2016. – Томск: Изд-во ТПУ, 2016. – Т. 1. – С. 385–388.
7. Lasaga A.C. Chemical kinetics of water-rock interactions // J. Geophys. Res. – 1984. – V. 89. – P. 4009–4025.
8. Duan S., Wojtanowicz A.K. Theoretical and experimental investigation of water in oil transverse dispersion in porous media // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Denver, Colorado, USA, 2008. – P. 1376–1401.
9. Bailey N.J.L., Krouse H.R., Evans C.R., Rogers M.A. Alteration of crude oil by waters and bacteria; evidence from geochemical and isotope studies // AAPG Bull. – 1973. – V. 57. – P. 1276–1290.
10. Velbel M.A. Influence of surface area, surface characteristics, and solution composition on feldspar weathering rates // Sympo-

- sium Series: Geochemical Processes at Mineral Surfaces. – Chicago, Illinois, 1986. – № 323. – P. 614–634.
11. Worden R.H., Burley S.D. Sandstone diagenesis. Recent and Ancient. – USA: Blackwell Publishing company, 2003. – 647 p.
 12. Worden R.H., Morad S. Clay Mineral Cements in Sandstones. – USA: Blackwell Publ. company, 2003. – 503 p.
 13. Nedolivko N., Perevertailo T., Pavlovic T. Changes in composition and pore space of sand rocks in the oil water contact zone (section YU₁³⁻⁴, Klyuchevskaya area, Tomsk region) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. V. 43. Problems of Geology and Subsurface Development. – Tomsk, 2016. – № 1. – 012058, 6 p. URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/35167> (дата обращения 10.11.2017).
 14. Helgeson H.C., Owens C.E., Shock E.L. Petroleum, oil field waters, and authigenic mineral assemblages: are they in metastable equilibrium in hydrocarbon reservoirs? // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1993. – V. 57. – P. 3295–3339.
 15. Shengkai D., Wojtanowicz A.K. Hydrodynamic transition zone at OWC in non-Darcy flow // The second International Energy 2030 conference. – Abu Dhabi U.A.E., 2008. – P. 84–86.
 16. Bjorkum P.A., Gielsvik N. An isochemical model for formation of authigenic kaolinite, K-feldspar and illite in sediments // J. sedim. Petrol. – 1988. – V. 58. – P. 506–511.
 17. Неручев С.Г. Справочник по геохимии нефти и газа. – СПб.: Недра, 1998. – 576 с.
 18. Hunt J.M. Petroleum Geochemistry and Geology. – San Francisco: Freeman, 1979. – 704 p.
 19. Carstens H. Finding Oil – Using Geochemistry // Exploration worldwide. – 2008. – V. 5. – № 5. URL: <http://www.geoexplor.com/articles/2008/05/finding-oil-using-geochemistry> (дата обращения 10.11.2017).
 20. Исаев В.П., Пастухов Н.П. Современные геохимические технологии и их эффективность при региональном прогнозе нефтегазоносности в малоизученных районах Сибирской платформы // Региональные геохимические работы как основа для оценки рудоносности и нефтегазоносности территории: Материалы конференции. – М.: ИМГРЭ, 2015. – С. 18–19.
 21. Сахибгареев Р.С. О коррозии минералов нефтями и битумами // Геология и геохимия горючих ископаемых. – 1978. – Т. 50. – С. 22–24.
 22. Исмагилов И.Х., Никонов В.Н., Белан Л.Н. Геохимические аномалии нефтеносных районов Башкортостана // Региональные геохимические работы как основа для оценки рудоносности и нефтегазоносности территории: Материалы конференции. – М.: ИМГРЭ, 2015. – С. 65–66.
 23. Страхов Н.М. Основы теории литогенеза. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – Т. 1. – 212 с.
 24. Исаева Е.Р., Столбова Н.Ф. Исследование процессов флюидомиграции в нефтегазоносных отложениях Ванкорского месторождения // Вестн. Том. гос. ун-та. – 2014. – № 389. – С. 228–234.
 25. Смыслов А.А. Уран и торий в земной коре. – Л.: Недра, 1974. – 231 с.
 26. Арбузов С.И., Рихванов Л.П. Геохимия радиоактивных элементов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 315 с.
 27. Шалдыбин М.В., Столбов Ю.М., Фомин Ю.А. Литогеохимия как резерв повышения эффективности поисково-разведочных работ на нефть и газ в Томской области // Перспективы нефтегазоносности слабоизученных комплексов отложений юго-востока Западно-Сибирской плиты. Палеозой. Нижняя-средняя юра: Тез. докл. научно-практической конференции. – Томск: Томскгеолком, 1995. – С. 65–67.
 28. Столбов Ю.М., Фомин Ю.А., Столбова Н.Ф. Возможность применения прикладной геохимии урана при исследовании процессов наложенного эпигенеза терригенных отложений Западной Сибири // Геохимическое моделирование и материнские породы нефтегазоносных бассейнов России и стран СНГ: Тр. II. Международной конференции. – СПб.: Изд-во ВНИГРИ, 2000. – С. 160–171.
 29. Исаева Е.Р., Столбова Н.Ф. Геохимические особенности распределения урана в отложениях Пур-Тазовской нефтегазональной области // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 8. – С. 79–85.
 30. Соловов А.П. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых. – М.: Недра, 1985. – 294 с.
 31. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений / отв. ред. Л.Н. Овчинников. – М.: Недра, 1983. – 198 с.
 32. Voroshilov V.G. Anomalous Structures of Geochemical Fields of Hydrothermal Gold Deposits: Formation Mechanism, Methods of Geometrization, Typical Models, and Forecasting of Ore Mineralization // Geology of Ore Deposits. – 2009. – V. 51. – № 1. – P. 1–16.

Поступила 15.11.2017 г.

Информация об авторах

Исаева Е.Р., кандидат геолого-минералогических наук, ассистент кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Ворошилов В.Г., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Тимкин Т.В., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Mansour Ziaii, PhD, доцент Шахрудского технологического университета.

UDC 552.578.2.061.4.08:550.4+553.98.041(571)

GEOCHEMICAL CRITERIONS FOR IDENTIFYING RESERVOIRS AND PREDICTING THEIR PETROLEUM POTENTIAL (VANKOR FIELD)

Elena R. Isaeva¹,

isaevaer@tpu.ru

Valery G. Voroshilov¹,

v_g_v@tpu.ru

Timofey V. Timkin¹,

timkin@tpu.ru

Mansour Ziaili²,

m.ziaili47@gmail.com

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

² Shahrood University of Technology,
Shahrood, Semnan Province, Iran.

The relevance of research is caused by the necessity to develop new approaches to assessment of petroleum potential of terrigenous sediments based on the study of metals geochemistry in the processes of the imposed epigenesis.

The aim of the research is to determine the regularities of chemical elements redistribution in the processes occurring in the oil–water–rock system; based on litho-geochemical data to develop a methodology for evaluating the reservoir rock properties and nature of saturation of reservoirs.

The material and methods. The study is based on the data on distribution of U, K, Ca, Ti, Cr, Fe, Mn, Rb, Sr, Ba, Zr the superimposed epigenesis areas of Jurassic-Cretaceous oil and gas deposits selected by the authors. The distribution patterns of these elements were studied in combination with lithological, mineralogical and petrographic studies of core and cuttings of exploratory wells drilled in the area of the Vankor field. The content of U in rocks was determined by delayed neutron, the contents of some elements (K, Ca, Ti, Cr, Fe, Mn, Rb, Sr, Ba, Zr) were defined on the express x-ray fluorescence analyzer INNOV-X50 with external control analyses by ICP MS. Characteristics of the newly formed minerals composition were studied using scanning electron microscope TESCAN VEGA 3 SBU.

The results. It was determined that in the studied sediments uranium is a detecting element of the areas of improved reservoir characterized by abnormally low concentrations. The authors have revealed a significant redistribution of some chemical elements associated with hydrocarbon formation and determined the geochemical zonation. The regularities of chemical elements distribution allow predicting petroleum potential of terrigenous sediments section. Within the study area, the selected intervals are productive deposits recommended for testing.

Key words:

Epigenesis, geochemistry, oil-water contact, petroleum potential, PUR-Tazov basin.

The research was financially supported by the RFBR grant no. 18–35–00499.

REFERENCES

1. Lebedev B.A. *Geokhimiya epigeneticheskikh protsessov v osadochnykh basseynakh* [Geochemistry of epigenetic processes in sedimentary basins]. Leningrad, Nedra Publ., 1992, 239 p.
2. Sahibgareev R.S. *Vtorichnye izmeneniya kollektorov v protsesse formirovaniya i razrusheniya neftyanykh zalezhey* [Secondary changes of collectors in formation and destruction of oil deposits]. Leningrad, Nedra Publ., 1989, 260 p.
3. Lifshits S.Kh. Rol glubinykh flyuidov v formirovani i genezise gazonefityanykh zalezhey [Role of deep fluids in formation and genesis of petroleum deposits]. *Degazatsiya Zemli: geodinamika, geoflyuidy, nef, gaz i ikh paragenezy. Materialy Vserossiyskoy konferentsii* [Land degassing: geodynamics, geofluids, oil, gas and their parageneses. All-Russian conference Proc.]. Moscow, Geos Publ., 2008, pp. 278–281.
4. Melnik I.A. Intensity of pyritisation as an indicator of the nature of saturation of the Jurassic formations in Tomsk region. *Geology, Geophysics and development of oil and gas fields*, 2016, no. 3, pp. 41–49. In Rus.
5. Petrov N.A. Influence of macrocosm on the processes in oil and gas fields. *Oil and Gas business*, 2015, no. 3, pp. 208–236. In Rus.
6. Pavlovets T.A., Nadolenko N.M. Osobennosti porovogo prostranstva v peschanikakh plasta Yu³⁻⁴, Klyuchevskoy ploshchadi [Features of pore space in sandstones reservoir Yu³⁻⁴ Klyuchevskaya area]. *Problemy geologii i osvoeniya nedr. Trudy XX Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni akademika M.A. Usova studentov i molodykh uchenykh, posvyashchennogo 120-letiyu so dnya osnovaniya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Problems of Geology and subsoil use. Proc. Of the XX International Symposium named after academician M.A. Usov of students and young scientists dedicated to the 120th anniversary of the Tomsk Polytechnic University]. Tomsk, TPU Publ. house, 2016. Vol. 1, pp. 385–388.
7. Lasaga A.C. Chemical kinetics of water-rock interactions. *J. Geophys. Res.*, 1984, vol. 89, pp. 4009–4025.
8. Duan S., Wojtanowicz A.K. Theoretical and experimental investigation of water in oil transverse dispersion in porous media. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Denver, Colorado, USA, 2008. pp. 1376–1401.

9. Bailey N.J.L., Krouse H.R., Evans C.R., Rogers M.A. Alteration of crude oil by waters and bacteria; evidence from geochemical and isotope studies. *AAPG Bull.*, 1973, vol. 57, pp. 1276–1290.
10. Velbel M.A. Influence of surface area, surface characteristics, and solution composition on feldspar weathering rates. *Symposium Series: Geochemical Processes at Mineral Surfaces*. Chicago, Illinois, 1986. No. 323, pp. 614–634.
11. Worden R.H., Burley S.D. *Sandstone diagenesis. Recent and Ancient*. USA, Blackwell Publishing company, 2003, 647 p.
12. Worden R.H., Morad S. *Clay Mineral Cements in Sandstones*. USA, Blackwell Publ. company, 2003, 503 p.
13. Nedolivko N., Perevertailo T., Pavlovic T. Changes in composition and pore space of sand rocks in the oil water contact zone (section YU³⁻⁴, Klyuchevskaya area, Tomsk region). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 43. Problems of Geology and Subsurface Development. Tomsk, 2016, no. 1, 012058, 6p. Available at: <http://earhive.tpu.ru/handle/11683/35167> (accessed 10 November 2017).
14. Helgeson H.C., Owens C.E., Shock E.L. Petroleum, oil field waters, and authigenic mineral assemblages: are they in metastable equilibrium in hydrocarbon reservoirs? *Geochimica et Cosmochimica Acta, Abstr.*, 1993, vol. 57, pp. 3295–3339.
15. Shengkai D., Wojtanowicz A.K. Hydrodynamic transition zone at OWC in non-Darcy flow. *The second International Energy 2030 conference*. Abu Dhabi U.A.E., 2008, pp. 84–86.
16. Bjorkum P.A., Gielsvik N. An isochemical model for formation of authigenic kaolinite, K-feldspar and illite in sediments. *J. sedim. Petrol.*, 1988, vol. 58, pp. 506–511.
17. Neruchev S.G. *Spravochnik po geokhimii nefti i gaza* [Handbook of Geochemistry of oil and gas]. St-Petersburg, Nedra Publ., 1998, 576 p.
18. Hunt J.M. *Petroleum Geochemistry and Geology*. San Francisco, Freeman, 1979. 704 p.
19. Carstens H. Finding Oil – Using Geochemistry. *Exploration worldwide*, 2008, vol. 5, no. 5. Available at: <http://www.geoxpro.com/articles/2008/05/finding-oil-using-geochemistry> (accessed 10 November 2017).
20. Isaev V.P. Sovremennye geokhimicheskie tekhnologii i ikh ehffektivnost pri regionalnom prognoze neftegazonosnosti v maloizuchennykh rayonakh Sibirskoy platformy [Modern geochemical technologies and their effectiveness in the regional forecast of oil and gas in underexplored areas of the Siberian platform]. *Regionalnye geokhimicheskie raboty kak osnova dlya otsenki rudonosnosti i neftegazonosnosti territorii. Materialy konferentsii* [Regional geochemical works as a basis for assessment of ore and oil and gas potential of the territory. Conference materials]. Moscow, IMGRE Publ., 2015. pp. 18–19.
21. Sakhigbareev R.S. O korrozii mineralov neftiyami i bitumami [The corrosion of minerals with oils and bitumen]. *Geologiya i geokhimiya goryuchikh iskopaemykh*, 1978, vol. 50, pp. 22–24.
22. Ismagilov I.Kh., Nikonov V.N., Belan L.N. Geokhimicheskie anomalii neftenosnykh rayonov Bashkortostana [Geochemical anomalies oil fields of Bashkortostan]. *Regionalnye geokhimicheskie raboty kak osnova dlya otsenki rudonosnosti i neftegazonosnosti territorii. Materialy konferentsii* [Regional geochemical works as a basis for assessment of ore and oil and gas potential of the territory. Conference materials]. Moscow, IMGRE Publ., 2015. pp. 65–66.
23. Strakhov N.M. *Osnovy teorii litogeneza* [Fundamentals of the theory of lithogenesis]. Moscow, ANSSSR Publ., 1960, vol. 1, 212 p.
24. Isaeva E.R., Stolbova N.F. Study of fluid migration in oil and gas deposits of Vankor field. *Tomsk State University Journals*, 2014, no. 389, pp. 228–234. In Rus.
25. Smyslov A.A. *Uran i toriy v zemnoy kore* [Uranium and thorium in the earth's crust]. Leningrad, Nedra Publ., 1974, 231 p.
26. Arbuзов S.I. *Geokhimiya radiativnykh elementov* [Geochemistry of radioactive elements]. Tomsk, TPU Publ. house, 2009, 315 p.
27. Shaldybin M.V., Stolbov Yu.M., Fomin Yu.A. Litogeokhimiya kak rezerv povysheniya effektivnosti poiskovo-razvedochnykh rabot na neft i gaz v Tomskoy oblasti [Litho-geochemistry as a reserve for increasing the efficiency of exploration of oil and gas in the Tomsk region]. *Perspektivy neftegazonosnosti slaboizuchennykh kompleksov otlozheniy yugo-vostoka Zapadno-Sibirskoy plity. Paleozoy. Nizhnaya-srednyaya yura. Tezisy dokladov nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Prospects of oil and gas potential of poorly studied sediment complexes of the South-East of the West Siberian plate. Paleozoic. Lower-middle Jurassic. Abstracts of scientific-practical conference]. Tomsk, Tomskgeolkom Publ., 1995. pp. 65–67.
28. Stolbov Yu.M. Vozmozhnost primeneniya prikladnoy geokhimii urana pri issledovanii protsessov nalozhennogo epigeneza terrigenykh otlozheniy Zapadnoy Sibiri [Possibility of using the applied geochemistry of uranium to study the processes of the imposed epigenesis of terrigenous deposits in Western Siberia]. *Geokhimicheskoe modelirovanie i materinskie porody neftegazonosnykh basseynov Rossii i stran SNG. Trudy II Mezhdunarodnoy konferentsii* [Geochemical modeling and parent rocks of oil and gas basins in Russia and CIS countries. II Proc. of the International conference]. St-Petersburg, VNIGRI Publ., 2000. pp. 160–171.
29. Isaeva E.R., Stolbova N.F. Geochemical features of uranium distribution in sediments of the PUR-Taz petroleum region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 8, pp. 79–85. In Rus.
30. Solovov A.P. *Geokhimicheskie metody poiskov mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh* [Geochemical methods of prospecting mineral deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1985, 294 p.
31. Ovchinnikov L.N. *Instruktsiya po geokhimicheskim metodam poiskov rudnykh mestorozhdeniy* [Instruction on geochemical methods of searching ore deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1983, 198 p.
32. Voroshilov V.G. Anomalous Structures of Geochemical Fields of Hydrothermal Gold Deposits: Formation Mechanism, Methods of Geometrization, Typical Models, and Forecasting of Ore Mineralization. *Geology of Ore Deposits*, 2009, vol. 51, no. 1, pp. 1–16.

Received: 11 November 2017.

Information about the authors

Elena R. Isaeva, Cand. Sc., teaching assistant, Tomsk Polytechnic University.

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

Timofey V. Timkin, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Mansour Ziaili, PhD, associate professor, Shahrood University of Technology.

УДК 622.784:622'17

ИСПЫТАНИЯ НОВОЙ АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЕЧИ ДЛЯ ОБЖИГА ВЕРМИКУЛИТОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ

Нижегородов Анатолий Иванович¹,
nastromo_irkutsk@mail.ru

Брянских Татьяна Борисовна¹,
broocha@yandex.ru

Гаврилин Алексей Николаевич²,
tom-gawral@list.ru

Мойзес Борис Борисович²,
mbb@tpu.ru

Градобоев Александр Васильевич²,
gava@tpu.ru

Вавилова Галина Васильевна²,
wgv@tpu.ru

Josef Tlustý³,
tlusty@fel.cvut.cz

Валерия Тузикова^{3,4},
tuzikval@fel.cvut.cz

¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

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

³ Чешский технический университет,
Чешская Республика, 16627, г. Прага, ул. Technická, 2.

⁴ Siemens, Energy Management,
Чешская Республика, 15500, г. Прага, Siemsenova, 1.

Актуальность. Одним из представителей георесурсов, нашедших широкое применение в различных сферах промышленности, является вермикулит. После обжига концентратов обогащенных вермикулитовых руд в пламенных печах получают вспученный вермикулит. Вспученный вермикулит, благодаря своей слоисто-пористой структуре и высокой отражательной способности, является основой для получения многих термоизоляционных и огнеупорных материалов и изделий, входит в состав строительных материалов, применяется для защиты от радиации. Обжиг вермикулитовых руд в пламенных печах является энергоемким процессом, поэтому активно разрабатываются конструкции электрических модульно-спусковых печей. Данные печи снизили удельную энергоемкость процесса обжига, в связи с этим работы по созданию электрических печей актуальны. В работе рассмотрены вопросы, связанные с созданием и испытанием новой альтернативной электрической печи для обжига вермикулитовых концентратов.

Цель исследования: экспериментальное определение энерготехнологических показателей опытного образца печи с вибрационной подовой платформой при его испытаниях.

Методы исследования: анализ источников информации в области исследования, синтез конструктивных решений, физическое моделирование, параметрическое и функциональное описание, экспериментальные исследования.

Результаты. Разработана альтернативная электрическая модульно-спусковая печь для обжига вермикулитовых концентратов с принципиально новой конструктивной структурой – печь с вибрационной подовой платформой. Создана полномасштабная физическая модель печного агрегата – однофазный одномодульный блок, на которой проведены эксперименты и получены эмпирические данные. При проведении экспериментальных исследований достигнута плотность вспученного вермикулита 90...91 кг/м³ и производительность 3,56 м³/ч. Значение удельной энергоемкости обжига вермикулита различных видов составляет 63,7...81,6 мДж/м³, что почти втрое меньше, чем у существующих пламенных печей, работающих на углеводородном топливе.

Ключевые слова:

Печь с вибрационной подовой платформой, опытный образец печи, электрическая модульно-спусковая печь, вермикулит, вермикулитовый концентрат, тепловая энергия, удельная энергоемкость обжига.

Введение

В спектре термоизоляционных и огнеупорных материалов и изделий значимое место занимают изделия на основе вспученного вермикулита, получаемого обжигом концентратов обогащенных вермикулитовых руд. Благодаря его слоисто-пористой структуре и высокой отражательной способности [1], такие изделия и материалы отличаются хорошими эксплуатационными свойствами. Поэтому они применяются для обмуровки тепловых агрегатов в энергетике, для повышения предела огнестойкости несущих конструкций и звукоизоляции в строительстве, для футеровки ванн электролизеров при производстве алюминия, для футеровки печей и сталеразливочных ковшей, для производства почвосмесей и гидропонического выращивания растений в агропромышленном секторе и ряде других отраслей экономики.

Кроме того, вспученный вермикулит является эффективным теплоизоляционным материалом, пористым наполнителем для легких бетонов; из него готовят сухие строительные смеси, в том числе огнезащитные, используют для фильтрации воды, в качестве адсорбента дыма и ядовитых газов, как противорадиационный материал и т. д. [1–3].

Обжиг вермикулита в пламенных печах – это энергоемкий процесс [4], но даже с появлением электрических модульно-спусковых печей различных модификаций [4–12] существенно понизить

удельную энергоемкость процесса не удавалось, пока не был разработан и построен опытный образец печи с принципиально иной, альтернативной конструктивной структурой [13, 14].

Печь с вибрационной подовой платформой.

Прогноз энергоэффективности

Трехмодульная электрическая печь для обжига вермикулита показана на рис. 1. В корпусе печи – 1 размещена опорная рама – 2, на которой в направлении – 3 и катках – 4 установлена подвижная платформа – 5. Будучи подпружиненной с обеих сторон пружинами – 6, она образует колебательную систему, возбуждаемую за счет приводного двигателя толкателем – 7 и пружиной – 8. Пружины, установленные с правой стороны, – конического типа: они обеспечивают несимметричные колебания вибрационной платформы, при которых создается односторонний транспортный эффект, усиленный анизотропией поверхности – 9 подов – 10, выполненной из однонаправленного наложения фрагментов [15, 16]. Элементы подов – основания, крышки и боковые стенки сделаны из жаростойкой стали и термоизолированы муллитокремнеземистым войлоком.

Вермикулитовый концентрат (или другие сыпучие минералы, подвергаемые термоактивации) поступает на конвейер – 11 и с помощью сбрасывателей – 12 подается в бункеры дозаторов – 13, а затем в пространство модулей обжига – а, подклю-

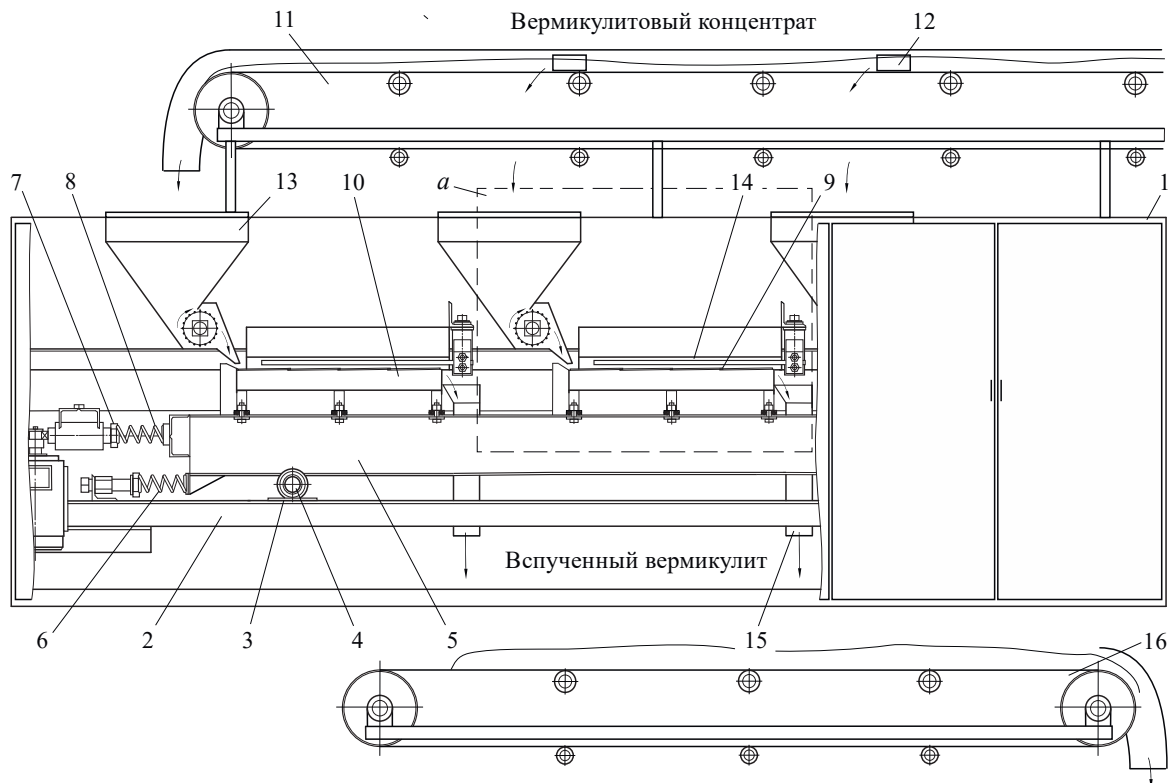


Рис. 1. Трехмодульная электрическая печь с вибрационной платформой

Fig. 1. Three-module electric furnace with vibration platform

ченных каждый к своей фазе электрической сети. При движении слева направо концентрат проходит под электрическими нагревателями – 14, вспучивается и ссыпается по лоткам – 15 на нижний ленточный конвейер – 16. Поды служат основаниями для размещения вермикулита. С помощью управляемого по амплитуде и частоте вибрационного механизма вспучивающийся материал может перемещаться с различной скоростью и подвергаться термообработке заданное время – 2,7...3,5 с.

При вибрационном транспортировании [13, 14], в отличие от гравитационного спуска в модульно-спусковых печах [11, 12], зерна вермикулита располагаются на поверхностях подов с практически нулевым зазором, образуя сплошное покрытие их оснований. Не покрытыми остаются лишь межзерновые пустоты, занимающие 25...40 % общей площади, поэтому здесь более 60 % эффективных и отраженных потоков лучистой энергии поглощается вермикулитом.

Прогнозы, сделанные в работе [17], показывают, что печи с вибрационной платформой способны обеспечить обжиг вермикулита с удельной энергоемкостью 40...45 МДж/м³, тогда как в электрических модульно-спусковых печах минимальное значение этого показателя составляет ~170 МДж/м³, а в пламенных – 230...260 МДж/м³. Так как электроэнергия в большинстве регионов страны обходится дороже, чем энергия сжигаемого топлива, это новое техническое решение делает выгодным применение таких печей. Кроме того, они отличаются экологической и промышленной безопасностью, а их использование не ограничивается только обжигом вермикулита: они могут применяться и для термоактивации различных минералов [18–20].

Физическая модель

Физическая модель печи (рис. 1) создана в масштабе 1:1 (рис. 2). Модель выполнена как самостоятельный одиночный однофазный агрегат. Он содержит крепежные головки – 1, удерживающие консольно установленные электрические нагреватели из ленточного нихрома – 2 над поверхностью подовой плиты – 3, закрепленной на вибрационной платформе – 4, установленной в подшипниках – 5. Благодаря эксцентриковому виброприводу (на рис. 2 не показан), действующему на толкатель – 6, его колебания передаются через пружину – 7, возбуждая резонанс платформы. За счет изменения частоты возбуждения с помощью частотного регулятора возможно управление амплитудой колебаний, скоростью вибротранспортирования и временем обжига вермикулита.

Барабанным дозатором (на рис. 2 не показан) вермикулитовый концентрат по лотку – а подается в пространство обжига под нагреватели – 2. Двигаясь в тепловом поле, вермикулит вспучивается и выходит наружу по лотку – b (на виде сверху лоток b условно снят). Платформа и нагревательная система модуля смонтированы на раме – 8.

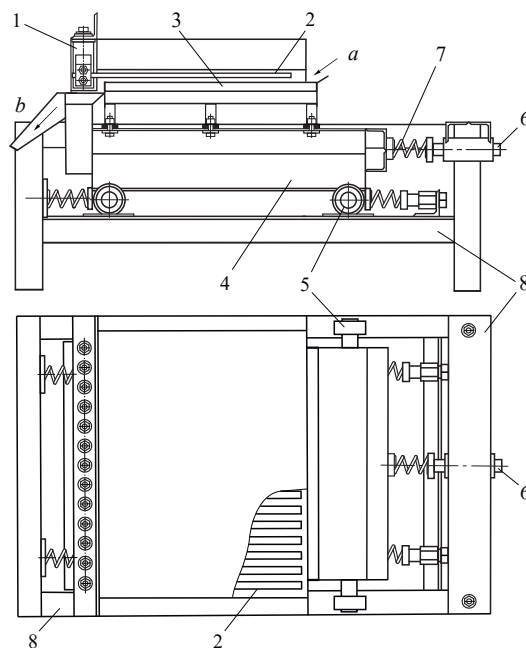


Рис. 2. Самостоятельный одиночный однофазный агрегат для обжига вермикулита (физическая модель)

Fig. 2. Self-contained separate and single-phase unit for vermiculite heat treatment (physical model)

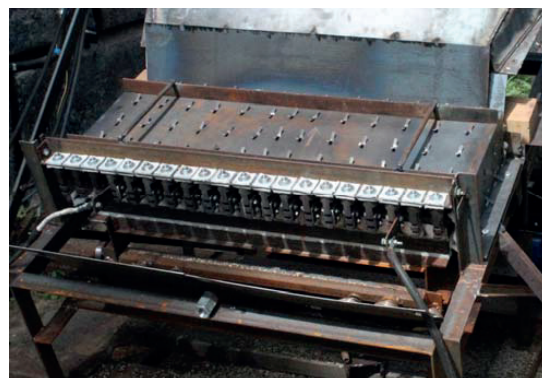


Рис. 3. Физическая модель – одиночный однофазный модуль (вид со стороны крепежных головок)

Fig. 3. Physical model – a separate single-phase module (the fastening heads side-view)



Рис. 4. Выход вспученного вермикулита из пространства обжига (на переднем плане – крепежные головки)

Fig. 4. Yield of the expanded vermiculite from the firing space (the fixing heads are in the foreground)

На рис. 3 показана фотография физической модели печи – одиночного однофазного модуля обжига (вид со стороны крепежных головок). Для увеличения скорости движения вермикулита рама агрегата установлена под углом к горизонту.

На рис. 4 показан выход вспученного вермикулита из пространства обжига модуля. На переднем плане – крепежные головки и электрические нагреватели из ленточного нихрома.

Экспериментальные исследования

Одиночный модуль соединялся по схеме «звезда» с общей не зануляемой точкой с двумя балластными сопротивлениями, которые равны электрическому сопротивлению последовательно соединенных нагревательных элементов модуля и выполнены из того же материала. Нагреватели установлены на ребро с регулируемым зазором 8...9 мм между ними и подом. Для управления электрической мощностью модуля использовался тиристорный регулятор ТРМ-3–125, способный изменять мощность нагревательной системы фазовым способом. По индикатору регулятора выставлялся ток уставки (предельное значение 125 А), фиксировался процент загрузки по мощности, а действующие значения силы тока I и напряжения U в цепи нагревателей модуля определялись специальным прибором «Sonel» PQM-701.

Так как нагрузка испытуемого образца исключительно активная, мощность рассчитывалась по формуле:

$$N=I \cdot U.$$

При проведении экспериментов решались следующие задачи:

- с помощью частотного регулятора и привода дозатора подобрать подачу концентрата, при которой вспучивающийся вермикулит двигался бы по поверхности пода в один слой и без зазоров между зернами;
- при проведении измерений поддерживать неизменной частоту колебаний платформы – 7,68 Гц, что соответствует частоте регулятора привода виброплатформы 23,4 Гц;
- подобрать температурный режим термообработки вермикулита, который обеспечивал бы постоянную производительность при постоянной плотности вспученного материала;
- определить значение удельной энергоёмкости обжига вермикулитового концентрата в установленном режиме работы одиночного модуля.

При проведении испытаний опытного образца использовался концентрат Кокшаровского месторождения вермикулитовых руд «Medium» (Приморский край). В таблице приведены его основные характеристики [21, 22].

Подача дозатора и производительность печи по вспученному вермикулиту связаны через коэффициент вспучивания:

$$\Pi_g = \Pi_v k,$$

где Π_g – подача концентрата в печь, кг/с; Π_v – объемная производительность печи, м³/с; k – коэффициент вспучивания, м³/кг.

Таблица. Характеристики сырья

Table. Characteristics of raw materials

Параметры концентрата/Parameter description	«Medium»
Крупность основной фракции, мм Size of the main fraction, mm	5,0±2,0
Содержание вермикулита, %, не менее Content of vermiculite, %, not less	90
Объемный вес концентрата до обжига, кг/м ³ Volume weight of concentrate before roasting, kg/m ³	950...1150
Насыпная плотность вермикулита после обжига, кг/м ³ Bulk density of vermiculite after roasting, kg/m ³	90...110

При проведении опытов подача подбиралась так, чтобы во вспученном состоянии материал двигался по поверхности пода вибрационной платформы однослойным потоком практически без интервалов между зернами.

Предварительно разогревались электрические нагреватели, и стальная плита пода в течение 30 минут при токе уставки 110 А. Температура на нихроме составляла 967 °С, на плите – 796 °С. Измерение температур проводилось с помощью термомпары пирометра DT-8835 с точностью ±1,5 % в диапазоне 50...1000 °С.

Пробный пуск дозатора на частоте регулятора 45 Гц показал избыточность подачи: образовался частично двухслойный поток вермикулита. Частота в обмотках электродвигателя мотор-редуктора была снижена до 40 Гц, что с учетом угловой скорости вращения вала (2,84 об/мин) при передаточном числе клиноременной передачи (0,283) составило 0,8 об/мин барабана дозатора.

При повторном запуске началось однослойное движение и качественное вспучивание вермикулита, однако процесс сопровождался налипанием мелкодисперсных частиц на поверхности подовой плиты и нагревателей, что свидетельствовало о чрезмерно высокой температуре. Выходящие вспученные зерна имели красноватый цвет, указывающий на химико-минералогическое преобразование вермикулита в энстатит, характеризующийся низкой прочностью и хрупкостью [23].

Второй режим был выбран по температуре подовой плиты и задан 725 °С. Нагрев нихрома составил 871 °С, ток уставки – 91 А, действующие значения тока и напряжения – 72,7 А и 148 В, а потребляемая электрическая мощность – 10760 Вт. подача сырья соответствовала 0,8 об/мин барабана дозатора.

Объем вспученного вермикулита, вышедшего из модуля за 60 с, был измерен – 11,9 л, а часовая производительность составила 0,71 м³/час.

В этом опыте было определено время движения вермикулита путем вбрасывания меток – увлажненных бумажных окатышей. Среднее по шести замерам время составило 3,31 с,

Через девять минут с начала работы модуля было замечено снижение насыпной плотности вермикулита, одновременно уменьшалась и производительность (до 0,61 м³/час). За это время температура нагревателей снизилась в среднем на 68 °С, а температура подовой плиты – на 80 °С.

Третий режим был выбран заведомо заниженным по температуре, чтобы оценить, как быстро будет уменьшаться плотность вермикулита и производительность модуля. При токе уставки 68,5 А, действующих значениях тока и напряжения 52,8 А и 104,5 В, потребляемой мощности 5518 Вт температуры подовой плиты и нихрома составили 649 и 740 °С соответственно. Сырье подавалось при 0,8 об/мин барабана дозатора.

Увеличение плотности вермикулита происходило еще быстрее, производительность за то же время уменьшилась от 0,62 до 0,48 м³/ч, температуры нагревателей и подовой плиты снизились на 125 на 214 °С соответственно.

В начале второго и третьего режимов вермикулит вспучивался за счет теплоты, накопленной в массивной подовой плите в условиях недостаточной мощности источника энергии, что приводило к быстрому охлаждению нагревателей и пода и к нарастанию его насыпной плотности.

Зависимости на рис. 5 указывают на то, что с течением времени поглощаемая вермикулитом тепловая мощность будет сбалансирована с мощностями теплового излучения и тепловых потерь, но качество его вспучивания, определяемое насыпной плотностью, будет низким, что неприемлемо.

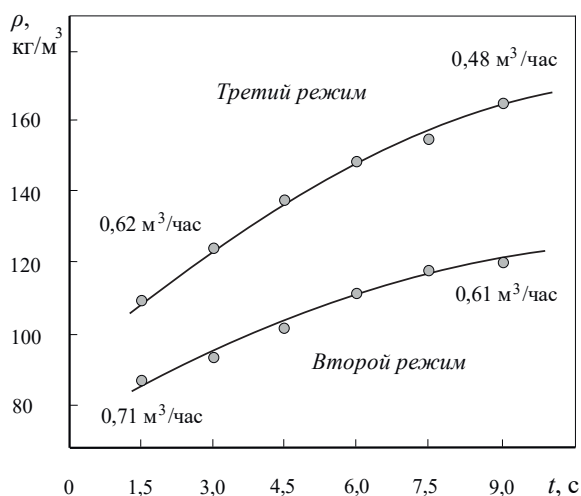


Рис. 5. Повышение насыпной плотности вспученного вермикулита в условиях недостаточной мощности источника энергии

Fig. 5. Increase of poured density of expanded vermiculite at insufficient power of energy source

Следующий эксперимент проводился в условиях корректировки электрической мощности одиночного модуля за счет тиристорного регулятора.

Началу процесса обжига (рис. 6, линия 1) соответствовали следующие настройки: ток уставки 93 А, действующее значения тока $I=87,8$ А, напряжения $U=179,1$ В и потребляемая электрическая мощность 15725 Вт. Подача концентрата соответствовала 0,8 об/мин барабана дозатора. Температура подовой плиты 737 °С, температура нихрома 880 °С.

Вермикулитовый концентрат вспучивался качественно: была достигнута плотность 84 кг/м³ при производительности 0,717 м³/ч. Зерна вермикулита на подовой плите двигались сплошным потоком почти без зазоров, но плотность повышалась и на пятнадцатой минуте (900 с) преодолела значение 102 кг/м³ без заметных признаков стабилизации в диапазоне плотностей, заданном в таблице.

На шестнадцатой минуте (960 с) параметры процесса были изменены (рис. 6, линия 2): ток уставки 100 А, действующие значения тока 96,6 А, напряжение 195,8 В, мощность 18914 Вт при неизменной подаче. Температура нагревателей изменилась за несколько секунд и показала значение ~907 °С. Температура платформы из-за тепловой инерции не измерялась.

На двадцать седьмой минуте (1620 с) (рис. 6) было отмечено локальное снижение плотности, но затем тренд увеличения плотности восстановился до стабилизации вблизи значения 110 кг/м³.

Этот результат нельзя было считать удовлетворительным, так как плотность находилась на верхнем пределе заданного в таблице диапазона. Поэтому на сорок шестой минуте (2760 с) параметры процесса были вновь изменены (рис. 6, линия 3): ток уставки 104 А, действующие значения тока 100,2 А, напряжение 208,0 В, потребляемая мощность 20842 Вт. Обороты барабана не менялись. Уже через три минуты плотность начала снижаться, а на семьдесят пятой минуте (4500 с) практически стабилизировалась при плотности ~92...93 кг/м³. Средняя температура на поверхностях нагревателей, измеренная термопарой-щупом, составила 926 °С.

Так как плотность установилась вблизи нижней границы регламентированного диапазона (таблица), этот режим следует признать штатным для данного одиночного модуля, тем более что производительность на 92 минуте (5520 с) работы составила 0,693 м³/ч.

Таким образом, можно принять следующие контрольные значения температур при обжиге концентратов Кокшаровского месторождения пятой размерной группы:

- нижний предел – 850 °С;
- верхний предел – 940 °С.

Предельно допустимую температуру нихрома следует ограничить значением 950 °С.

Удельная энергоёмкость обжига концентрата «Medium» составила, Дж/м³:

$$e = \frac{N \cdot 3600}{\Pi_v} = \frac{20842 \cdot 3600}{0,693} = 108270121,$$

где N – потребляемая электрическая мощность, Вт; Π_v – объемная производительность, м³/ч.

Полученный результат не окончательный и требует уточнения, так как здесь не учитываются изменения, внесенные в конструкцию исследуемой физической модели.

При первом испытании однофазного одиночного модуля выявилось, что штатные короткие, консольно закрепленные нагревательные элементы

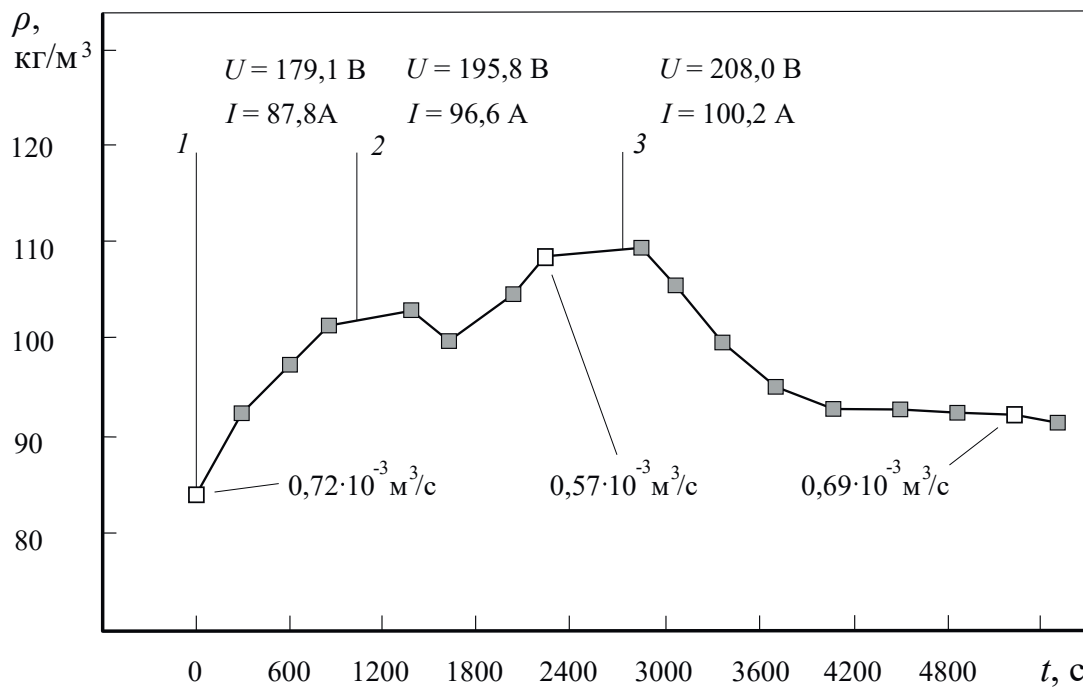


Рис. 6. Изменение насыпной плотности вермикулита в процессе корректировки мощности одиночного однофазного агрегата

Fig. 6. Change in vermiculite poured density when adjusting separate single-phase unit power

(рис. 2) при разогреве прогибались, что могло привести к электрическому замыканию. Поэтому они были заменены на другие – удлиненные, выходящие за пределы пода, а их консоли оперты на огнеупорные кирпичи.

На рис. 7 показана установка нагревателей – 1 с закреплением на головках – 2 и опиранием их консолей на огнеупорные кирпичи – 3, выложенные на дополнительной раме. Длина нагревателей стала существенно больше. Если зазор δ_1 равен

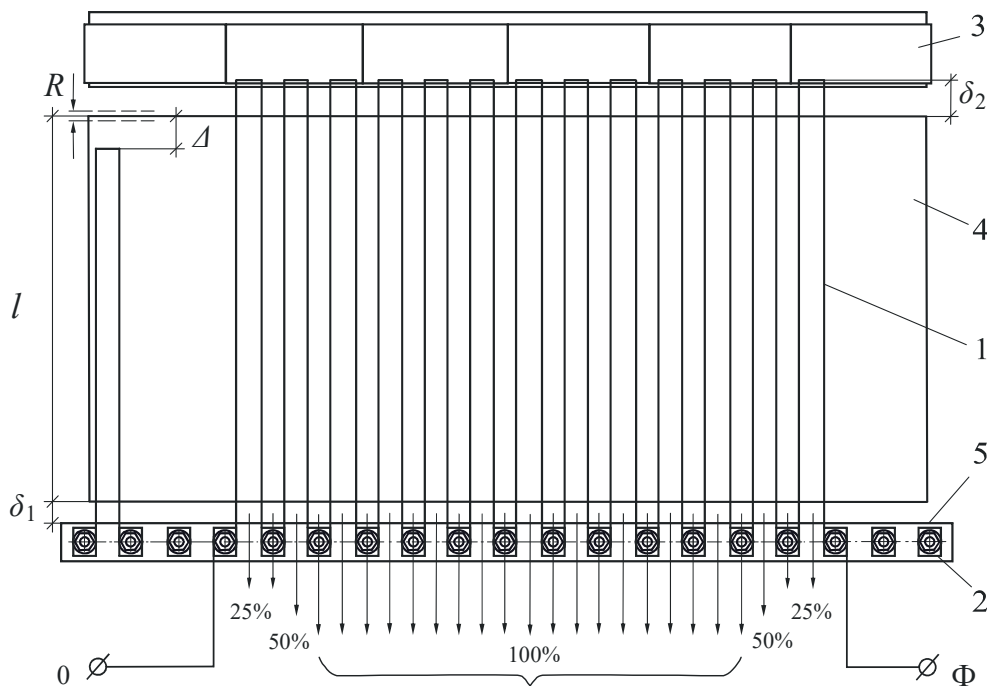


Рис. 7. Схема одиночного модуля с удлиненными нагревателями и опертыми консолями

Fig. 7. Single module design with elongated heaters and supported consoles

20 мм, и он исключает контакт подовой плиты – 4 во время колебаний с размахом R с панелью головок – 5, то длины консольных участков, выходящих за пределы платформы δ_2 , равны 45 мм. При длине пода 400 мм полная длина нагревателя, так как он П-образный, составила 0,96 м, но это в холодном состоянии. При нагреве до рабочих температур она увеличивалась еще на 7...8 мм, и размер нагревателя становился равным 0,976 м.

На консолях тепловая энергия теряется, приводя к перерасходу электроэнергии. Если бы консоли нагревателей соответствовали длине подовой плиты, то длина каждого из них составила бы 0,87 м. Разность длин – 0,106 м, это 10,9 % от исходных 0,976 м, следовательно, мощность всех нагревателей будет меньше на те же 10,9 % и составит 18570 Вт.

При установке удлиненных нагревателей их количество уменьшилось от штатных 18 шт. до 13 и на один укороченный нагреватель приходится мощность 18570/13=1428 Вт. Общее количество полос нихрома, образующих продольные камеры, вдоль которых движется вермикулит, равно 26 шт. Наблюдение за выходом вспученного вермикулита из печи (рис. 4) показало, что только 19 камер заполнены полностью без зазоров между зернами. По одной камере слева и справа заполнены примерно на 50 %, еще по две с обеих сторон на ~ 25 %. Если эти шесть камер привести к двум заполненным, то количество полноценно работающих камер будет 21 и по одному нагревателю с каждой стороны можно отключить от сети (рис. 7). Тогда потребляемая электрическая мощность снизится до величины:

$$N_1 = \frac{11}{13} \cdot 18570 = 15713 \text{ Вт,}$$

а удельная энергоемкость для Кокшаровского концентрата «Medium» будет равна:

$$e = \frac{N \cdot 3600}{\Pi_v} = \frac{15713 \cdot 3600}{0,693} = 81625971 \text{ Дж/м}^3.$$

Следует учесть, что упомянутый выше показатель энергоемкости модульно-спусковых печей – 170 мДж/м³, получен при обжиге Ковдорских концентратов. Температура нагревателей при обжиге в модульно-спусковой печи Кокшаровского вермикулита составляет 1043...1103 °К, тогда как при обжиге Ковдорского концентрата достаточно температуры 993...1033 °К [24]. Поэтому был сделан пересчет температур и соответствующей им электрической мощности. Для Кокшаровского вермикулита примем среднее значение 1078 °К, для Ковдорского – 1013 °К. Используя зависимость между мощностью теплового излучения и абсолютной температурой T (°К) разогретого тела [1]:

$$N = \sigma T^4 f,$$

σ – постоянная Стефана–Больцмана; f – площадь излучающей поверхности; N – мощность теплового излучения, Вт, получим соотношение:

$$\frac{N_0}{N} = \frac{T_0^4}{T^4} = \frac{1013^4}{1078^4} = 0,78,$$

где N_0 и N – мощность модульно-спусковой печи при обжиге Ковдорского и Кокшаровского концентратов соответственно; T_0 и T – соответствующие температуры, °К.

Получаем эквивалентное снижение потребляемой мощности на 22 %, следовательно, при обжиге Ковдорского вермикулита удельная энергоемкость была бы существенно ниже и равна:

$$e = \frac{N \cdot 3600}{\Pi_v} = \frac{15713 \cdot 0,78 \cdot 3600}{0,693} = 63668259 \text{ Дж/м}^3.$$

При примерно равных коэффициентах вспучивания ($\kappa_v \sim 8,6...9,2$) [23] полученный результат является окончательным – 63,7 мДж/м³, а прогнозы, сделанные в работе [9] по печам с вибрационной платформой, можно считать состоявшимися.

Если производительность одиночного модуля составляет 0,693 м³/ч, то трехмодульная печь с той же шириной подовой плиты ($B=0,96$ м) будет иметь производительность, м³/ч:

$$\Pi_{v1} = 3 \frac{36}{21} \cdot 0,693 = 3,56,$$

где 36 – общее количество заполненных вермикулитом продольных камер в каждом из модулей. При этом потребляемая таким агрегатом мощность составит 63 кВт.

Следует еще учесть и то, что обжигу подвергался Кокшаровский вермикулит (рис. 8, а) пятой размерной группы, а упомянутые выше данные удельной энергоемкости – 170 мДж/м³, получены при обжиге концентрата четвертой размерной группы Ковдорского (рис. 8, б) относительно мелкого вермикулита.

Еще одним важным результатом проведенных экспериментов было установление зависимости насыпной плотности вермикулита от температуры его нагрева, позволяющей уточнить аналитическую модель теплоусвоения, разработанную ранее [24].

Новая конструкция электрической печи с вибрационной подовой платформой отличается тем, что концентрация вспученного материала на поверхности подовой плиты в семнадцать раз больше, чем в модульно-спусковых печах [4, 5]. Высокая концентрация вермикулита позволила получить сплошную поверхность из вермикулитовых зерен и измерить их температуру.

В установившемся тепловом режиме при средней плотности вспученного продукта ~ 92 кг/м³ была зафиксирована средняя по нескольким измерениям температура 512 °С. При этом температура поверхности нихромовых нагревателей составляла в разных точках 718...776 °С при среднем значении 747 °С.

Минимальная плотность вспученного Ковдорского вермикулита четвертой размерной группы, которая неоднократно достигалась в процессе производства на электрической модульно-спусковой



Рис. 8. Вермикулит: а) Кокшаровский; б) Ковдорский

Fig. 8. Vermiculite: a) Koksharovsky; b) Kovdorsky

печи, составляет $\sim 86 \text{ кг/м}^3$. Экстраполируя полученную кривую (рис. 9) в область более высоких температур, получаем предельную точку с температурой 545°C . Очевидно, что в этой точке состояние вспученных зерен соответствует полной дегидратации и максимальному вспучиванию. Чтобы повысить точность построения кривой добавлена дополнительная точка, соответствующая образованию энстатита.

Опыты показали, что в процессе обжига вермикулита его температура не сравнивается с температурой нагревательных элементов, как это ранее

предполагалось при построении первой аналитической модели теплоусвоения вермикулита [24, 25]. Поэтому новую, уточненную модель теплоусвоения следует откорректировать, но это тема другого исследования.

Заключение

Предполагаемое прогнозируемое значение удельной энергоемкости обжига вермикулита $40\text{--}45 \text{ мДж/м}^3$, с учетом того, что обжигу подвергался Кокшаровский более крупный концентрат, практически достигнуто. Новую электрическую печь с вибрацион-

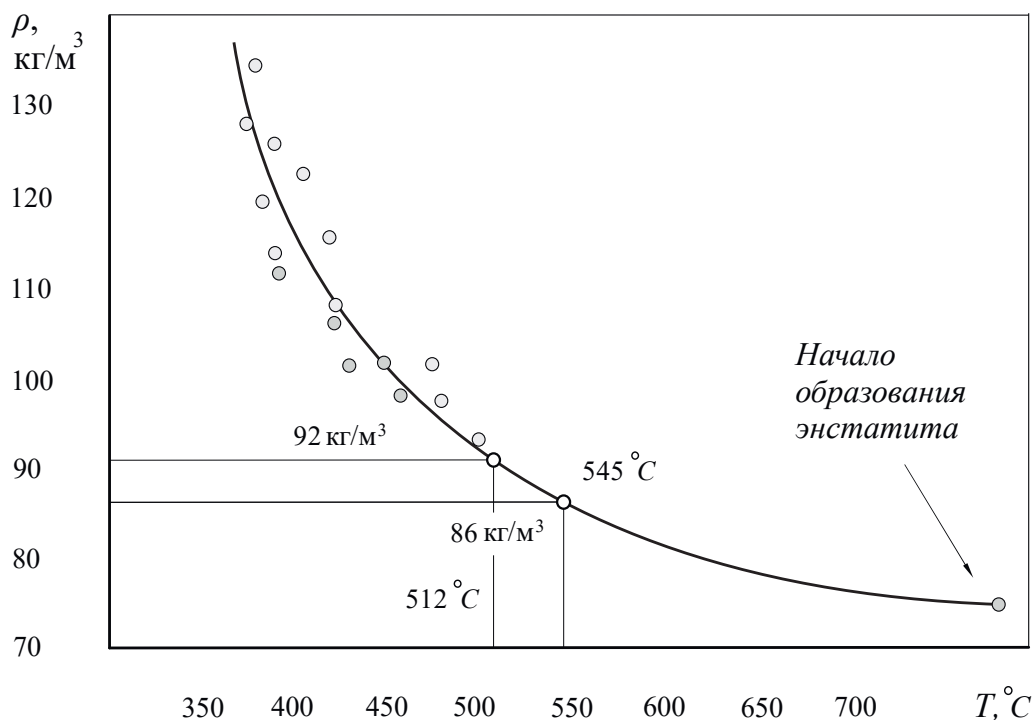


Рис. 9. Зависимость насыпной плотности вспученного вермикулита от температуры его нагрева

Fig. 9. Dependence of expanded vermiculite bulk density on temperature of its heating

ной подовой платформой по праву можно назвать высоко энергоэффективной, так как она по своим энергетическим характеристикам значительно превосходит не только пламенные печи (230...260 МДж/м³), но и наиболее совершенные электрические модульно-спусковые печи, в том числе с дополнительными неэлектрифицированными «нулевыми» модулями (170 МДж/м³) [24]. При примерно равных габаритных размерах она

обладает производительностью почти в три раза превышающей производительность модульно-спусковых печных агрегатов.

Для создания инженерной методики расчета таких печей необходимо математическое моделирование процессов теплопереноса и теплоусвоения вермикулита в рабочем пространстве электрических модулей. Эти исследования уже проводятся авторами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nizhegorodov A.I., Zvezdin A.V., Bryanskikh T.B. Analytical model of absorption-reflection properties of vermiculite under thermal // *Refractories and industrial ceramics*. – 2017. – V. 57. – № 1. – P. 19–24. DOI: 10.1007/s11148-017-0047-6.
2. Ахтямов Р.Я. Вермикулит – сырье для производства огнеупорных теплоизоляционных материалов // *Огнеупоры и техническая керамика*. – 2009. – № 1-2. – С. 59–64.
3. Mucahit Sutcu. Influence of expanded vermiculite on physical properties and thermal conductivity of clay bricks // *Ceramics International*. – 2015. – V. 41. – P. 2819–2827.
4. Effects of humic acid on phthalate adsorption to vermiculite / Zhi-Dan Wen, Da-Wen Gao, Zhe Li, Nan-Qi Ren // *Chemical Engineering Journal*. – 2013. – V. 223. – P. 298–303.
5. Development and thermochemical characterizations of vermiculite/SrBr₂ composite sorbents for low-temperature heat storage / Y.N. Zhang, R.Z. Wang, Y.J. Zhao, T.X. Li, S.B. Riffat, N.M. Wajid // *Energy*. – 2016. – V. 115. – P. 120–128.
6. Jun Kariya, Junichi Ryu, Yukitaka Kato. Development of thermal storage material using vermiculite and calcium hydroxide // *Applied Thermal Engineering*. – 2016. – V. 94. – P. 186–192.
7. Effect of the temperature on the structural and textural properties of a compressed K-vermiculite / F. Balima, An-Ngoc Nguyen, L. Reinert, S. Le Floch, V. Pischedda, L. Duclaux, A. San-Miguel // *Chemical Engineering Science*. – 2015. – V. 134. – P. 555–562.
8. *Industrial minerals & rocks: commodities, markets, and used* / Ed. by J.E. Kogal. – Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 2006. – 1529 p.
9. Rashad A.M. Vermiculite as a construction material – a short guide for Civil Engineer // *Construction and Building Materials*. – 2016. – V. 125. – P. 53–62.
10. Nizhegorodov A.I. Production of Foamed Vermiculite from Conglomerates in Modular-Pouring Electric Furnaces // *Refractories and Industrial Ceramics*. – 2016. – V. 57. – № 1. – P. 13–17. DOI: 10.1007/s11148-016-9918-5.
11. Sevim İşçi. Intercalation of vermiculite in presence of surfactants // *Applied Clay Science*. – 2017. – V. 146. – P. 7–13.
12. Sevim İşçi, Yavuz İşçi. Characterization and comparison of thermal & mechanical properties of vermiculite polyvinylbutyral nanocomposites synthesized by solution casting method // *Applied Clay Science*. – 2017. – V. 151. – P. 189–193.
13. Nizhegorodov A.I. Electrical roasting system with vibrational batch supply // *Russian engineering research*. – 2016. – V. 37. – № 3. – P. 180–184. DOI: 10.3103/S1068798X17030170.
14. Брянских Т.Б. Трехмодульная электрическая печь для обжига вермикулита и других сыпучих материалов с вибрационной подачей сырья // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. – 2016. – № 5. – С. 10–18.
15. Бауман В.А., Быховский И.И. Вибрационные машины и процессы в строительстве. – М.: Высшая школа, 1977. – 255 с.
16. Weaver W. Jr., Timoshenko S.P., Young D.H. *Vibration Problems in Engineering*. – New York: Wiley-Interscience, 1990. – 624 p.
17. Incropera F.P. et al. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. – New York: John Wiley & Sons Edition, 2007. – 999 p.
18. Marcos C., Menendez R., Rodriguez I. Thermoexfoliated and hydrophobized vermiculites for oleic acid removal // *Applied Clay Science*. – 2017. – V. 150. – P. 147–152.
19. Амorfизация серпентиновых минералов в технологии получения магнезиально-силикатного реагента для иммобилизации тяжелых металлов / И.П. Кременецкая, А.Т. Беляевский, Т.Н. Васильева и др. // *Химия в интересах устойчивого развития*. – 2010. – № 18. – С. 41–49.
20. Osman M.A. Organo-vermiculites: Synthesis, structure and properties. Platelike nanoparticles with high aspect ratio // *Journal of Materials Chemistry*. – 2006. – V. 16. – № 29. – P. 300–3013. DOI: 10.1039/b606036f.
21. Приморский вермикулит. URL: http://www.primver.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=4&lang=ru (дата обращения 11.01.2018).
22. Hombostel C. *Construction Materials: Types, Uses, and Applications*. – New York: John Wiley & Sons, Inc., 1991. – 1040 p.
23. Подоляк Ф.С. Сравнительная эффективность печей для обжига вермикулита // *Строительные материалы*. – 1973. – № 7. – С. 9–11.
24. Нижегородов А.И., Звездин А.В. Энерготехнологические агрегаты для переработки вермикулитовых концентратов. – Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2015. – 250 с.
25. Mechanical and thermal properties of lightweight concretes with vermiculite and EPS using air-entraining agent / A. Schackow, C. Effting, V.M. Folgueras, S. Güths, A.G. Mendes // *Construction and Building Materials*. – 2014. – V. 57. – P. 190–197.

Поступила 30.01.2018 г.

Информация об авторах

Нижегородов А.И., доктор технических наук, профессор кафедры строительных, дорожных машин и гидравлических систем Иркутского национального исследовательского технического университета.

Брянских Т.Б., аспирант Иркутского национального исследовательского технического университета.

Гаврилин А.Н., кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения и промышленной робототехники Школы новых производственных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Мойзес Б.Б., кандидат технических наук, доцент кафедры физических методов и приборов контроля качества Школы неразрушающего контроля и безопасности Томского политехнического университета.

Градобоев А.В., доктор технических наук, профессор кафедры физических методов и приборов контроля качества Школы неразрушающего контроля и безопасности Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Вавилова Г.В., кандидат технических наук, доцент кафедры физических методов и приборов контроля качества Школы неразрушающего контроля и безопасности Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Plusty J., PhD, профессор факультета электротехники, заместитель декана факультета Чешского технического университета.

Тузикова В., аспирант Чешского технического университета; технический торговый представитель Siemens, Energy Management.

UDC 622.784:622'17

TESTING A NEW ALTERNATIVE ELECTRIC FURNACE FOR VERMICULITE CONCENTRATES HEAT TREATMENT

Anatoly I. Nizhegorodov¹,
nastromo_irkutsk@mail.ru

Tatiana B. Bryanskikh¹,
broocha@yandex.ru

Alexey N. Gavrilin²,
tom-gawral@list.ru

Boris B. Moyzes²,
mbb@tpu.ru

Alexander V. Gradoboev²,
gava@tpu.ru

Galina V. Vavilova²,
gava@tpu.ru

Josef Tlustý³,
tlusty@fel.cvut.cz

Valeriya Tuzikova^{3,4},
tuzikval@fel.cvut.cz

¹ Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov Avenue, Irkutsk, 664074, Russia.

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

³ Czech Technical University,
2, Technická street, Prague, 16627, Czech Republic.

⁴ Siemens, Energy Management,
1, Siemensova street, Prague, 15500, Czech Republic.

Relevance. Vermiculite is one of the representatives of geo-resources that are widely used in various industries. The expanded vermiculite is obtained by heat treating of vermiculite ore concentrates in open flame furnaces. Expanded vermiculite, due to its layered-porous structure and high reflectivity, is the base for obtaining many thermo-insulating and refractory materials and products. Vermiculite is a part of building materials, and it is used to protect against radiation. Heat treating of vermiculite ores in flaming furnaces is an energy-intensive process; therefore the designs of electric modular-trigger furnaces are being actively developed. These furnaces have not significantly reduced the specific energy intensity of the firing process, that is why the work on creation of electric furnaces is up-to-date. This research is aimed to develop and construct a furnace prototype of a fundamentally new design.

The aim of the research is the experimental determination of operational specifications of a furnace model with a vibrating bottom platform which is a separate single-phase firing module during testing.

Methods: analysis of information sources in the field of research, synthesis of constructive solutions, physical modeling, parametric and functional description, experimental studies.

Results. The authors have developed the alternative electric furnace for firing vermiculite concentrates with a fundamentally new design structure which is a furnace with a vibrating bottom platform. A full-scale physical model of the furnace unit – a single-phase and single-module unit, was developed. Using the above-mentioned physical model the authors carried out the experiments and obtained the empirical data. During the experimental studies, the density of the expanded vermiculite was 90..91 kg/m³ and the productivity was 3,56 m³/h. The value of volume energy for various types of vermiculite roasting is 63,7..81,6 MJ/m³, which is almost three times less than that of existing open flame furnaces operating on hydrocarbon fuel.

Key words:

Furnace with a vibrating bottom platform, furnace prototype, electric modular-trigger furnace, vermiculite, vermiculite concentrate, thermal energy, volume energy value.

REFERENCES

- Nizhegorodov A.I., Zvezdin A.V., Bryanskikh T.B. Analytical model of absorption-reflection properties of vermiculite under thermal. *Refractories and industrial ceramics*, 2017, vol. 57, no. 1, pp. 19–24. DOI: 10.1007/s11148-017-0047-6.
- Ahtyamov R.Ya. Vermikulit – syre dlya proizvodstva ognepornyykh teploizolyatsionnykh materialov [Vermiculite is the raw material for production of refractory insulation materials]. *Ogneuporny i tekhnicheskaya keramika*, 2009, no. 1–2, pp. 59–64.
- Mucahit Sutcu. Influence of expanded vermiculite on physical properties and thermal conductivity of clay bricks. *Ceramics International*, 2015, vol. 41, pp. 2819–2827.
- Zhi-Dan Wen, Da-Wen Gao, Zhe Li, Nan-Qi Ren. Effects of humic acid on phthalate adsorption to vermiculite. *Chemical Engineering Journal*, 2013, vol. 223, pp. 298–303.
- Zhang Y.N., Wang R.Z., Zhao Y.J., Li T.X., Riffat S.B., Wajid N.M. Development and thermochemical characterizations of vermiculite/SrBr₂ composite sorbents for low-temperature heat storage. *Energy*, 2016, vol. 115, pp. 120–128.
- Jun Kariya, Junichi Ryu, Yukitaka Kato. Development of thermal storage material using vermiculite and calcium hydroxide. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 94, pp. 186–192.
- Balima F., An-Ngoc Nguyen, Reinert L., Le Floch S., Pischeda V., Duclaux L., San-Miguel A. Effect of the temperature on the structural and textural properties of a compressed K-vermiculite. *Chemical Engineering Science*, 2015, vol. 134, pp. 555–562.
- Industrial minerals & rocks: commodities, markets, and used*. Ed. by J.E. Kogal. Littleton, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 2006. 1529 p.
- Rashad A.M. Vermiculite as a construction material – a short guide for Civil Engineer. *Construction and Building Materials*, 2016, vol. 125, pp. 53–62.
- Nizhegorodov A.I. Production of Foamed Vermiculite from Conglomerates in Modular-Pouring Electric Furnaces. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2016, vol. 57, no. 1, pp. 13–17. DOI: 10.1007/s11148-016-9918-5.
- Sevim İşçi. Intercalation of vermiculite in presence of surfactants. *Applied Clay Science*, 2017, vol. 146, pp. 7–13.
- Sevim İşçi, Yavuz İşçi. Characterization and comparison of thermal & mechanical properties of vermiculite polyvinylbutyral nanocomposites synthesized by solution casting method. *Applied Clay Science*, 2017, vol. 151, pp. 189–193.
- Nizhegorodov A.I. Electrical roasting system with vibrational batch supply. *Russian engineering research*, 2016, vol. 37, no. 3, pp. 180–184. DOI: 10.3103/S1068798X17030170.
- Bryanskikh T.B. Three-module electric furnace for burning vermiculite and other bulk materials at vibratory feeding of raw materials. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2016, no. 5, pp. 10–18. In Rus.
- Bauman V.A., Bykhovskiy I.I. *Vibratsionnye mashiny i protsessy v stroitelstve* [Vibration apparatus and processes in construction]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1977. 255 p.
- Weaver W. Jr., Timoshenko S.P., Young D.H. *Vibration Problems in Engineering*. New York, Wiley-Interscience, 1990. 624 p.
- Incropera F.P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. New York, John Wiley & Sons Edition, 2007. 999 p.
- Marcos C., Menendez R., Rodriguez I. Thermoexfoliated and hydrophobized vermiculites for oleic acid removal. *Applied Clay Science*, 2017, vol. 150, pp. 147–152.
- Kremenetskaya I.P., Belyaevskiy A.T., Vasileva T.N., Korytnaya O.P., Makarova T.I. Amorfizatsiya serpentinovyykh mineralov v tekhnologii polucheniya magnezialno-silikatnogo reagenta dlya immobilizatsii tyazhelykh metallov [Amorphization of serpentine minerals in production of magnesia-silicate reagent for immobilization of heavy metals]. *Chemistry for Sustainable Development*, 2010, vol. 18, pp. 41–49.
- Osman M.A. Organo-vermiculites: Synthesis, structure and properties. Platelike nanoparticles with high aspect ratio. *Journal of Materials Chemistry*, 2006, vol. 16, no. 29, pp. 300–3013. DOI: 10.1039/b606036f.
- Primorsky vermiculite* [Primorye vermiculite]. Available at: http://www.primver.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=4&lang=ru (accessed 11 January 2018).
- Hombostel C. *Construction Materials: Types, Uses, and Applications*. New York, John Wiley & Sons, Inc., 1991. 1040 p.
- Podolyak F.S. Sravnitel'naya effektivnost pechey dlya obzhiga vermiculita [Comparative efficiency of furnaces for burning vermiculite]. *Stroitelnye materialy*, 1973, no. 7, pp. 9–11.
- Nizhegorodov A.I., Zvezdin A.V. *Energotekhnologicheskie agregaty dlya pererabotki vermiculitovykh koncentratov* [Energy-technology units for processing vermiculite concentrates]. Irkutsk, IGTU Press, 2015. 250 p.
- Schackow A., Effting C., Folgueras V.M., Güths S., Mendes A.G. Mechanical and thermal properties of lightweight concretes with vermiculite and EPS using air-entraining agent. *Construction and Building Materials*, 2014, vol. 57, pp. 190–197.

Received: 30 January 2018.

Information about the authors

Anatoly I. Nizhegorodov, Dr. Sc., professor, Irkutsk National Research Technical University.

Tatiana B. Bryanskikh, postgraduate student, Irkutsk National Research Technical University.

Alexey N. Gavrilin, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Boris B. Moyzes, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexander V. Gradoboev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Galina V. Vavilova, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Josef Tlustý, PhD, professor, Czech Technical University.

Valeriya Tuzikova, postgraduate student, Czech Technical University; technical commercial representative Siemens, Energy Management.

УДК 111 222 333 444.555

ПРИМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ДЕТЕРМИНАЦИИ ДЛЯ СРАВНЕНИЯ ОСЦИЛЛОГРАММ ОТКЛИКА СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ МЕТОДОМ НАНОСЕКУНДНЫХ НИЗКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Ковригин Борис Леонидович¹,
kovriginb@mail.ru

Лавринович Алексей Валериевич²,
rembon@mail.ru

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

² ОАО «ТОМСКНИПНЕФТЬ»,
Россия, 634027, г. Томск, пр. Мира, 72.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью контроля механического состояния обмоток силовых трансформаторов. Нарушение геометрии катушек влечёт за собой изменение изоляционных расстояний, вследствие чего уменьшается срок службы изоляции, могут произойти повреждения вплоть до появления межвитковых замыканий. Обнаружить такие дефекты в обмотках на стадии их зарождения является важной и сложной задачей, которая до настоящего времени не решена. Известен метод наносекундных низковольтных импульсов, который считается наиболее чувствительным и перспективным методом обнаружения таких дефектов, но при сравнении полученных этим методом осциллограмм не всегда понятно, отличаются ли они достаточно, чтобы сделать вывод о возможной неисправности испытуемого силового трансформатора.

Цель исследования: разработать методику обработки осциллограмм по результатам диагностики механического состояния обмоток силовых трансформаторов методом наносекундных низковольтных импульсов.

Объекты: осциллограммы по результатам диагностики механического состояния обмоток силового трансформатора ТМ-160/10-У1 методом наносекундных низковольтных импульсов.

Методы: метод наносекундных низковольтных импульсов для получения осциллограмм отклика силового трансформатора; анализ и сравнение полученных данных посредством расчета коэффициента детерминации; применение коэффициента детерминации для количественной оценки отличий сравниваемых осциллограмм.

Результаты. Применяя коэффициент детерминации, обработаны экспериментальные осциллограммы откликов на наносекундный зондирующий импульс низкого напряжения, полученных при диагностике трансформатора ТМ-160/10-У1 (длительность импульса 500 нс, длительность фронта 10–20 нс). Использование коэффициента детерминации позволило произвести количественную оценку при сравнении осциллограмм. Сформирован метод, позволяющий без специальной подготовки обслуживающего персонала более точно определять отличия откликов исправного трансформатора от откликов для трансформатора, имеющего дефекты обмоток.

Ключевые слова:

Энергоэффективное преобразование электроэнергии, силовой трансформатор, диагностика, метод низковольтных наносекундных импульсов, коэффициент детерминации, отклик, осциллограмма, дефектограмма, нормограмма.

Введение

Одним из критериев обеспечения энергоэффективного преобразования электроэнергии на местах добычи полезных ископаемых является бесперебойная работа электрической сети. Силовые трансформаторы – это ключевой элемент любой энергосистемы, наличие неисправностей которого необходимо регулярно проверять. При аварийных режимах работы трансформатора его обмотки подвергаются сильным электродинамическим воздействиям, во время которых механические напряжения зачастую превышают предел упругости материала обмоток, вследствие чего геометрия катушек нарушается. Изменяются изоляционные расстояния, вследствие чего в межвитковой изоляции могут значительно измениться средние значения напряженности электрического поля, заложённые при разработке и производстве трансформатора. Повышение средней напряженности электрического поля в некоторых точках изоляции приводит

к уменьшению её срока службы вплоть до появления межвиткового замыкания и выходу трансформатора из строя. Поэтому крайне важно фиксировать такие изменения на раннем этапе их развития [1–4]. Обнаружение таких дефектов в обмотках на стадии их зарождения является сложной задачей, которая до настоящего времени не решена. Известен метод наносекундных низковольтных импульсов (ННВИ), который считается наиболее чувствительным и перспективным методом обнаружения таких дефектов [5, 6]. Причина высокой чувствительности к малым изменениям геометрии или к слаборазвитым межвитковым замыканиям заключается в том, что даже при сравнительно небольших изменениях межвитковых и других емкостей меняется форма отклика сигнала по сравнению с формой отклика, полученной для трансформатора без дефектов [7–10]. Также известно, что чувствительность повышается при уменьшении фронта зондирующего импульса [11].

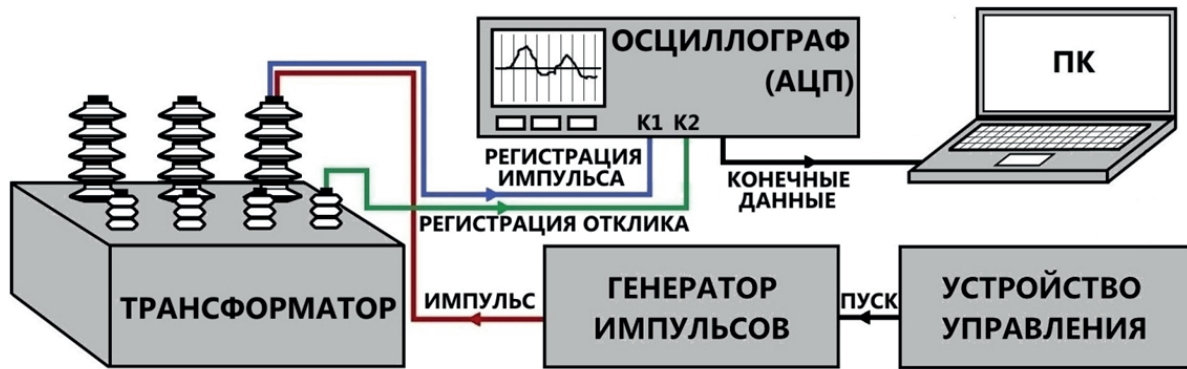


Рис. 1. Практическая реализация метода ННВИ

Fig. 1. Implementation of the Nanosecond Low Voltage Impulse (NLVI) testing

Практическая реализация метода ННВИ описывается на рис. 1. Производится запуск генератора зондирующих импульсов через устройство управления, подключенное к входу генератора «Пуск». С выхода генератора «Импульс» прямоугольный наносекундный зондирующий импульс поступает на обмотку трансформатора. С этого же ввода сигнал через измерительный кабель и делитель K1 поступает на 1-й осциллограф. Отклик обмоток на воздействии зондирующего импульса поступает через измерительный кабель и делитель K2 на второй осциллограф. Конечные данные передаются с осциллографов на ПК. Осциллограммы отклика, полученные на заведомо исправном трансформаторе, принято называть «нормограммами». Осциллограммы, полученные при диагностике состояния трансформатора после получения «нормограмм», принято называть «дефектограммами». Сравнение дефектограммы с нормограммой позволяет оценить текущее состояние испытуемого объекта [12].

В работе [13] предпринята попытка предложить обработку результатов ННВИ сравнением осциллограмм, полученных с исправного трансформатора и с этого же трансформатора, но по истечении некоторого срока эксплуатации. Разница между нормограммой и дефектограммой, приведенная в указанной работе, незначительна и лежит в пределах погрешности измерений. Метод, описанный в работе [13], не получил дальнейшего развития, т. к. обработка результатов испытаний силового трансформатора методом ННВИ указанным способом выполняется сложными графическими вычислениями с применением визуального анализа осциллограмм отклика (визуальное выявление локальных минимумов и максимумов на осциллограмме отклика, нахождение и сопоставление времени начала переходных процессов, визуальное нахождение отличий, субъективная оценка степени отличия). Результаты анализа указанным в работе [13] способом не дают однозначного ответа о наличии изменений в геометрии обмоток, сравнение осциллограмм отклика может занимать достаточно много времени. Сравняя полученные осциллограммы, не всегда понятно, отличаются ли они достаточно, чтобы сделать вывод о возможной

неисправности испытуемого силового трансформатора [14]. Для служб диагностики и эксплуатации высоковольтных силовых трансформаторов необходим метод, который позволял бы, обработав результаты диагностики трансформатора по методике ННВИ, получить численный показатель, определяющий дальнейшую пригодность эксплуатации трансформатора по результатам диагностики этим методом ННВИ.

По мнению авторов, одним из таких численных показателей может быть коэффициент детерминации, который позволяет произвести количественный анализ данных, полученных в различных сериях экспериментов [15, 16]. Метод коэффициента детерминации основан на сравнении двух осциллограмм посредством применения квадрата коэффициента корреляции Пирсона R^2 , суть которого заключается в корреляционно-регрессионном анализе, отражающем влияние вариации результативного признака Д (дефектограмма) на факторный признак Н (нормограмма). Расчет коэффициента корреляции Пирсона производится по формуле:

$$R = \frac{\sum (H_i - H_{\text{средн.}}) \times (D_i - D_{\text{средн.}})}{\sqrt{\sum (H_i - H_{\text{средн.}})^2 \times \sum (D_i - D_{\text{средн.}})^2}}, \quad (1)$$

где H_i – Значение i -й точки построения осциллограммы отклика исправного трансформатора (нормограммы); $H_{\text{средн.}}$ – среднее значение всех точек построения осциллограммы отклика исправного трансформатора (нормограммы); D_i – значение i -й точки построения осциллограммы отклика дефектного трансформатора (дефектограммы); $D_{\text{средн.}}$ – среднее значение всех точек построения осциллограммы отклика дефектного трансформатора (дефектограммы).

Таблица 1. Данные для расчета коэффициента детерминации

Table 1. Data for calculation of determination coefficient

i	Исправный трансформатор Not damaged power transformer	Дефектный трансформатор Damaged power transformer
1	0,14	0,07
2	0,18	0,13
...

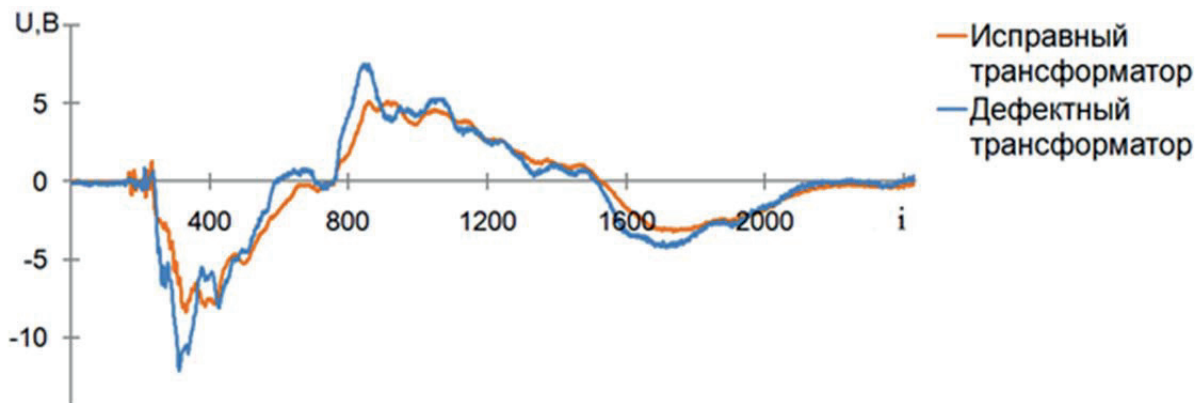


Рис. 2. Сравнение дефектограммы и нормограммы

Fig. 2. Comparison of damaged and not damaged power transformers

Данные для расчета коэффициента детерминации « R^2 » экспортируются из осциллографа, данные которого записываются как в виде изображения осциллограммы отклика (рис. 2), так и в виде массива точек, по которым построена осциллограмма отклика. В случае сравнения дефектограммы с нормограммой значения всех точек построения осциллограммы отклика исправного и дефектного трансформатора формируют в табл. 1. Среднее значение всех точек построения осциллограммы отклика вычисляется как отношение суммы значений всех точек к их количеству. Значения i -ых точек построения осциллограммы отклика берутся из табл. 1, затем производятся вычисления согласно формуле (1).

После формирования таблицы и выполнения расчета коэффициента детерминации для наглядности сравнения можно построить график, на котором в одной координатной плоскости будут представлены осциллограммы отклика исправного и дефектного трансформатора (рис. 2).

Итоговые результаты сравнения представлены на рис. 3.

Для ускорения процесса расчета рекомендуется использовать вычислительные программные комплексы. По мнению авторов, рекомендуемым программным комплексом можно считать Microsoft Excel, т. к.:

- 1) средствами MS Excel можно формировать и хранить таблицы и графики;
- 2) средствами MS Excel можно формировать и хранить базы данных с итоговыми результатами диагностики силовых трансформаторов в виде таблиц и графиков;
- 3) вычисления выполняются одной командой (=КВПИРСОН; =КОРРЕЛ²);
- 4) Microsoft Excel входит в состав Microsoft Office и на сегодняшний день Excel является одним из наиболее популярных приложений в мире;
- 5) подходит практически на все операционные системы;
- 6) данные осциллографа, содержащие массив точек построения осциллограмм, совместимы с MS Excel;
- 7) данный программный комплекс прост в использовании.

i	ИСПРАВНЫЙ ТР-Р	ДЕФЕКТНЫЙ ТР-Р
1	-0.14	-0.07
2	-0.18	-0.13
3	-0.04	-0.20
4	-0.07	-0.20
5	-0.18	-0.13
6	-0.11	-0.13
7	-0.11	-0.13
8	-0.11	-0.20
9	-0.04	-0.13
10	-0.07	-0.20
11	0.04	-0.20
12	-0.04	-0.07
13	-0.07	-0.13
...

КОЭФФИЦИЕНТ ДЕТЕРМИНАЦИИ = 0.91

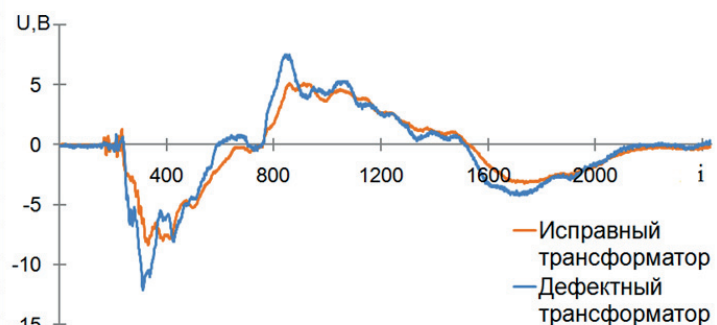


Рис. 3. Итоговые результаты сравнения

Fig. 3. Final comparison results

При сравнении осциллограмм отклика коэффициент детерминации « R^2 » характеризует величину, отражающую степень идентичности сравниваемых осциллограмм между собой. Коэффициент детерминации может варьировать в пределах от 0 (полное отсутствие идентичности) до +1 (полная идентичность) [17, 18]. Детерминация отличий между двумя осциллограммами по всем точкам их построения позволяет получить значение коэффициента детерминации, который можно использовать как численный результат сравнения [19]. При этом из алгоритма сравнения исключается визуальное выявление локальных минимумов и максимумов на осциллограммах отклика, визуальное нахождение отличий между осциллограммами отклика, субъективная оценка степени отличия осциллограмм отклика. Работа человека в данном случае заключается только в переносе данных из осциллографа в таблицу. Это позволяет выполнять более быстрое и корректное сравнение, не привязанное к человеческому фактору.

Цель исследования: на основе экспериментальных данных оценить целесообразность и возможность применения коэффициента детерминации для обработки результатов диагностики механического состояния обмоток силового трансформатора методом наносекундных низковольтных импульсов.

Применение коэффициента детерминации

Для сравнения взяты осциллограммы испытаний, которые были проведены в цеху по ремонту оборудования Ишимского ТПО ОАО «Тюменьэнерго», г. Ишим, Тюменской области. Трансформатор ТМ-160/10-У1 производства 1993 г., ОАО «Алттранс», г. Барнаул, введенный в эксплуатацию в 1993 г., был испытан методом ННВИ, импульсом длиной 500 нс и фронтом 10–20 нс. Схема подключения установки к трансформатору соответствует схеме, представленной на рис. 1.

В рамках первого эксперимента трансформатор ТМ-160/10-У1 был испытан в неповрежденном состоянии, в этом режиме работы были сняты осциллограммы ННВИ. Импульс подавался последовательно на каждый из его вводов и выводов. Чтобы проверить возможность сравнения одинаковых осциллограмм и исключить возможные погрешности и наводки, на каждый отдельный случай сни-

малось по три осциллограммы отклика. Затем изменяли длину зондирующего импульса и повторяли эксперимент. В рамках второго эксперимента специально были исполнены характерные повреждения трансформатора, такие как: замыкание трех витков, смещение витков в фазе «Авн» в нижней части обмотки, смещение витков в фазе «Авн» в верхней и нижней частях обмотки. Всего было снято около 100 различных осциллограмм отклика для каждого эксперимента. Зондирующий импульс, а также измерительное оборудование были неизменны.

Для рассмотрения возможности применения коэффициента детерминации были взяты первые три осциллограммы отклика, под номерами 0000, 0001 и 0002, соответствующие подаче зондирующего импульса на ввод высшего напряжения трансформатора фазы «Авн» и снятию отклика с ввода низшего напряжения трансформатора фазы «Анн». Осциллограммы отклика исправного трансформатора представлены на рис. 2.

Затем данные осциллограммы были обработаны в программном комплексе Microsoft Excel. Из точек построения осциллограмм был создан массив данных, по которому в одной координатной плоскости были построены все отклики исправного трансформатора. Значения коэффициентов детерминации для этих трёх осциллограмм варьировали в промежутке от 0,997 до 0,998, что говорит об их полной идентичности.

Для остальных экспериментов (межвитковое замыкание, смещение витков вниз обмотки, смещение витков вниз и вверх обмотки) были проделаны такие же действия, в каждом случае коэффициент детерминации находился в промежутке от 0,994 до 0,998. После проделанных вычислений отклики исправного трансформатора сравнивались с откликами поврежденного. Для более точного сравнения было решено использовать осциллограммы, построенные по средним (от трёх первичных осциллограмм) точкам [20]. Сравнение откликов исправного и дефектного трансформатора проходило в одной координатной плоскости. При сравнении осциллограмм друг относительно друга дополнительно отстраиваем таким образом, чтобы по оси времени начало отклика одной осциллограммы совпадало с откликом другой. Это необхо-

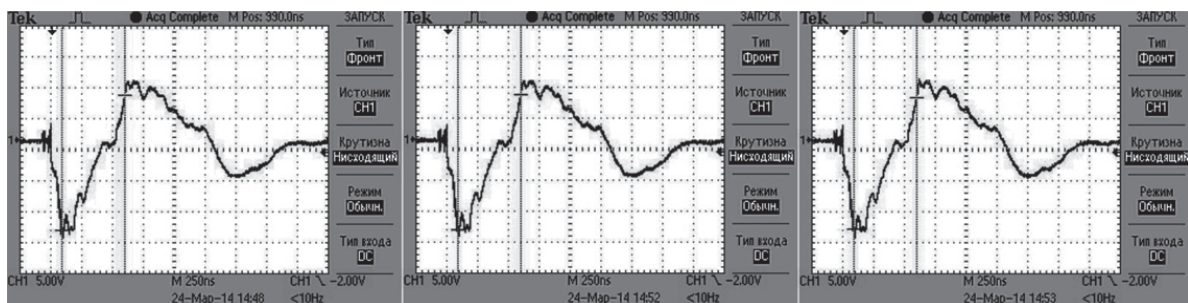


Рис. 4. Осциллограммы отклика исправного трансформатора ТМ-160/10-У1

Fig. 4. Response waveforms of the transformer TM-160/10-U1 without faults

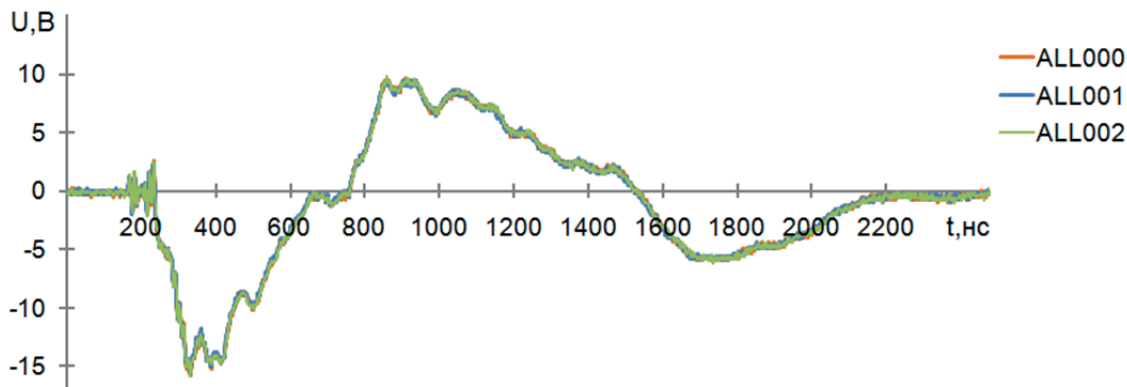


Рис. 5. Отклики исправного трансформатора

Fig. 5. Response waveforms of the not damaged power transformer

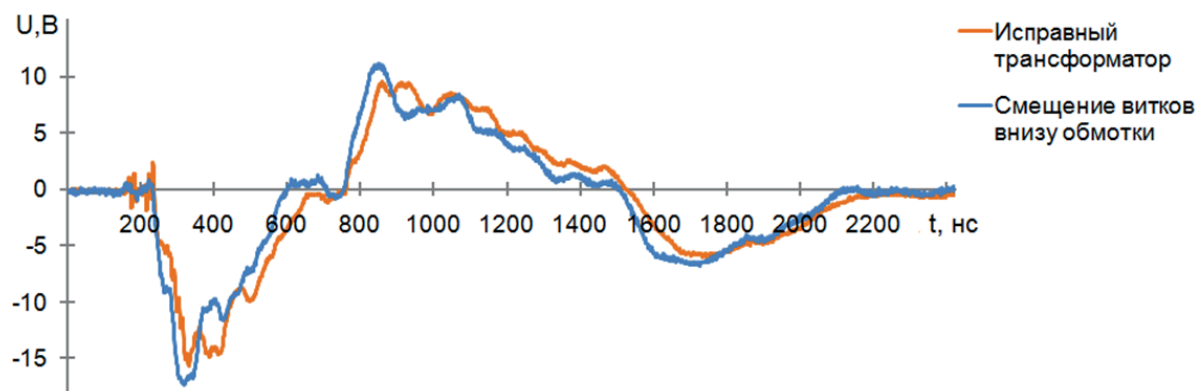


Рис. 6. Сравнение откликов исправного и дефектного трансформатора

Fig. 6. Comparison of response waveforms of damaged and not damaged power transformers

димое условие для применения коэффициента детерминации.

При сравнении откликов исправного трансформатора и трансформатора, имеющего смещение витков внизу обмотки, был вычислен коэффициент детерминации. Получили значение 0,914. Результаты всех экспериментов были занесены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты сравнения исправного и неисправного трансформатора

Table 2. Results of comparison of response waveforms of damaged and not damaged power transformers

Вид повреждений трансформатора Type of transformer faults	Коэффициент детерминации R^2 Coefficient of determination
Смещение витков внизу обмотки Axial deformation of the bottom winding	0,914
Смещение витков внизу и вверху обмотки Axial deformation of the top and bottom windings	0,910
Межвитковое замыкание трех витков Inter turn fault of three turns	0,909
Отсутствие повреждений Not damaged power transformer	0,997

Заключение

Метод ННВИ является перспективным методом диагностики механического состояния обмоток трансформатора и позволяет на ранних стадиях прогнозировать отклонения в геометрии обмоток. Процедура выявления дефектов методом ННВИ заключается в сопоставлении «нормограммы» и «дефектограммы». Чем больше отклонение «дефектограммы» от «нормограммы», тем значительнее изменение геометрии обмотки трансформатора или реактора. Общепринятой методикой численной оценки отличия осциллограмм отклика силовых трансформаторов до настоящего времени нет. Наиболее часто используется методика отличия площади «нормограммы» от площади «дефектограммы» за одинаковый промежуток времени. Такой подход требует большого диагностического опыта, занимает достаточно много времени и не дает универсального нормированного критерия идентичности или отличия «нормограмм» и «дефектограмм», получаемых для различных типов трансформаторов. Была поставлена цель разработать методику, позволяющую численно выразить отличие «нормограммы» от «дефектограммы» при обработке осциллограмм по результатам диагностики механического состояния обмоток силовых

трансформаторов методом ННВИ. В результате проведенного обзора существующих методов сравнения массивов экспериментальных данных для сравнения «нормограммы» и «дефектограммы» было предложено использовать коэффициент детерминации. Экспериментальными данными подтверждается, что применение коэффициента детерминации дает наглядное численное значение отличия «нормограммы» от «дефектограммы» при наличии механических дефектов обмотки. При смещении витков обмотки коэффициент детерминации равен 0,914–0,910, при межвитковом замыкании 0,909. При отсутствии дефектов коэффициент детерминации 0,997. Таким образом, нахождение коэффициента детерминации позволяет получить объективную оценку степени отличия «нормограммы» и «дефектограммы», что очень важно для служб эксплуатации и диагностики электро-технического оборудования.

Приведенные примеры обработки осциллограмм диагностики состояния обмоток трансфор-

матора методом ННВИ для разных видов дефектов обмоток трансформатора позволяют утверждать, что предлагаемый подход применения коэффициента детерминации дает численное значение различия осциллограмм, полученных при испытании импульсным методом. Само сравнение происходит алгоритмически проще, быстрее и практически лишено человеческого фактора. Благодаря этому обработка и сравнение осциллограмм отклика не требует большого опыта у выполняющего эту работу человека. Методика позволяет на основе итоговых результатов формировать диагностическую базу данных, это даёт возможность при необходимости достаточно быстро найти необходимые результаты диагностики и всецело с ними ознакомиться. Развитие данной методики позволит улучшить импульсный метод диагностики и сделает его более точным и объективным.

Авторы благодарят В.А. Лавриновича за помощь при подготовке материала статьи и обсуждении результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Система Стратегического планирования ремонтов. Методика экспертной оценки технического состояния оборудования // ОАО «ФСК ЕЭС». Версия 0.3. – М., 2006.
2. Давиденко И.В., Овчинников К.В. Алгоритм анализа повреждаемости силовых трансформаторов и примеры его реализации // Журнал ЭЛЕКТРО – 2014. – № 4. – С. 13–17.
3. Хренников А.Ю. Основные причины повреждения обмоток силовых трансформаторов при КЗ // Электричество. – 2006. – № 7. – С. 17–24.
4. Хренников А.Ю. Опыт обнаружения остаточных деформаций обмоток силовых трансформаторов // Энергетик. – 2003. – № 7. – С. 21–24.
5. Tenbohlen S., Ryder S.A. Making frequency response analysis measurements, a comparison of the swept frequency and LV Impulse methods // 13th International Symposium on HV Engineering, 25–29 August, 2003. – Delft: Elsevier, 2003. – P. 441–449.
6. Dorf R.C., Bishop R.H. Modern Control Systems, 10th ed. – New Delhi: Pearson Education, Inc., 2005. – 1035 p.
7. Islam S. Detection of shorted turns and winding movements in large power transformers using frequency response analysis // IEEE PES winter meeting. – Singapore, 23–27 January 2000. – V. 3. – P. 2233–2238.
8. Короленко В.В., Конов Ю.С., Федорова В.П. Обнаружение повреждений трансформаторов при КЗ // Электрические станции. – 1980. – № 7. – С. 22–26.
9. Lavrinovich V.A., Mytnikov A.V., Li Hongda. Advanced technology of transformer winding condition control based on nanosecond probing impulse // Resource-Efficient Technologies. – September 2016. – V. 2. – № 3. – P. 111–117.
10. Downhole generator based on a line pulse transformer for electro pulse drilling / D.A. Molchanov, V.A. Lavrinovich, I.V. Lavrinovich, V.F. Vazhov // IEEE Pulsed Power Conference (PPC 2017). – Brighton, Brighton and Hove, UK, 18–22 June 2017. – P. 7–16.
11. Lavrinovich V.A., Mytnikov A.V. Development of Pulsed Method for Diagnostics of Transformer Windings based on Short Probe Impulse // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – August 2015. – V. 22. – № 4. – P. 2041–2045.
12. Давиденко И.В., Комаров В.И. Вопросы надежности и диагностики силовых трансформаторов // Диагностика электрических установок: Доклады третьей научно-практической конференции. – Ангарск, 7–11 июля 2008. – С. 6–7.
13. Количественная оценка результатов импульсного дефектографирования обмоток силовых трансформаторов / С.В. Аликин, А.А. Дробышевский, Е.И. Левицкая, М.А. Филатова // Журнал Электротехника. – 1990. – № 5. – С. 12–15.
14. Хренников А.Ю., Киков О.М. Диагностика силовых трансформаторов в Самарэнерго методом низковольтных импульсов // Электрические станции. – 2003. – № 11. – С. 16–18.
15. Орлов А.И. Прикладная статистика. – М.: Изд-во «Экзамен», 2004. – 326 с.
16. Jay L. Probability and Statistics for Engineering and the Sciences, 8th ed. – Boston: Pearson Education Inc., 2011. – P. 508–510.
17. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Изд-во «Юрайт», 2015. – 480 с.
18. Бахрушин В.Е. Методы оценивания характеристик нелинейных статистических связей // Системные технологии. – 2011. – № 2 (73). – С. 9–14.
19. Anderson-Sprecher R. Model Comparisons and R² // The American Statistician. – 1994. – V. 48. – Iss. 2. – P. 113–117.
20. Islam A. Detection of Mechanical Deformation in Old Aged Power Transformer Using Cross Correlation Coefficient Analysis Method // Energy and Power Engineering. – 2011. – № 3. – P. 585–591.

Поступила 22.11.2017 г.

Информация об авторах

Ковригин Б.Л., аспирант Инженерной школы энергетики Национального исследовательского томского политехнического университета.

Лавринович А.В., инженер первой категории отдела по оборудованию ОАО «ТОМСКНИПИНЕФТЬ».

UDC 111 222 333 444.555

COMPARISON OF POWER TRANSFORMER RESPONSE WAVEFORMS OBTAINED BY NANOSECOND LOW-VOLTAGE IMPULSE TESTING USING DETERMINATION COEFFICIENT

Boris L. Kovrigin¹,
kovriginb@mail.ru

Alexei V. Lavrinovich²,
rembon@mail.ru

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

² TOMSKNIPINEFT (Open joint stock company),
72, Mira Avenue, Tomsk, 634027, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to predict the internal physical condition of power transformer windings. Windings displacement leads to a change in windings insulation distances. As a result, the service life of the winding insulation decreases and finally interturn fault occurs. Detection of minor faults in the transformer is essential and difficult task that has not been solved yet. The most sensitive and perspective method as known is nanosecond low-voltage impulse testing, but when response waveforms are obtained and compared, final conclusion (using by visual inspection) is not always clear to make a decision about failures in the transformer windings.

The main aim of the research is to develop a method for processing the response waveforms based on the results of diagnosing the internal physical condition of power transformer windings using nanosecond low-voltage impulses.

Objects: the response waveforms based on the results of diagnosing the internal physical condition of power transformer TM-160/10-Y1 by the nanosecond low-voltage impulse testing.

Methods: nanosecond low-voltage impulse testing for obtaining the response waveforms; analysis and comparison of the obtained pulse response waveforms by calculation of determination coefficient; coefficient of determination to quantify the differences between the response waveforms.

Results. The response waveforms of power transformer TM-160/10-Y1 were processed using the coefficient of determination, which allows quantifying the comparison of waveforms. The method that allows correctly quantifying prediction of the internal physical condition is developed.

Key words:

Energy conversion efficiency, power transformer, diagnosis, nanosecond low-voltage impulse testing, coefficient of determination, response, waveform, defectogram, normogram.

The authors appreciate professor V.A. Lavrinovich for detailed paper study and commentaries contributing to better comprehension and reasoning of conclusions.

REFERENCES

1. Sistema strategicheskogo planirovaniya remontov. Metodika ekspertnoy otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya oborudivaniya [System of repair planning strategy. Methods of quantification of machines technical condition]. OAO «FSK EES». Ver. 0.3. Moscow, 2006.
2. Davidenko I.V., Ovchinnikov K.V. Analysis in failures of power transformers and its implementation. *ELECTRO*, 2014, no. 4, pp. 1–17. In Rus.
3. Khrennikov A.Yu. Main causes of the transformer windings faults occurred by short circuits. *Electricity*, 2006, no. 7, pp. 17–24. In Rus.
4. Khrennikov A.Yu. Experience in detection of the transformer windings displacement. *Energetic*, 2003, no. 7, pp. 21–24. In Rus.
5. Tenbohlen S., Ryder S.A. Making frequency response analysis measurements, a comparison of the swept frequency and LV Impulse methods. *13th International Symposium on HV Engineering*. Delft, 25–29 August, 2003. Delft, Elsevier, 2003. pp. 441–449.
6. Dorf R.C., Bishop R.H. *Modern Control Systems*, 10th ed. New Delhi, Pearson Education, Inc., 2005. 1035 p.
7. Islam S. Detection of shorted turns and winding movements in large power transformers using frequency response analysis. *IEEE PES winter meeting*. Singapore, 23–27 January 2000. Vol. 3, pp. 2233–2238.
8. Korolenko V.V., Konov Yu.S., Fedorova V.P. Obnaruzhenie povrezhdeniy transformatora pri KZ [Detection of transformer failures after short circuits]. *Electrical stations*, 1980, no. 7, pp. 22–26.
9. Lavrinovich V.A., Mytnikov A.V., Li Hongda. Advanced technology of transformer winding condition control based on nanosecond probing impulse. *Resource-Efficient Technologies*, 2016, vol. 2, no. 3, pp. 111–117.
10. Molchanov D.A., Lavrinovich V.A., Lavrinovich I.V., Vazhov V.F. Downhole generator based on a line pulse transformer for electro pulse drilling. *IEEE Pulsed Power Conference (PPC 2017)*. Brighton, Brighton and Hove, UK, 18–22 June 2017. pp. 7–16.
11. Lavrinovich V.A. and Mytnikov A.V. Development of Pulsed Method for Diagnostics of Transformer Windings based on Short Probe Impulse. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2015, vol. 22, no. 4, pp. 2041–2045.
12. Davidenko I.V., Komarov V.I. Voprosy nadezhnosti i diagnostiki silovyykh transformatorov [Issues on reliability and diagnosing of power transformers]. *Diagnostika elektricheskikh ustanovok. Doklady tretey nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Diagnosing of electrical facilities. Proc. of the third science-practice conference]. Angarsk, 2008. pp. 6–7.
13. Alinkin S.V., Drobishevskiy A.A., Levitskaya E.I., Filatova M.A. Kolichestvennaya otsenka rezultatov impulsnogo defektografiro-

- vaniya obmotok silovykh transformatorov [Quantify of differences between the response waveforms of power transformer]. *Electrical Engineering Journal*, 1990, no. 5, pp. 12–15.
14. Khrennikov A.Yu., Kikov O.M. Diagnostika silovykh transformatorov v Samaraenergo metodom nizkovoltnykh impulsiv [Diagnosis of power transformers in Samaraenergo using low-voltage impulses testing]. *Electrical stations*, 2003, no. 11, pp. 4–54.
 15. Orlov A.I. *Prikladnaya statistika* [Applied Statistics]. Moscow, Ekzamen Publ., 2004. 326 p.
 16. Jay L. *Probability and Statistics for Engineering and the Sciences*, 8th ed. Boston, Pearson Education Inc., 2011. pp. 508–510.
 17. Gmurman V.E. *Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika* [Theory of Probability and Mathematical Statistics.]. Moscow, Yurait Publ., 2015. 480 p.
 18. Bakhrushin V.E. Metody otsenivaniya nelineinykh statisticheskikh svyazei [Methods for estimating nonlinear statistical links]. *System technologies*, 2011, no. 2 (73), pp. 9–14. In Rus.
 19. Anderson-Sprecher R. Model Comparisons and R^2 . *The American Statistician*, 1994, vol. 48, Iss. 2, pp. 113–117.
 20. Islam A. Detection of Mechanical Deformation in Old Aged Power Transformer Using Cross Correlation Coefficient Analysis Method. *Energy and Power Engineering*, 2011, no. 3, pp. 585–591.

Received: 22 November 2017.

Information about the authors

Boris L. Kovrigin, post graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexei V. Lavrinovich, engineer, TOMSKNIPINEFT.

УДК [621.835+621.888].001.5:622.243

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ШАРОСТРУЙНОГО БУРЕНИЯ РЕГУЛИРОВАНИЕМ РАССТОЯНИЯ ОТ СНАРЯДА ДО ЗАБОЯ

Урниш Виктор Викторович¹,
madvic93@mail.ru

Саруев Лев Алексеевич¹,
saruevla@tpu.ru

Саруев Алексей Львович¹,
saruev@tpu.ru

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

Актуальность. При бурении шароструйным способом одним из главных технологических параметров является расстояние от снаряда до забоя. Известно несколько методов и конструкций шароструйного снаряда, которые позволяют поддерживать это расстояние при помощи опорных элементов. Струйный аппарат при этом жёстко удерживается на определённом расстоянии от вооружения, разрушающего периферийную или центральную часть забоя вращательным способом. Однако ни один способ не даёт возможность точно определить значение оптимального расстояния. Так как рассчитать необходимое расстояние для разных пород с учетом их механических характеристик довольно сложно, большое значение приобретает выявление и поддержание оптимального расстояния от снаряда до забоя непрерывно, в процессе бурения.

Цель: провести анализ основных способов и конструкций для поддержания расстояния от снаряда до забоя, сформулировать на их основании требования к снаряду. С учетом требований предложить способ поддержания расстояния от снаряда до забоя при шароструйном бурении, позволяющий непрерывно определять необходимое расстояние для текущих условий.

Объектом исследования являются призабойные процессы шароструйного бурения.

Методика: обобщение и анализ литературных источников; исследование технологических процессов шароструйного бурения; исследование влияния расстояния между долотом и забоем на эффективность разрушения горных пород; исследование колонны бурильных труб в качестве акустического канала связи, в котором распространяются упругие колебания при ударах отскакивающих от забоя шаров по долоту; разработка технологической схемы для повышения эффективности шароструйного бурения; экспериментальные исследования с применением датчика акустических колебаний и осциллографической приставки; считывание и анализ осциллограмм.

Результаты. Исследовано расстояние от снаряда до забоя, которое оказывает влияние на эффективность шароструйного бурения. Проведен анализ основных способов и конструкций, на основе которого сформулированы требования к буровому снаряду. С учетом разработанных требований предложен способ поддержания оптимального расстояния от снаряда до забоя при шароструйном бурении. Представлены результаты проведения эксперимента предложенным способом, доказывающие эффективность его использования с целью непрерывного определения расстояния от снаряда до забоя. Полученные результаты могут быть использованы для обоснования технологии непрерывного поддержания оптимальных режимов бурения.

Ключевые слова:

Разрушение горных пород, породоразрушающий инструмент, шароструйное бурение, шароструйный снаряд, расстояние от снаряда до забоя, датчик акустических колебаний.

Введение

В настоящее время активно проводится поиск новых способов бурения скважин различного назначения. Повышение эффективности бурения в крепких горных породах может быть реализовано за счет разработки новых материалов и новых конструктивных решений для породоразрушающего инструмента (ПРИ). Несмотря на постоянное совершенствование ПРИ, бурение механическими способами в твердых горных породах остается недостаточно эффективным, так как характеризуется низкой механической скоростью бурения и величиной рейсовой проходки на долото. Поэтому актуальность приобретает разработка альтернативных способов разрушения твердых горных пород [1–5]. Одним из наиболее перспективных является гидродинамический способ разрушения горных пород, осуществляемый высокоскоростной струей жидкости [6, 7]. Данным способом на забой скважины

можно передавать значительные мощности, при этом скорость бурения и проходка на долото возрастают. Кроме того, этот способ легко вписывается в существующую технологию бурения механическими способами, при которой для очистки скважины от шлама на забой подается промывочная жидкость. Однако гидродинамический способ в традиционном виде малоэффективен для бурения скважин в твердых горных породах [8].

Шароструйный способ бурения скважин, заключающийся в разрушении горных пород высокоскоростными ударами шаров, непрерывно циркулирующих в призабойной зоне, позволит решить ряд технических и технологических проблем, возникающих при разрушении твердых горных пород [6, 8].

На кафедре бурения скважин Томского политехнического университета А.В. Ковалевым разработана оптимальная конструкция шароструйно-

эжекторного бурового снаряда (ШЭБС), исследованы основные технические и технологические параметры, предложена оригинальная методика расчета процессов шароструйного бурения [8], что является хорошим фундаментом для дальнейших исследований.

В работах, посвященных шароструйному бурению [8–10], отмечается, что на эффективность разрушения горных пород при шароструйном бурении оказывает влияние ряд технологических параметров, одним из которых является оптимальное расстояние от снаряда до забоя (РСЗ).

Методика исследований

Результаты американских исследований [11, 12] показывают, что приближение долота к забою скважины сопровождается увеличением скорости бурения. Однако чрезмерное уменьшение РСЗ приводило к снижению скорости бурения, что объяснялось тем, что вылетающим из вторичного сопла шарам препятствуют шары, отскакивающие от забоя скважины. К тому же при малом значении

расстояния от долота до забоя площадь сечения скважины будет уменьшаться, т. е. будет снижаться диаметр скважины, что приведет к невозможности бурения в связи с заклиниванием шаров в затрубном пространстве. Американские исследователи [11 и др.] выяснили, что для обеспечения равномерного потока шаров в призабойной зоне скважины зазор между долотом и забоем должен составлять 2,8–3,4 от диаметра камеры смещения.

Для проверки этих данных было проведено исследование влияния расстояния между долотом и забоем на эффективность разрушения [13]. Исходные геометрические и технологические параметры: диаметр бурового снаряда $d_{bc}^n=16$ мм, диаметр камеры смещения $d_{kc}=8$ мм, диаметр сопла $d_c=2$ мм, длина камеры смещения $l_{kc}=100$ мм, угол раскрытия диффузора $\alpha_{pd}=10^\circ$, диаметр шаров $D_{ш}=3$ мм, масса порции шаров $m_{ш}=25$ г, расход промывочной жидкости $Q_p=6,7$ л/мин, разрушаемый материал – мрамор, промывочная жидкость – вода.

Как видно из рис. 1, 2, с увеличением расстояния до забоя объем скважины уменьшается, а диа-

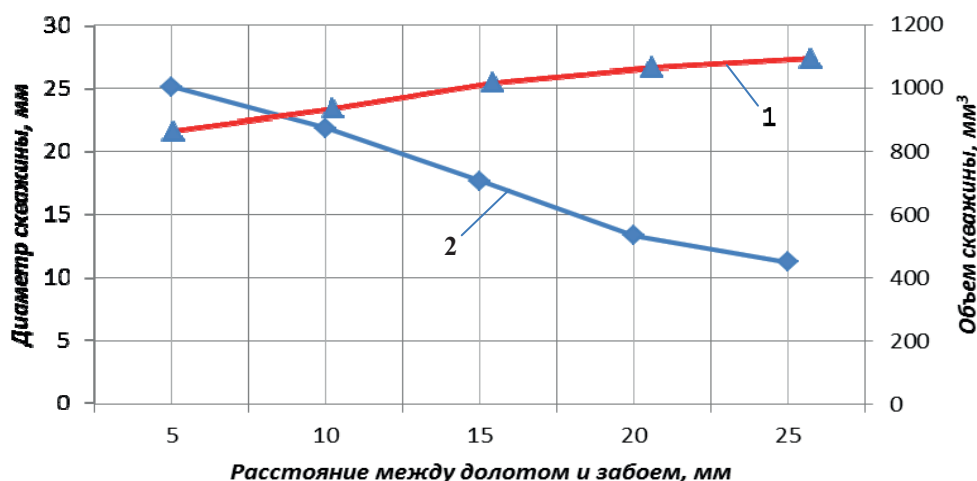


Рис. 1. Зависимость диаметра (1) и объема (2) скважины от расстояния между долотом и забоем

Fig. 1. Dependence of the well diameter (1) and volume (2) on spacing between the drill bit and the hole bottom

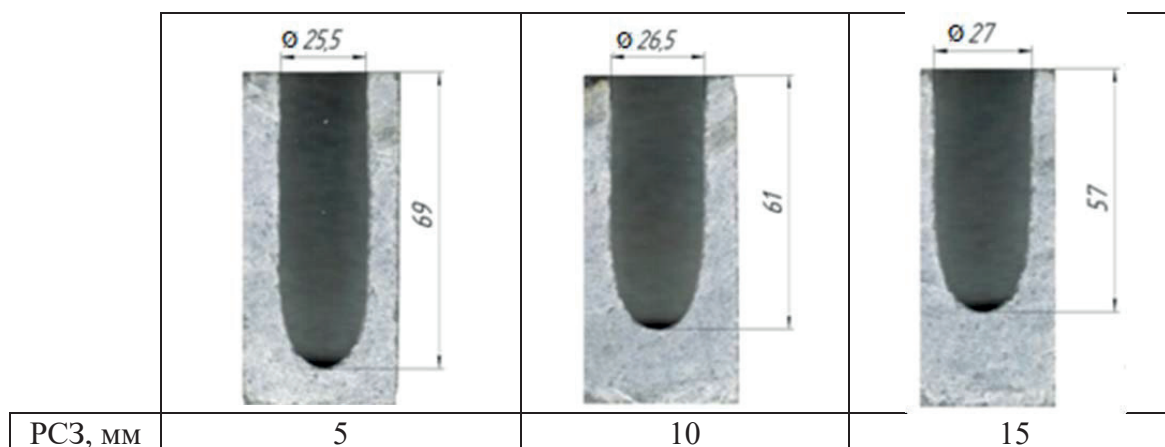


Рис. 2. Профиль скважин, пробуренных при варьировании РСЗ

Fig. 2. Profile of wells drilled with varying the spacing between the drill bit and the hole bottom

метр выработки увеличивается. Таким образом, подтверждаются результаты исследований американских ученых, и, следовательно, необходимо поддерживать минимальное возможное расстояние, при котором вместе с тем не возникает заклинивание шаров. Однако одно и то же значение РСЗ не применимо к различным по механическим свойствам породам, а также технологическим условиям. Поэтому в целях повышения эффективности данного способа бурения необходимо решать проблему оптимизации регулирования РСЗ, которая является достаточно сложной. Предлагались различные способы её решения [12–19].

Один из способов был предложен А.Б. Уваковым [17]. Он основан на определении скорости бурения, т. е. ШЭБС опускался на расчетную глубину через равные промежутки времени при известной скорости проходки скважины. Ограничение применения такой технологии связано с уровнем геологической изученности разреза скважины по глубине. В результате экспериментальных исследований А.Б. Увакова и В.В. Штрассера установлено, что оптимальное расстояние аппарата от забоя, при котором скорость бурения максимальна, находится в пределах 1,8–3,3 диаметра камеры смешения.

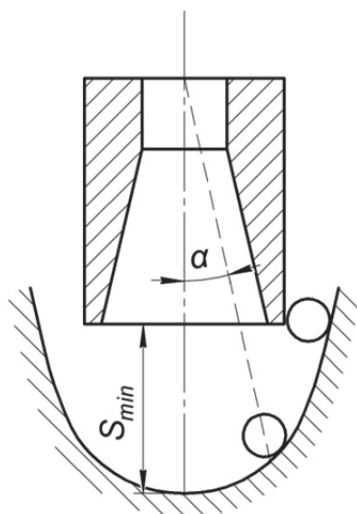


Рис. 3. Расположение аппарата на минимальном расстоянии от забоя

Fig. 3. Position of the drill bit at the minimum distance from the bottom hole

Так, А.Б. Уваков предлагал методику расчета минимального и максимального расстояния от снаряда до забоя [6 и др.], которые являются ограничивающими значениями диапазона выбора оптимального расстояния. Если расстояние между долотом и забоем будет меньше оптимального (рис. 3), процесс углубления скважины будет тормозиться вследствие того, что выходное сечение диффузора находится в области криволинейной части забоя и лишь незначительная часть забоя разрушается непосредственно ударами шаров, разогнавшихся в камере смешения.

При расположении долота в цилиндрической части скважины на таком расстоянии от криволинейного забоя, что вылетающие шары бомбардируют его поверхность полностью (рис. 4), на отскокившие от забоя шары будет воздействовать поток жидкости, вылетающий из диффузора, в результате чего ухудшатся условия их подъема для последующего всасывания. Кроме того, в рассматриваемом случае шары чаще всего будут соударяться с забоем не по нормали, а под некоторым углом α [10].

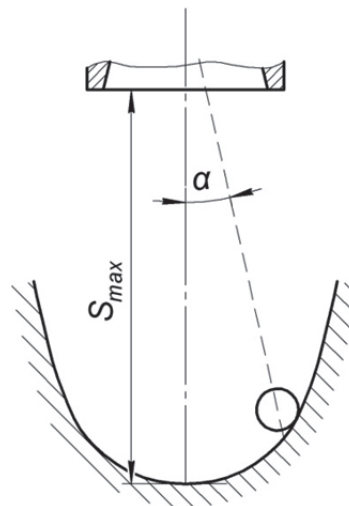


Рис. 4. Расположение аппарата в цилиндрической части скважины

Fig. 4. Position of the drill bit in the cylindrical part of the bottom hole

Другим способом оптимального поддержания РСЗ является расхаживание бурового снаряда, когда в процессе бурения через определённые промежутки времени снаряд опускается до забоя, а затем поднимается на необходимое расстояние. В частности, проводилось бурение на образцах мрамора [20 и др.]. После проходки определенного интервала (рис. 5, б) буровой снаряд кратковременно опускался на забой скважины (рис. 5, в) и поднимался до запланированного расстояния между долотом и забоем (рис. 5, г). Расхаживание производилось с периодичностью $t_{рас}$. В этом случае при контакте снаряда с забоем скважины возникает угроза его деформации под действием осевой нагрузки. Не исключается также возможность гидравлического удара при перекрытии канала бурового снаряда во время его контакта с забоем.

Для решения рассматриваемой проблемы также предлагались различные устройства. Например, Л. Леджервуд предложил конструкцию [15], в основе которой лежит использование механического щупа. При превышении допустимого расстояния до забоя, которое регулируется длиной щупа, опора частично перекрывает канал первичного сопла, вызывая повышение давления в системе подачи бурового раствора, что сигнализирует о необходимости спускать ШЭБС. Из недостатков можно выделить общую ненадёжность конструк-

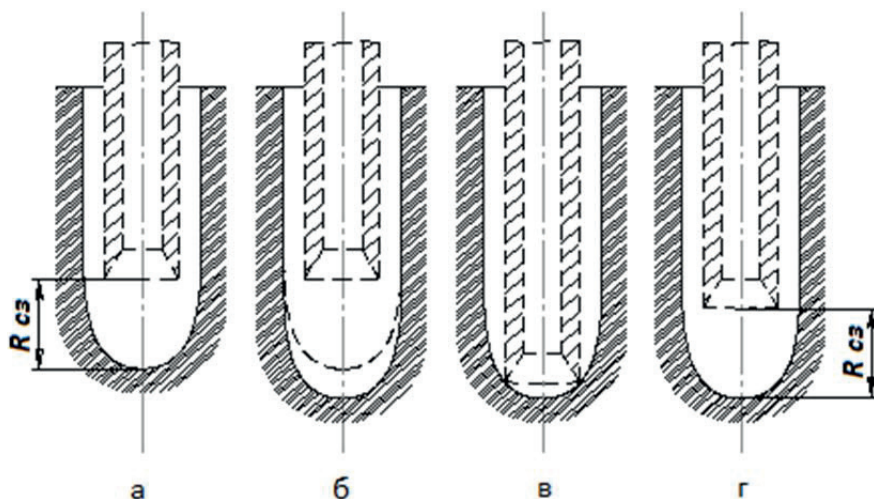


Рис. 5. Схема поддержания оптимального расстояния между долотом и забоем путем расхождения бурового снаряда

Fig. 5. Scheme for keeping the optimal spacing between the bit and the bottom by pacing the drilling tool

ции, вызванную высокой вероятностью деформации щупа.

Способ поддержания РСЗ посредством счётчика расхода шаров [16] базируется на том, что каждый шар во время движения в камере смещения существенно изменяет индуктивность или ёмкость чувствительного элемента. Оптимальное расстояние от снаряда до забоя устанавливается по максимальному расходу шаров. Предложенная конструкция также имеет недостатки. Первый из них – это необходимость создания канала связи и питания, что усложняет технологическую схему шароструйного бурения. Второй – сложность устройства, как следствие – уменьшение жёсткости и износоустойчивости бурового снаряда за счёт уменьшения его стенок.

Известно несколько конструкций, которые позволяют поддерживать РСЗ при помощи опорных элементов. Струйный аппарат при этом жёстко удерживается на определённом расстоянии от вооружения, разрушающего периферийную или центральную часть забоя вращательным способом.

Недостаток одной конструкции [17] состоит в сложности синхронизации работы долота, реализующего совместное разрушение горных пород вращательным и шароструйным способами. То есть, если центральная часть забоя будет разрушаться быстрее или медленнее периферийной, контроль РСЗ будет осложнён. Кроме того, необходимость вращения инструмента снижает значимость применения шароструйного бурения, одним из основных достоинств которого является отсутствие потребности во вращении снаряда. Недостатком других конструкций [18, 19] является низкая стойкость, обусловленная воздействием породоразрушающих шаров на опорные элементы снаряда, сложность синхронизации работы, бурение шарами малого диаметра. Они также не лишены недостатков предыдущей конструкции, необходимости вращения ШЭБС.

Таким образом, проведённый анализ показал, что каждый из рассмотренных способов поддержания требуемого РСЗ имеет существенные недостатки.

Сопоставив результаты исследований, можно наблюдать большой разброс рекомендуемых значений расстояния между долотом и забоем скважины, что указывает на необходимость более детальных экспериментальных исследований с использованием современных технических средств. Учитывая то, что данный параметр считали ключевым для поддержания требуемого диаметра скважины, рекомендуемые значения расстояния между долотом и забоем являются завышенными. Поэтому необходимо разработать способ непрерывного поддержания оптимального РСЗ.

Это можно осуществить, рассмотрев колонну бурильных труб как акустический канал связи, в котором распространяются упругие колебания при ударах шаров [19, 21]. Оптимизация процесса регулирования расстояния от снаряда до забоя скважины достигается благодаря непрерывной регистрации упругих колебаний, вызванных ударами циркулирующих в призабойной зоне породоразрушающих шаров и фиксируемыми датчиком акустических колебаний, установленным на колонне бурильных труб (рис. 6). В качестве датчика – 7 (Д) могут быть использованы пьезорезистивные акселерометры, которые подходят для измерения длительных переходных процессов и кратковременных ударных воздействий. В данном случае использовался акселерометр Bruel&Kjaer 4383, осциллографическая приставка Velleman PCS500, программное обеспечение для ПК Pc-Lab 2000.

На забой скважины засыпают порцию шаров – 6, спускают буровой снаряд, насосом подается промывочная жидкость. В процессе циркуляции в призабойной зоне скважины шары постоянно взаимодействуют с буровым снарядом, в котором формируются продольные волны деформации в ре-

зультате их отскока от забоя скважины. Формирующиеся упругие колебания передаются по колонне бурильных труб – 1 на устье скважины, где регистрируется датчиком акустических колебаний – 7 (Д), усиливаются с помощью усилителя – 8 (У) и посредством осциллографической приставки – 9 (ОП) направляются на систему управления – 10, задача которой состоит в том, чтобы передавать управляющее воздействие буровому инструменту на основании обратной связи от породы, изменения технологических параметров.

Рис. 6. Способ регулирования РСЗ с применением датчика акустических колебаний: 1 – колонна бурильных труб; 2 – центраторы; 3 – сопло; 4 – камера смешения; 5 – диффузор; 6 – шары; 7 – датчик акустических колебаний; 8 – усилитель сигнала; 9 – осциллографическая приставка; 10 – система управления

Fig. 6. Method of spacing regulation using an acoustic oscillation sensor: 1 are the drill pipes; 2 are the centralizers; 3 is the nozzle; 4 is the mixing chamber; 5 is the diffuser; 6 are the balls; 7 is the sensor of acoustic oscillations; 8 is the signal amplifier; 9 is the oscillograph attachment; 10 is the control system

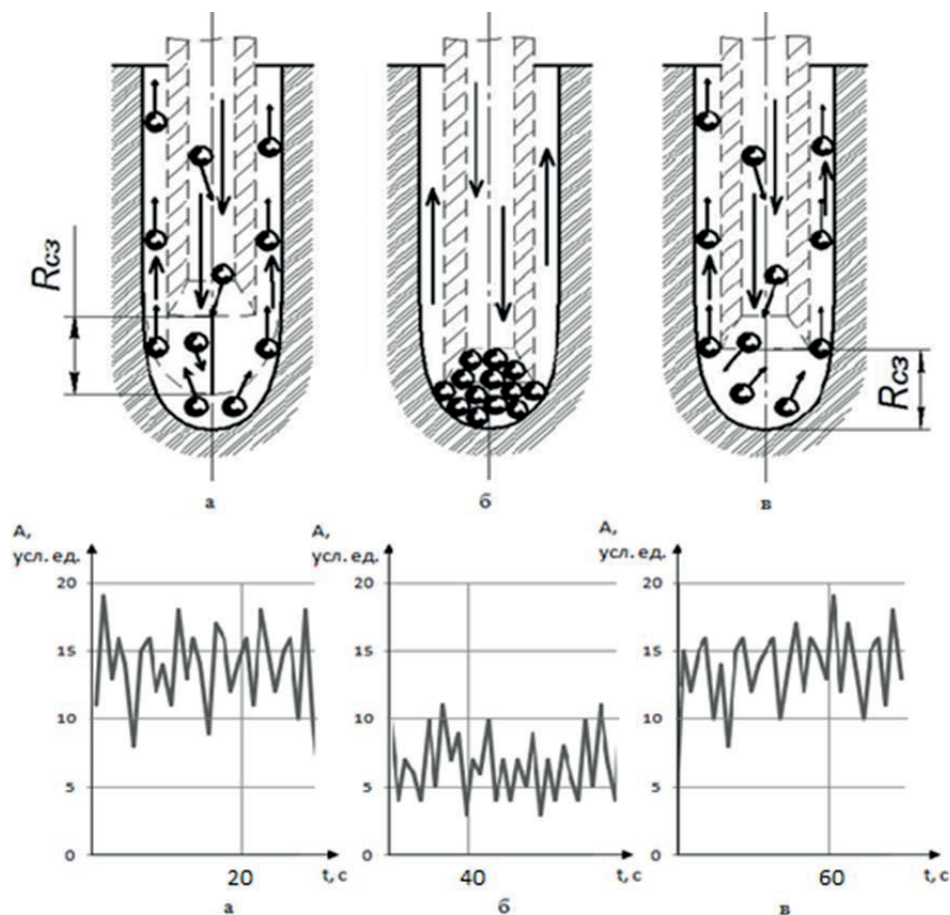
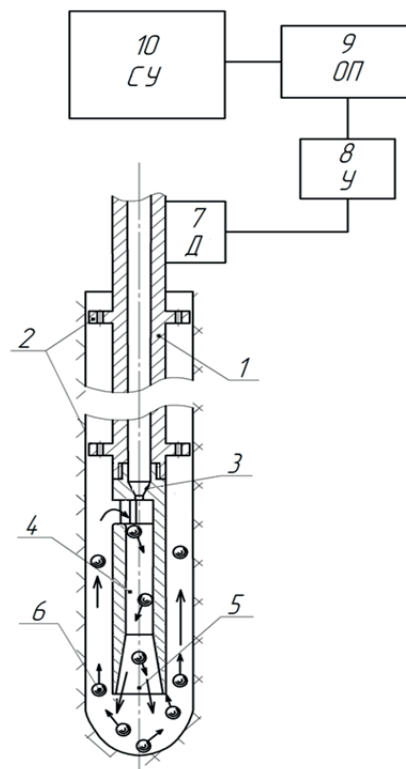


Рис. 7. Схема регулирования расстояния между снарядом и забоем скважины

Fig. 7. Scheme of regulation of the spacing between the bit and the bottom

После забуривания скважины и проходки определенного интервала (рис. 7, а) буровой снаряд кратковременно опускают до момента заклинивания шаров (рис. 7, б), сопровождающегося снижением амплитуды сигнала, регистрируемого датчиком акустических колебаний – 7, и поднимают до возобновления их циркуляции (рис. 7, в), сопровождающегося увеличением амплитуды сигнала, что свидетельствует о достижении оптимального расстояния между снарядом и забоем скважины. При этом процесс управления механизмом подачи может осуществляться оператором или автоматическим регулятором, оптимальный режим устанавливался непосредственно в процессе бурения по амплитудной характеристике.

Выводы

1. Анализ основных способов и конструкций для поддержания расстояния от снаряда до забоя показал, что на данный момент технология непрерывного поддержания оптимального РСЗ при шароструйном бурении отсутствует. В связи с этим были исследованы призабойные процессы шароструйного бурения, а также рассмо-

трена колонна бурильных труб в качестве акустического канала, в котором при ударах по долоту отскочивших от забоя шаров распространяются упругие колебания.

2. Разработана технологическая схема для повышения эффективности шароструйного бурения, включающая в себя датчик акустических колебаний и осциллографическую приставку.
3. Был впервые предложен способ поддержания расстояния от снаряда до забоя при шароструйном бурении, позволяющий непрерывно определять необходимое расстояние для текущих условий.
4. Представлены результаты эксперимента предложенным способом, доказывающие эффективность его использования с целью непрерывного определения расстояния от снаряда до забоя. В ходе экспериментальных исследований получены зависимости влияния расстояния между долотом и забоем на эффективность шароструйного бурения, которые могут быть использованы при конструировании буровых снарядов и определения оптимальных режимных параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сулакшин С.С., Чубик П.С. Разрушение горных пород при проведении геологоразведочных работ. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 367 с.
2. Experimental study on the rock-breaking mechanism of disc-like hybrid bit / Shiwei Niua, Hualin Zhenga, Yingxin Yanga, Lian Chena // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410517309671> (дата обращения 10.12.2017).
3. A new technology for hard-rock tunneling based on drilling and hydraulic impact breaking / Risheng Long, Shaoni Sun, Zisheng Lian, Yaoyao Liao, Xiaofeng Qin // International Journal of Mining Science and Technology. – 2015. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S209526861500172X> (дата обращения 10.12.2017).
4. Herrera M.P., Gómez-Martín M.E., Medina J.R. Hydraulic stability of rock armors in breaking wave conditions // Coastal Engineering. – 2017. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378383916302629> (дата обращения 10.12.17)
5. Давиденко А.Н., Игнатов А.А. Абразивно-механическое ударное бурение скважин: монография. – Д.: НГУ, 2013. – 110 с.
6. Уваков А. Б. Шароструйное бурение. – М.: Недра, 1969. – 207 с.
7. Кожевников А.А., Давиденко А.Н. Гидромеханический и эрозионный способы разрушения горных пород при бурении скважин. – М.: ВИЭМС, 1987. – 45 с.
8. Ковалев А.В. Теоретические и экспериментальные исследования технологических процессов шароструйного бурения скважин: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2015. – 143 с.
9. Штрассер В.В. Исследование процессов разрушения горных пород ударами шаров (к теории шароструйного бурения): дис. ... канд. техн. наук. – Алма-Ата, 1966. – 217 с.
10. Заурбеков С.А. Повышение эффективности призабойных гидродинамических процессов при шароструйном бурении скважин: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Алматы, 1995. – 18 с.
11. Eckel I.E., Deily F.H., Ledgerwood L.W. Development and testing of jet pump pellet impact drill bits // Transaction AIME. – 1956. – V. 207. – P. 15–21.
12. Ledgerwood W. Jr. Efforts to Develop Improved Oilwell Drilling Methods // Journal of Petroleum Technology. – 1960. – V. 12. – P. 62–74.
13. Расчет технологических процессов шароструйного бурения в оптимальном режиме разрушения горных пород / А.В. Ковалев, С.Я. Рябчиков, В.М. Горбенко, М.В. Горбенко, Л.А. Саруев // Георесурсы, научно-технический журнал. – 2016. – Т. 18. – № 2. – С. 102–106.
14. Monitoring of Acoustic Emission during the Disintegration of Rock / R. Tripathi, M. Srivastava, S. Hloch, P. Adamčík, S. Chattopadhyaya, A. Kumar Das // Procedia Engineering. – 2016 URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816312127> (дата обращения 10.12.2017).
15. Hydraulic standoff control for pellet impact drilling: пат. США № 2724574; заявл. 29.01.1952; опубл. 22.11.1955.
16. А. с. № 870705, Е 21 С 37/16, Е 21 С 21/00, Е 21 В 7/18. Способ эрозионного бурения скважин и устройство для его осуществления № 2798122/22–03; заявл. 18.07.1979; опубл. 07.10.1981.
17. А. с. № 417599, Е 21 В 7/18. Шароструйный снаряд для бурения скважин № 1451266/22–3; заявл. 15.06.1970; опубл. 28.02.1974.
18. А. с. № 1002498, Е 21 В 7/18. Шароструйный снаряд № 3278854/22–03; заявл. 24.04.1981; опубл. 07.03.1983.
19. Pellet impact drilling apparatus: пат. США № 2868509; заявл. 07.06.1956; опубл. 13.01.1959.
20. Pellet impact drilling operational parameters: experimental research / A.V. Kovalyov, S.Ya. Ryabchikov, Ye.D. Isaev, F.R. Aliev, M.V. Gorbenko, A.V. Baranova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – V. 24. – P. 102–106.
21. Способ шароструйного бурения скважин: заявка на изобретение № 2016146972/03 РФ от 29.11.2016; МПК (2016.01) E21B7/18.

Поступила 15.01.2018 г.

Информация об авторах

Урниш В.В., аспирант кафедры теоретической и прикладной механики Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Саруев Л.А., доктор технических наук, профессор кафедры теоретической и прикладной механики Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Саруев А.Л., кандидат технических наук, доцент кафедры транспорта и хранения нефти и газа Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC [621.835+621.888].001.5:622.243

OPTIMIZATION OF PELLET IMPACT DRILLING REGIMES BY REGULATION OF SPACING BETWEEN A DRILL BIT AND A HOLE BOTTOM

Viktor V. Urnish¹,
madvic93@mail.ru

Lev A. Saruev¹,
saruevla@tpu.ru

Alexey L. Saruev¹,
saruev@tpu.ru

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

The relevance of the research. One of the main technological parameters of the pellet impact drilling is the spacing between a drill bit and a holebottom. There are several methods and constructions of drill bits that allow keeping this distance with bit feet. In this case, the jet apparatus is held at a certain distance from the blades, which destroy the border zone or central part of the rock by a rotary method. However, no method makes it possible to determine the optimal distance precisely. Since it is quite difficult to calculate the necessary distance for different rocks considering their mechanical characteristics it is very important to identify and keep the optimum spacing between the drill bit and the hole bottom continuously when drilling.

The main aim was to analyze the main methods and constructions of keeping the spacing between the drill bit and the hole bottom, also to formulate the requirements. Considering the requirements, to propose a method for keeping the spacing which allows us to determine continuously the necessary distance for current conditions.

Object of researches is a bottomhole drilling.

Methods: compilation and analysis of the sources; research of technological processes of pellet impact drilling; investigation of the influence of the spacing between the drill bit and the hole bottom on the rock breaking efficiency; representation of a string of drill pipes as an acoustic communication channel in which elastic vibrations spread during impacts of the bounced balls; development of a technological scheme for increasing pellet impact drilling efficiency; experimental studies using an acoustic oscillation sensor and an oscilloscope; analysis of the waveform.

Results. The authors have studied the spacing between the drill bit and the hole bottom which affects the efficiency of pellet impact drilling and analyzed the basic methods and constructions. Based on the analysis the requirements were stated. Taking into account the developed requirements the authors proposed the method for keeping the optimal spacing. The paper introduces the experimental results with the proposed method. The results prove the effectiveness of using the method for determining continuously spacing between the drill bit and the hole bottom. The results obtained can be used to select and maintain optimal operating parameters.

Key words:

Rock breaking, rock-breaking tool, pellet impact drilling, pellet impact apparatus, spacing between the drill bit and the hole bottom, acoustic oscillation sensor.

REFERENCES

- Sulakshin S.S., Chubik P.S. *Razrushenie gornyykh porod pri provedenii geologorazvedochnykh rabot* [Rock breaking during geological exploration]. Tomsk, TPU Publ. house, 2011. 367 p.
- Shiwei Niua, Hualin Zhenga, Yingxin Yanga, Lian Chena. Experimental study on the rock-breaking mechanism of disc-like hybrid bit. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2017. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410517309671> (accessed 10 December 2017).
- Risheng Long, Shaoni Sun, Zisheng Lian, Yaoyao Liao, Xiaofeng Qin. A new technology for hard-rock tunneling based on drilling and hydraulic impact breaking. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2015. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S209526861500172X> (accessed 10 December 2017).
- Herrera M.P., Gómez-Martín M.E., Medina J.R. Hydraulic stability of rock armors in breaking wave conditions. *Coastal Engineering*. 2017. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378383916302629> (accessed 10 December 2017).
- Davidenko A.N., Ignatov A.A. *Abrazivno-mekhanicheskoe udarnoe burenie skvazhin: monografiya* [Abrasive mechanical percussive drilling: a monograph]. D., NGU Publ., 2013. 110 p.
- Uvakov A. B. *Sharostruynoe burenie* [Pellet impact drilling]. Moscow, Nedra Publ., 1969. 207 p.
- Kozhevnikov A.A., Davidenko A.N. *Gidromekhanicheskii i eroziionny sposoby razrusheniya gornyykh porod pri burenii skvazhin* [Hydromechanical and erosive methods of rock breaking when drilling]. Moscow, VIEMS Publ., 1987. 45 p.
- Kovalev A.V. *Teoreticheskie i eksperimentalnye issledovaniya tekhnologicheskikh protsessov sharostruynogo burenii skvazhin*. Dis. kand. nauk [Theoretical and experimental studies of pellet impact drilling technological processes. Cand. Diss]. Tomsk, 2015. 143 p.
- Shtrasser V.V. *Issledovanie protsessov razrusheniya gornyykh porod udarami sharov (k teorii sharostruynogo burenii)*. Dis. kand. nauk. [Study of the balls impacts rock-breaking (to the theory of pellet impact drilling). Cand. Diss]. Alma-Ata, 1966. 217 p.
- Zaurbekov S.A. *Povysheniye effektivnosti prizaboynykh gidrodinamicheskikh protsessov pri sharostruynom burenii skvazhin*. Avtoreferat Dis. kand. nauk. [Increasing the efficiency of bottomhole hydrodynamic processes during pellet impact drilling. Cand. Diss. Abstract]. Almaty, 1995. 18 p.
- Eckel I.E., Deily F.H., Ledgerwood L.W. Development and testing of jet pump pellet impact drill bits. *Transaction AIME*, 1956, vol. 207, pp. 15–21.

12. Ledgerwood L.W. Efforts to Develop Improved Oilwell Drilling Methods. *Journal of Petroleum Technology*, 1960, vol. 12, pp. 62–74.
13. Kovalev A.V., Ryabchikov S.Ya., Gorbenko V.M., Gorbenko M.V., Saruev L.A. Calculation of Ball Jet Drilling Processes in the Optimal Mode of Rock Destruction. *Georesources*, 2016, vol. 18, no. 2, pp. 102–106. In Rus.
14. Rupam Tripathi, Madhulika Srivastava, Sergej Hloch, Pavel Adamčík, Somnath Chattopadhyaya, Alok Kumar Das. Monitoring of Acoustic Emission During the Disintegration of Rock. *Procedia Engineering*. 2016. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816312127> (accessed 10 December 2017).
15. Ledgerwood L.W. *Hydraulic standoff control for pellet impact drilling*. Patent US2724574A, 1955.
16. Derbenev L.S., Bogolyubov A.A., Kapustin A.A., Karkashadze G.G., Yanchenko G.A. *Sposob erozionnogo bureniya skvazhin i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [The method of erosion well drilling and device for its realization]. Patent RF, no. 2798122/22–03, 1981.
17. Uvakov A.B., Shtrasser V.V. *Sharostruyny snaryad dlya bureniya skvazhin* [Pellet impact bit for drilling wells]. Patent RF no. 1451266, 1974.
18. Maylibayev M.M. *Sharostruyny snaryad* [Pellet impact drilling bit]. Patent RF no. 3278854, 1983.
19. Williams P.S. *Pellet impact drilling apparatus*. Patent US2868509, 1959.
20. Kovalyov A.V., Ryabchikov S.Ya., Isaev E.D., Aliev F.R., Gorbenko M.V., Baranova A.V. Pellet impact drilling operational parameters: experimental research. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 24, pp. 102–106.
21. Kovalev A.V., Urnish V.V., Saruev L.A., Gorbenko M.V., Ryabchikov S.Ya., Isaev E.D., Vagapov A.R., Epikhin A.V. *Sposob sharostruynogo bureniya skvazhin* [Method of pellet impact well drilling]. Patent RF no. 2640445, 2018.

Received: 15 January 2018.

Information about the authors

Viktor V. Urnish, post-graduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

Lev A. Saruev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexey L. Saruev, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Корректурa и перевод на английский язык *С.В. Жаркова*
Дизайн обложки *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива
Валерия Касаткина

Руководство для авторов и образец оформления статьи: izvestiya.tpu.ru

Подписано к печати хх.04.2018. Формат 60х84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 19,89. Уч.-изд. л. 17,99.
Заказ хх-18. Тираж 500 экз.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ